

**Анализ результата эксперимента Нейтрино-4  
совместно с результатами других экспериментов  
по поиску стерильного нейтрино  
в рамках нейтринной модели 3+1**

**А.П. Серебров**

*НИЦ КИ - Петербургский институт ядерной физики, Гатчина, Россия*

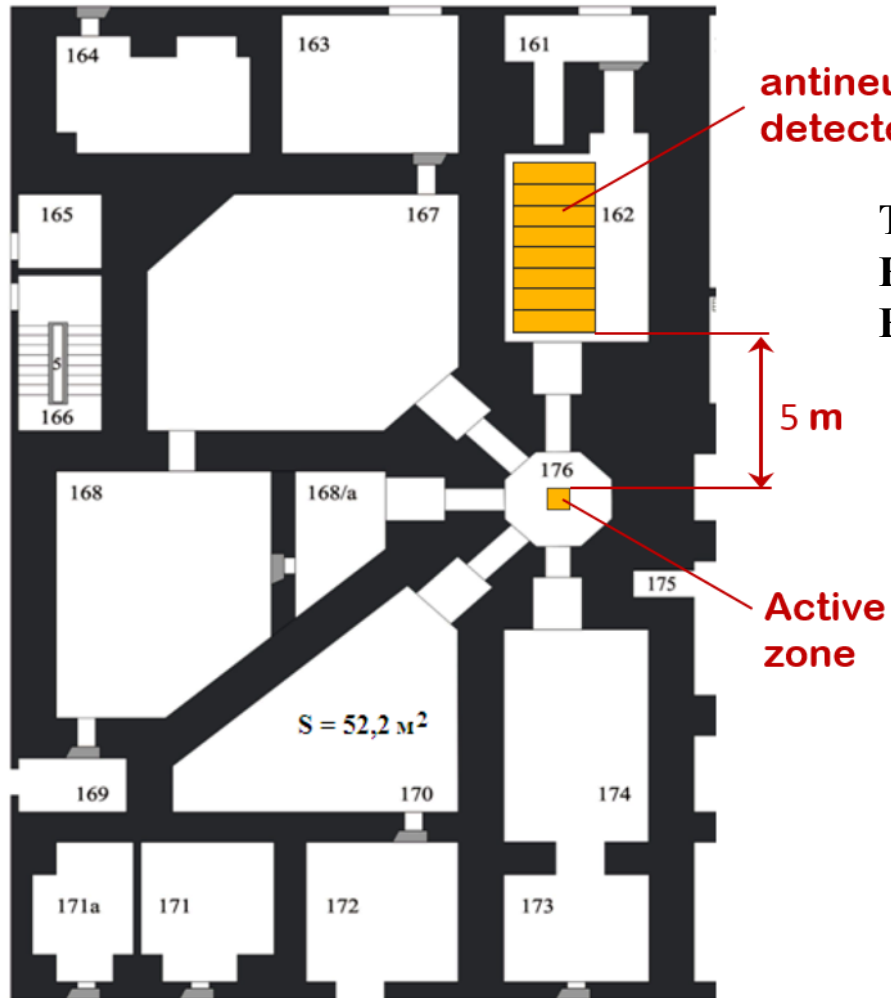
International Conference on Quantum Field Theory, High-Energy Physics, and Cosmology

18-21 июля 2022 BLTP, JINR

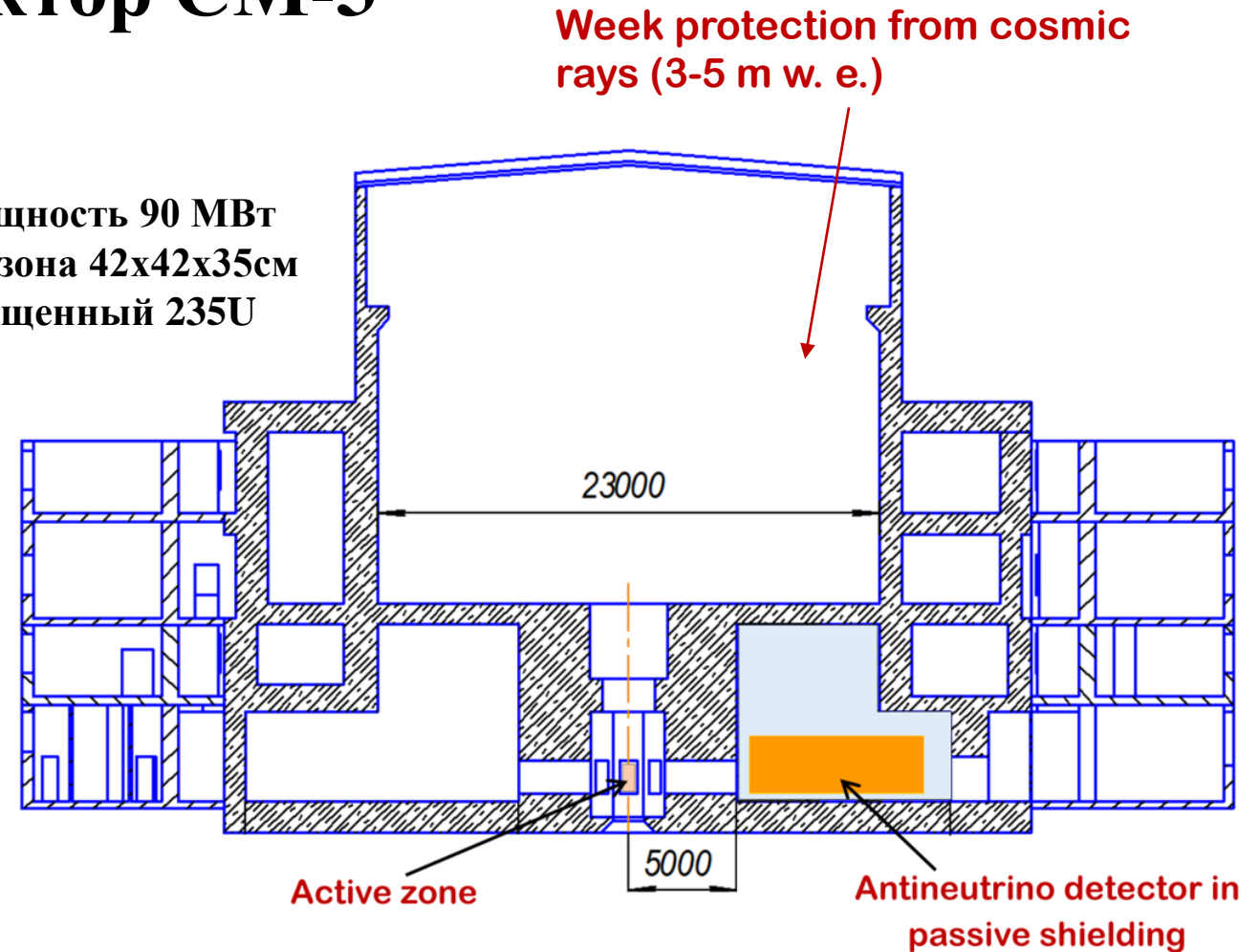
- 1. Прямое наблюдение эффекта осцилляции в эксперименте Нейтрино-4 по поиску стерильного нейтрино.**
- 2. Сравнение результатов эксперимента Нейтрино-4 с результатами других экспериментов.**
  - 2.1. NEOS, DANSS, STEREO, PROSPECT на реакторах , Стандартная Солнечная Модель*
  - 2.2. MiniBooNE, LSND на ускорителях*
  - 2.3. эксперимента IceCube*
  - 2.4. эксперимента BEST с нейтринным источником Cr51*
  - 2.5. эксперимента MicroBoone*
- 3. Параметры стерильного нейтрино. Модель нейтрино с одним стерильным нейтрино**
  - 3.1. Матрица PMNS для модели  $3 + 1$*
  - 3.2. Схема смешивания нейтринных ароматов, включая стерильное нейтрино*
  - 3.3. иерархия эффективных масс*
- 4. Возможность экспериментальной проверки нейтринной модели  $3 + 1$** 
  - 4.1. Предсказание эффективной массы электронного нейтрино из эксперимента Нейтрино-4*
  - 4.2. Сравнение с экспериментами по измерению массы нейтрино в эксперименте KATRIN*
  - 4.3. Сравнение с ограничениями массы нейтрино из эксперимента GERDA*
- 5. Космология - роль стерильных нейтрино в формировании Вселенной.**
- 6. Перспективы эксперимента**

В 2014 - 2017 годах была создана нейтринная лаборатория на реакторе СМ-3

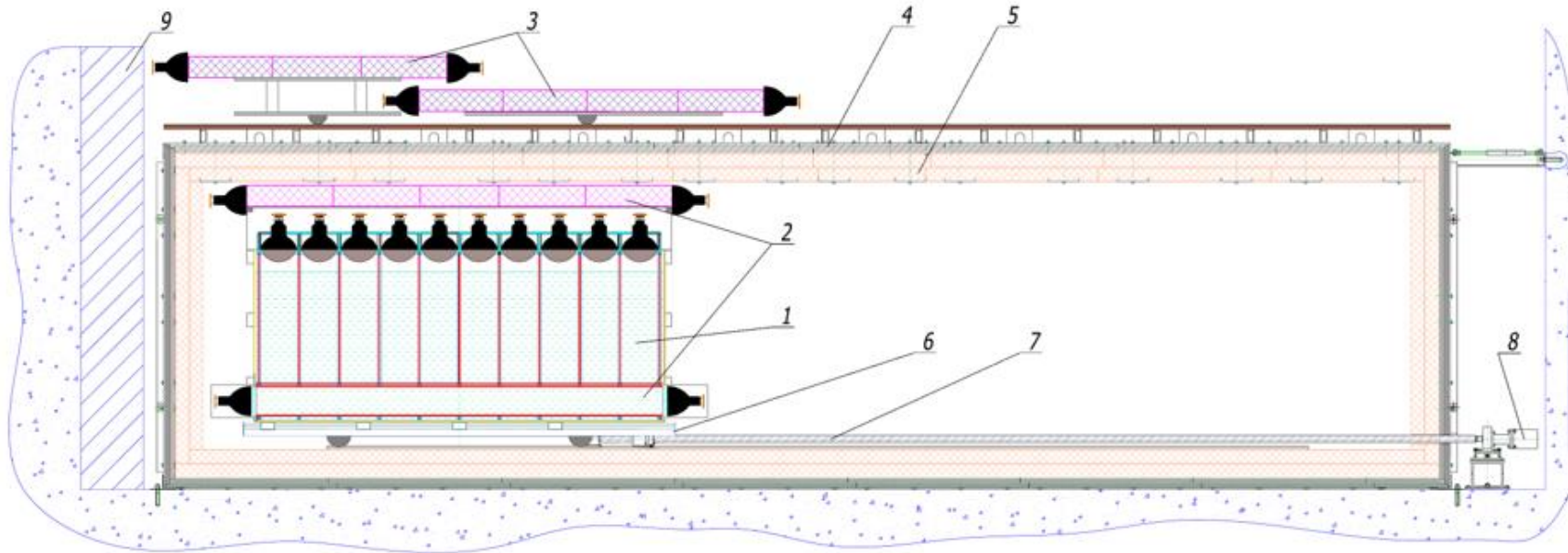
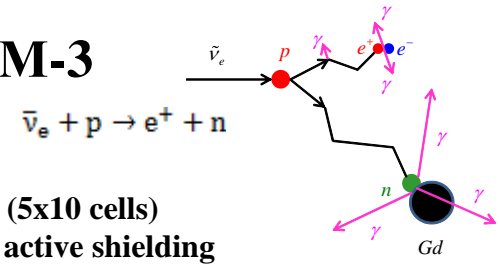
## Реактор СМ-3



Тепловая мощность 90 МВт  
Компактная зона 42x42x35см  
Высокообогащенный 235U



# Подвижный спектрально-чувствительный детектор антинейтрино на реакторе SM-3



1. detector (5x10 cells)
2. internal active shielding
3. external active shielding
4. steel and lead
5. borated polyethylene
6. moveable platform
7. feed screw
8. step motor
9. shielding



Пассивная защита - 60 тонн

Канал  
нейтрино  
← снаружи и  
внутри →



Детектор  
прототип  
←

Детектор  
→



Сцинтилляционный детектор  
50 секций 0,235x0,235x0,85м3

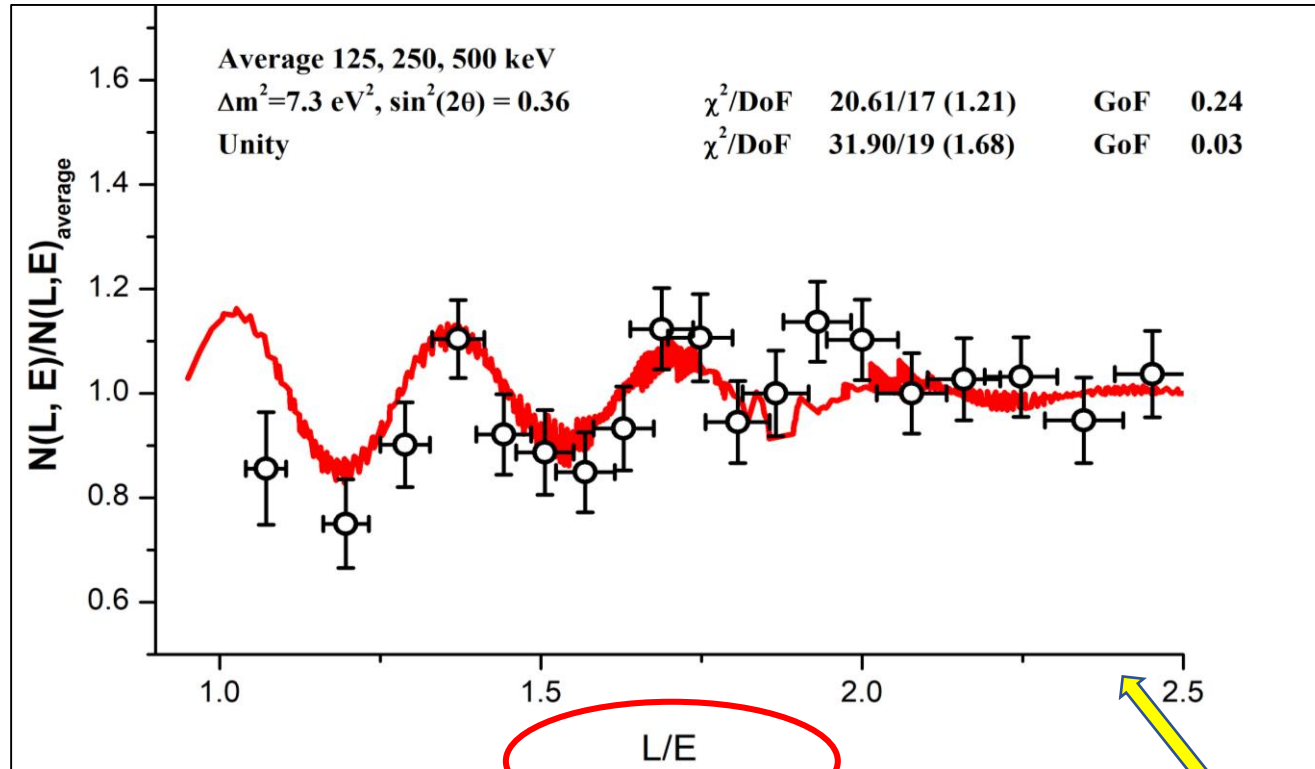
Диапазон измерений 6 - 12 метров.

# Прямое наблюдение эффекта осцилляций в эксперименте Нейтрино-4

$$\Delta m_{14}^2 = 7.30 \pm 0.13_{st} \pm 1.16_{syst}$$

$$\sin^2 2\theta = 0.36 \pm 0.12_{stat} (2.9\sigma)$$

A.P. Serebrov, et al. PHYSICAL REVIEW D 104, 032003 (2021)



$$P(\tilde{\nu}_e \rightarrow \tilde{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_{\tilde{\nu}} [\text{MeV}]} \right)$$

Период осцилляций  
для энергии  
нейтрино 4 МэВ  
составляет 1,4 м

A.P.Serebrov, et al.  
**JETP Letters,**  
Volume 109, 2019  
Issue 4, pp 213–221.

**JETP Letters,**  
Volume 112, 2020  
Issue 4, pp 211–225.

[arxiv:2003.03199](https://arxiv.org/abs/2003.03199)  
[arXiv:2005.05301v 8](https://arxiv.org/abs/2005.05301v8)



## Вероятность исчезновения антинейтрино

$$N(E_i, L_k)$$

число  
антинейтринных  
событий

$$P(\tilde{\nu}_e \rightarrow \tilde{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_{\tilde{\nu}} [\text{MeV}]} \right)$$

### Спектрально-независимый метод анализа экспериментальных данных

$$R_{i,k}^{\text{exp}} = \frac{N(E_i, L_k) L_k^2}{K^{-1} \sum_k N(E_i, L_k) L_k^2} = \frac{S(E) \mathcal{E}(E) [1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 (1.27 \Delta m_{14}^2 L_k / E_i)]}{S(E) \mathcal{E}(E) K^{-1} \sum_k [1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 (1.27 \Delta m_{14}^2 L_k / E_i)]} = R_{i,k}^{\text{th}}$$

Знаменатель значительно упрощается при диапазоне расстояний измерения, значительно превышающим характерный период осцилляций:

$S(E)$  - Spectrum

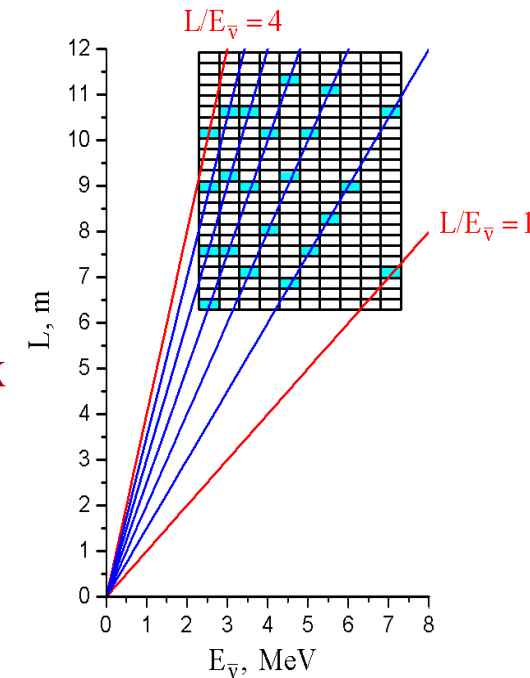
$\mathcal{E}(E)$  - Detector efficiency

$$R_{ik}^{\text{th}} \approx \frac{1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 (1.27 \Delta m_{14}^2 L_k / E_i)}{1 - 1/2 \sin^2 2\theta_{14}} \xrightarrow{\theta_{14}=0} 1$$

### Принцип голографии

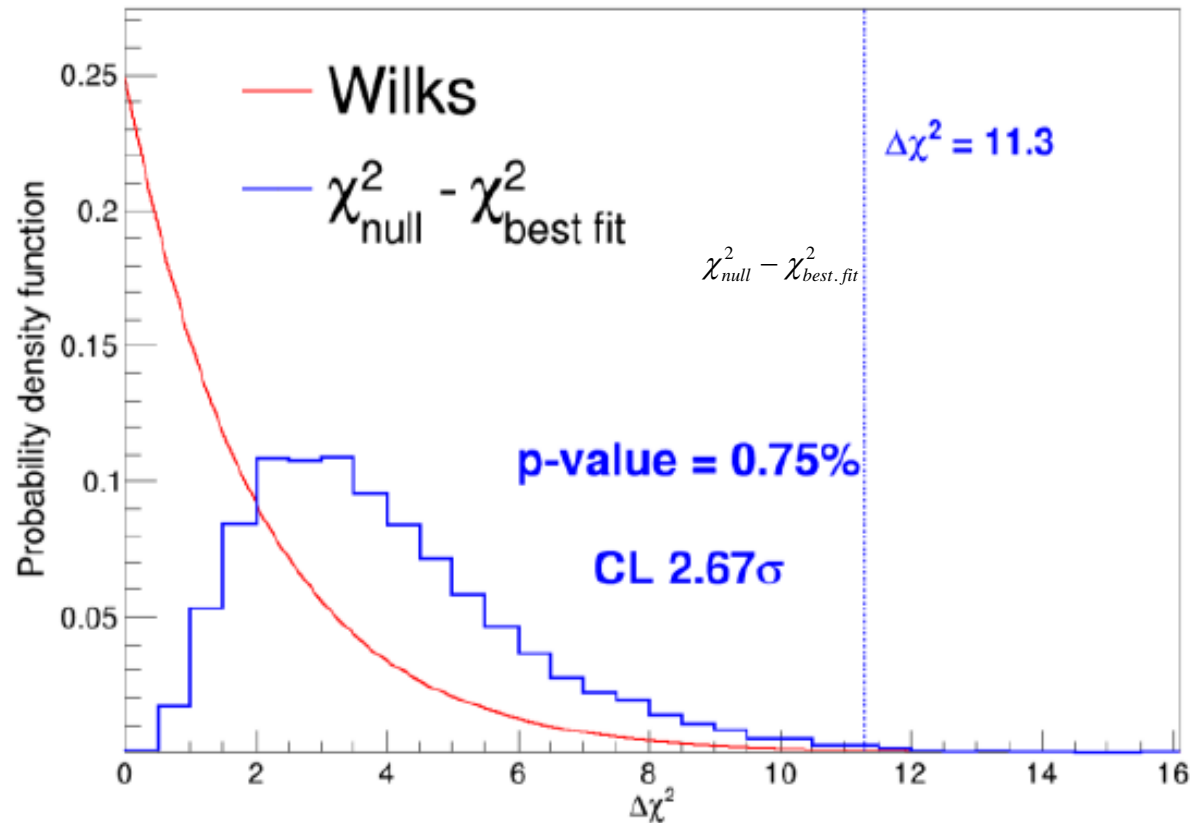
Голографический метод записи информации использует важнейшее свойство лазерного излучения — его **когерентность**

Световая волна при отражении от объекта изменяет не только **амплитуду**, но и **фазу** в соответствии со свойствами поверхности объекта в данной точке.



**Метод  
когерентного  
сложения  
данных с  
одинаковой  
фазой.  
Голография.**

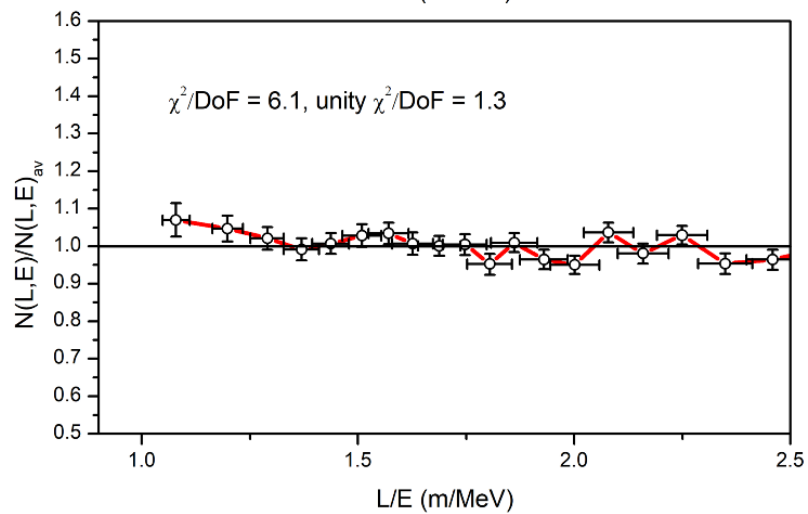
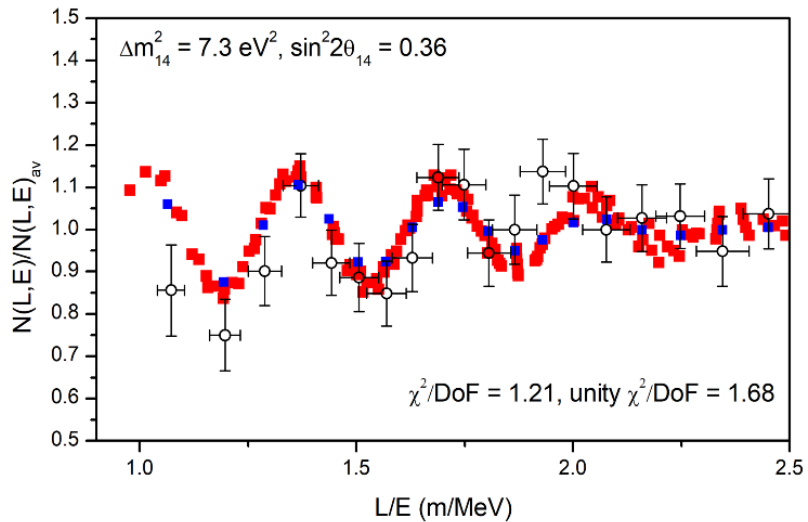
# MC модель с экспериментальной статистической точностью и теорема Уилкса



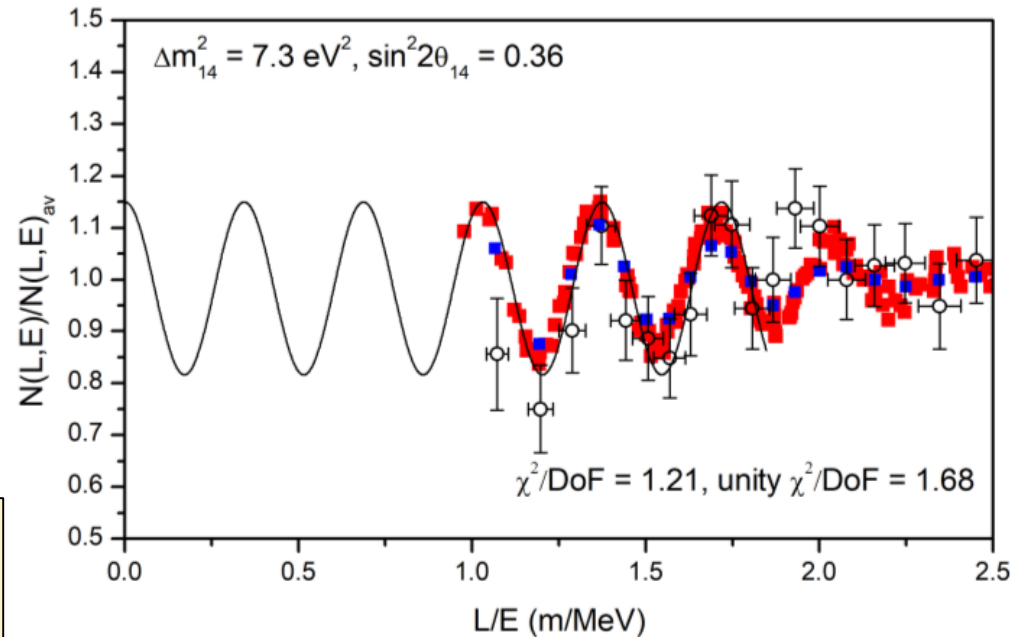
Это распределение отличается от  $\chi^2$  с двумя степенями свободы, как утверждает теорема Уилкса. Однако доля результатов моделирования с  $\chi^2_{null} - \chi^2_{best.fit} \geq 11,3$  составляет всего 0,0075, что соответствует  $2,7\sigma$  CL. Таким образом, используя этот более строгий критерий для оценки уровня достоверности при поиске осцилляций в эксперименте «Нейтрино-4», можно сделать вывод о наблюдении осцилляции нейтрино в стерильное состояние при  $2.7\sigma$  CL.

**Уровень достоверности  $2.7\sigma$**

Распределение для подхода к статистическому анализу на основе MC (синяя линия) и  $\chi^2$  с функцией 2-х степеней свободы, которая утверждается теоремой Уилкса.

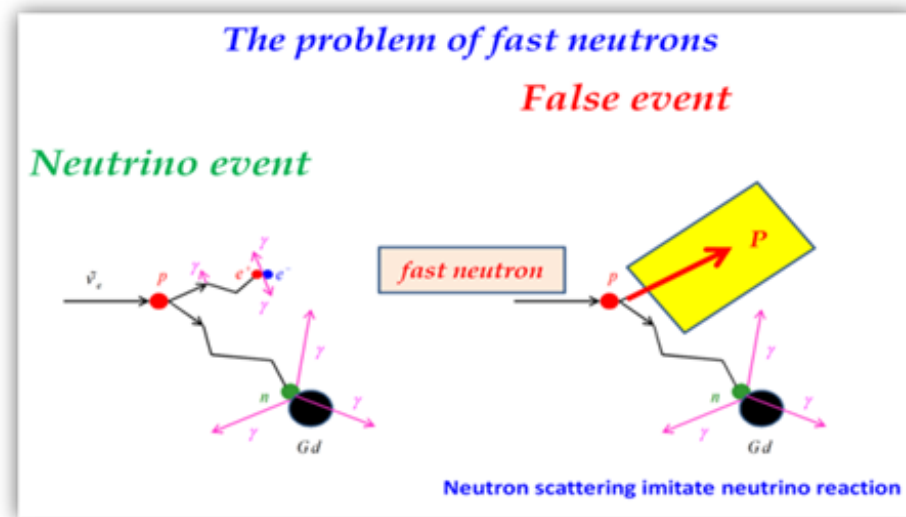


## Контроль систематики



Полная кривая осцилляций от центра активной зоны реактора.

Сравнение отношения  $R$  в зависимости от  $L/E$  для нейтринного сигнала (вверху) и отношения  $R$  в зависимости от  $L/E$  для фона (внизу).





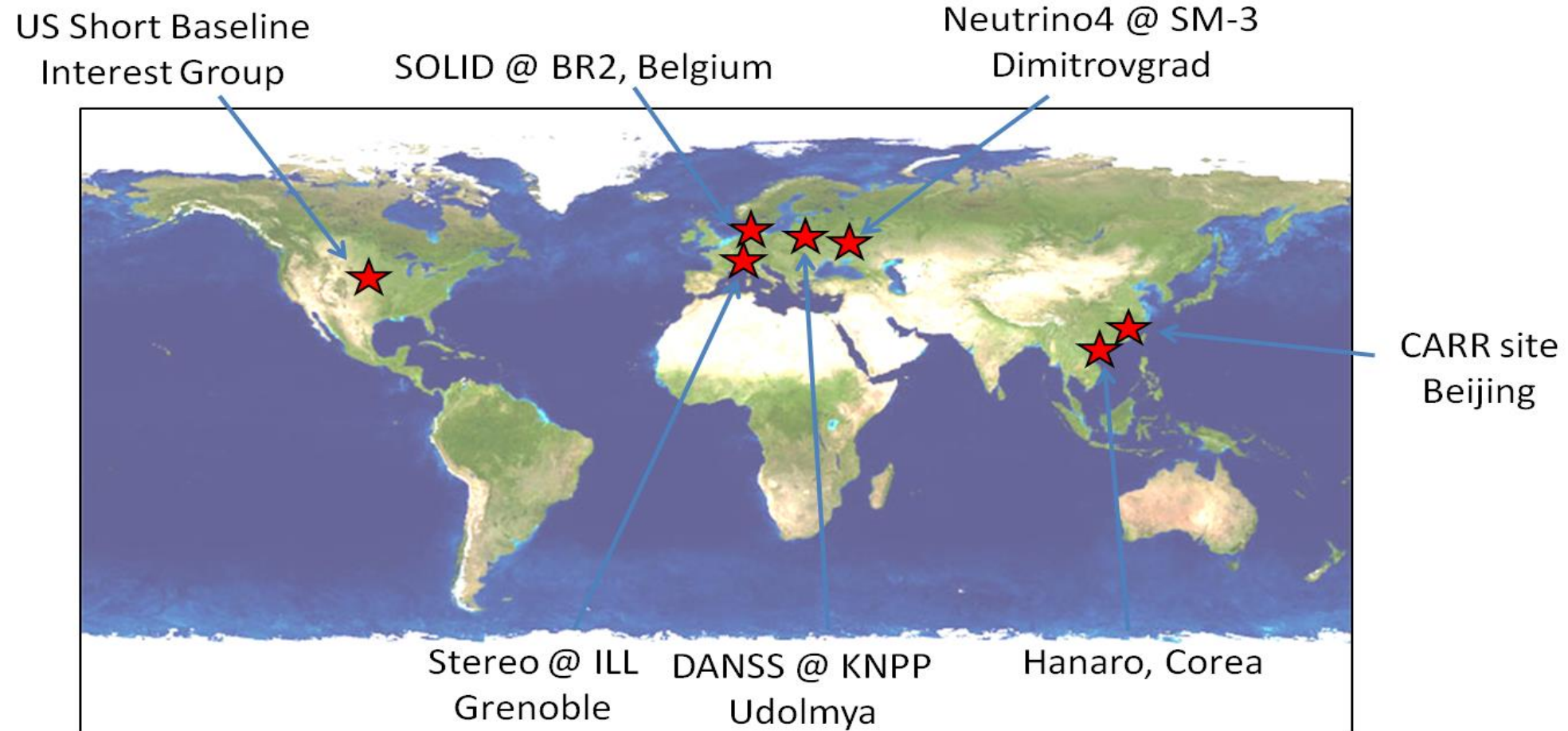
## РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НЕЙТРИНО-4

$$\Delta m_{14}^2 = 7.30 \pm 0.13_{st} \pm 1.16_{syst} = 7.30 \pm 1.17$$
$$\sin^2 2\theta = 0.36 \pm 0.12_{stat} (2.9\sigma)$$

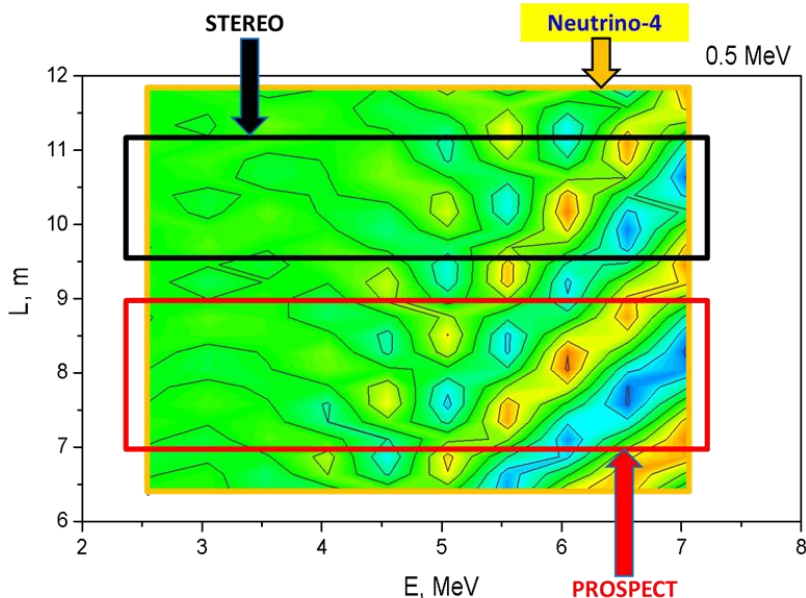
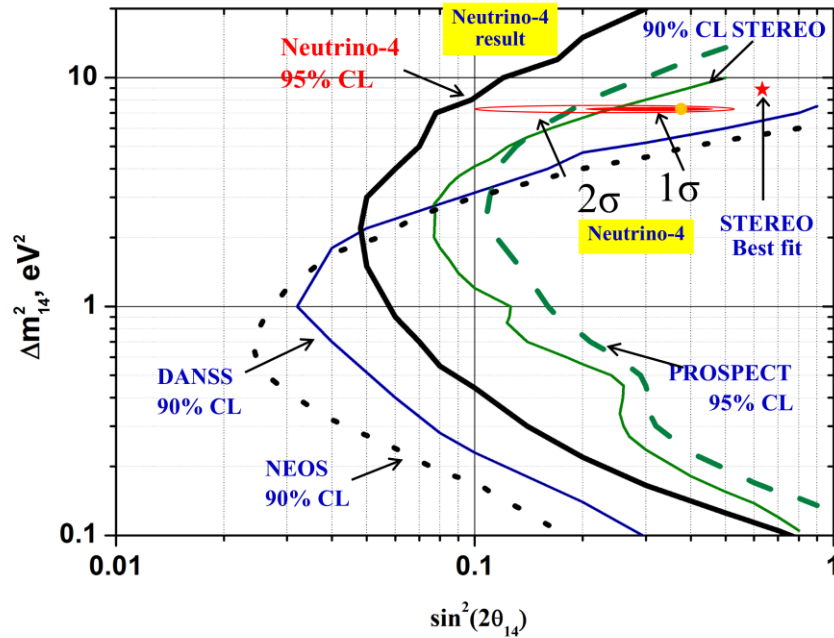
Масса стерильного нейтрино

$$m_4 = (2.70 \pm 0.22) \text{eV}$$

# New Short Baseline Reactor Experiments



# Сравнение результатов Neutrino-4 с результатами экспериментов PROSPECT, STEREO, DANSS и NEOS

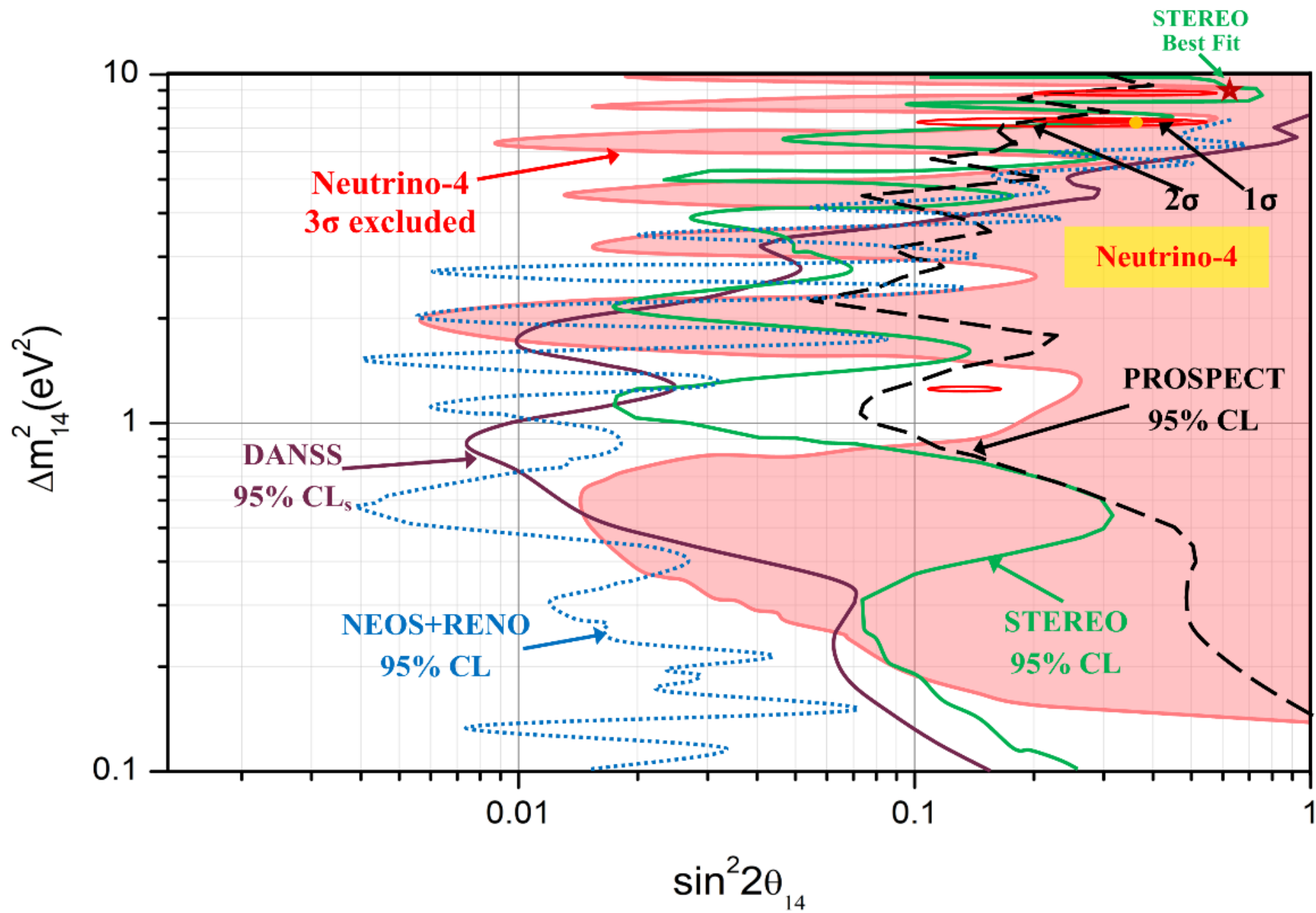


1. Эксперименты **DANSS** и **NEOS** на АЭС имеют существенно меньшую чувствительность к большим значениям параметра  $\Delta m_{14}^2$  из-за больших размеров активной зоны реактора 3-4 метра. Для осцилляций с периодом 1,4 м для энергии нейтрино 4 МэВ происходит усреднение эффекта уже в пределах зоны реактора.

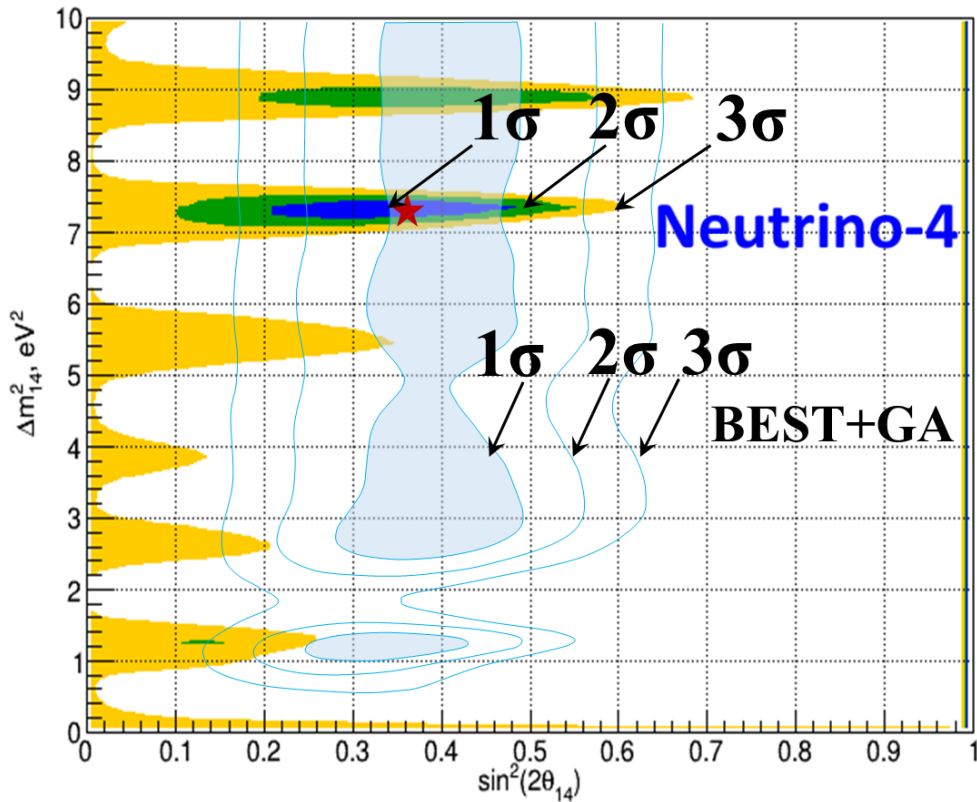
2. Чувствительность экспериментов **STEREO** [14] и **PROSPECT** [13] пока недостаточна, чтобы исключить результат эксперимента «Нейтрино-4», который имеет вдвое лучшую чувствительность (рис.). Хотя следует заметить, что бест фит эксперимента **STEREO** находится в области результата эксперимента **Нейтрино-4**.

3. Эксперименте «Нейтрино-4» использует значительно больший диапазон расстояний, **STEREO** [и **PROSPECT**].

4. Особенно важно, что в эксперименте «Нейтрино-4» мы наблюдаем процесс осцилляций непосредственно в измерениях, используя метод когерентного сложения результатов измерений с одинаковой фазой - **метод голографии**.



# Сравнение результатов эксперимента Нейтрино-4 с результатами эксперимента BEST



Результат эксперимента Нейтрино-4  
 $\sin^2 2\theta_{14} = 0.36 \pm 0.12 (2.9\sigma)$ .

Результат эксперимента BEST  
 $\sin^2 2\theta_{14} = 0.42 \pm 0.15 / 0.17$

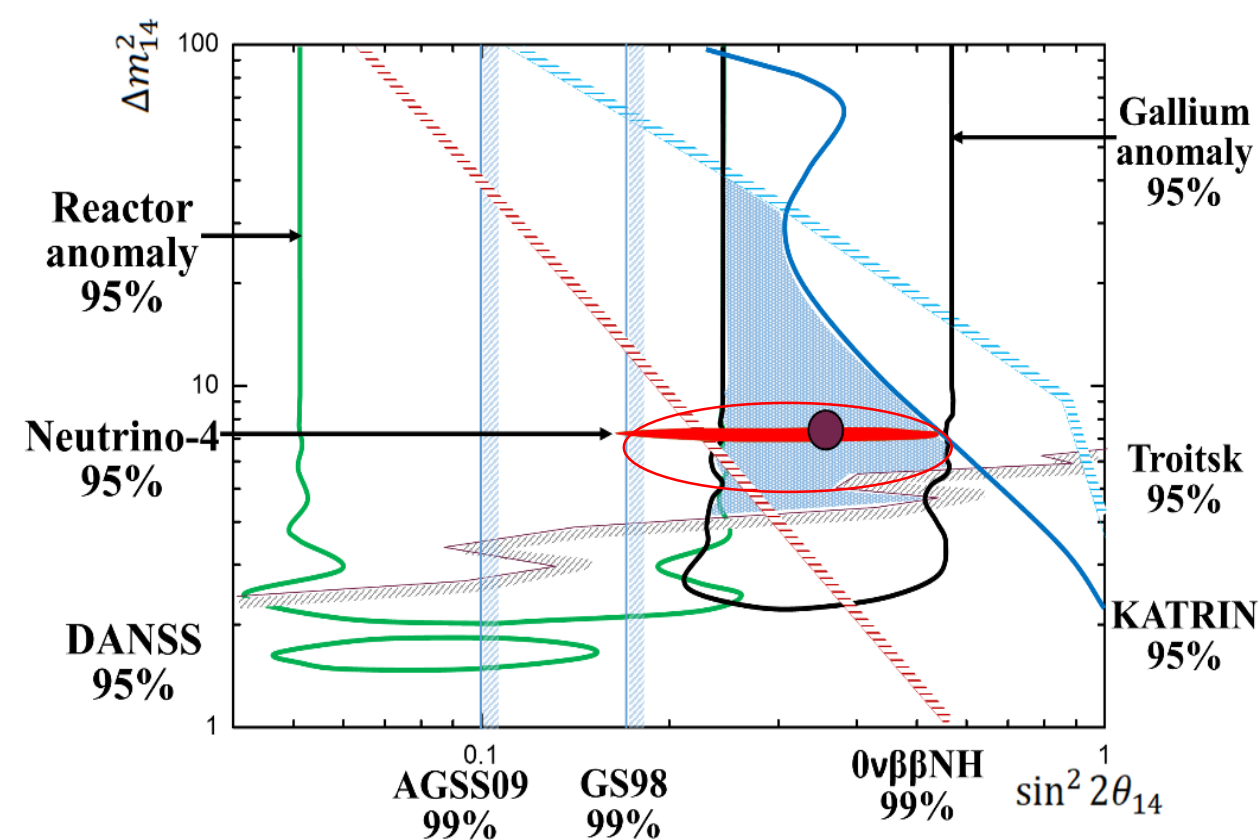
Результат эксперимента BEST+GA  
 $\sin^2 2\theta_{14} = 0.34 \pm 0.14 / 0.09$

Нейтрино-4 + BEST+GA

[arxiv:2201.07364](https://arxiv.org/abs/2201.07364)

$$\sin^2 2\theta_{14} = 0.35^{+0.09}_{-0.07} (5\sigma) !!!$$

## Сравнение результатов эксперимента Нейтрино-4 с результатами реакторной, галлиевой аномалии и результатами экспериментов KATRIN и GERDA и результатами эксперимента BEST



1. Теперь следует установить ограничение сверху на  $\Delta m_{14}^2$  из экспериментов KATRIN и GERDA.

2. На рисунке голубым цветом выделена область параметров стерильного нейтрино, определяемая экспериментами Троицк, KATRIN, BEST и DANSS, внутри которого находится результат эксперимента Нейтрино-4

$$\Delta m_{14}^2 = 7.30 \pm 0.13_{st} \pm 1.16_{syst}$$

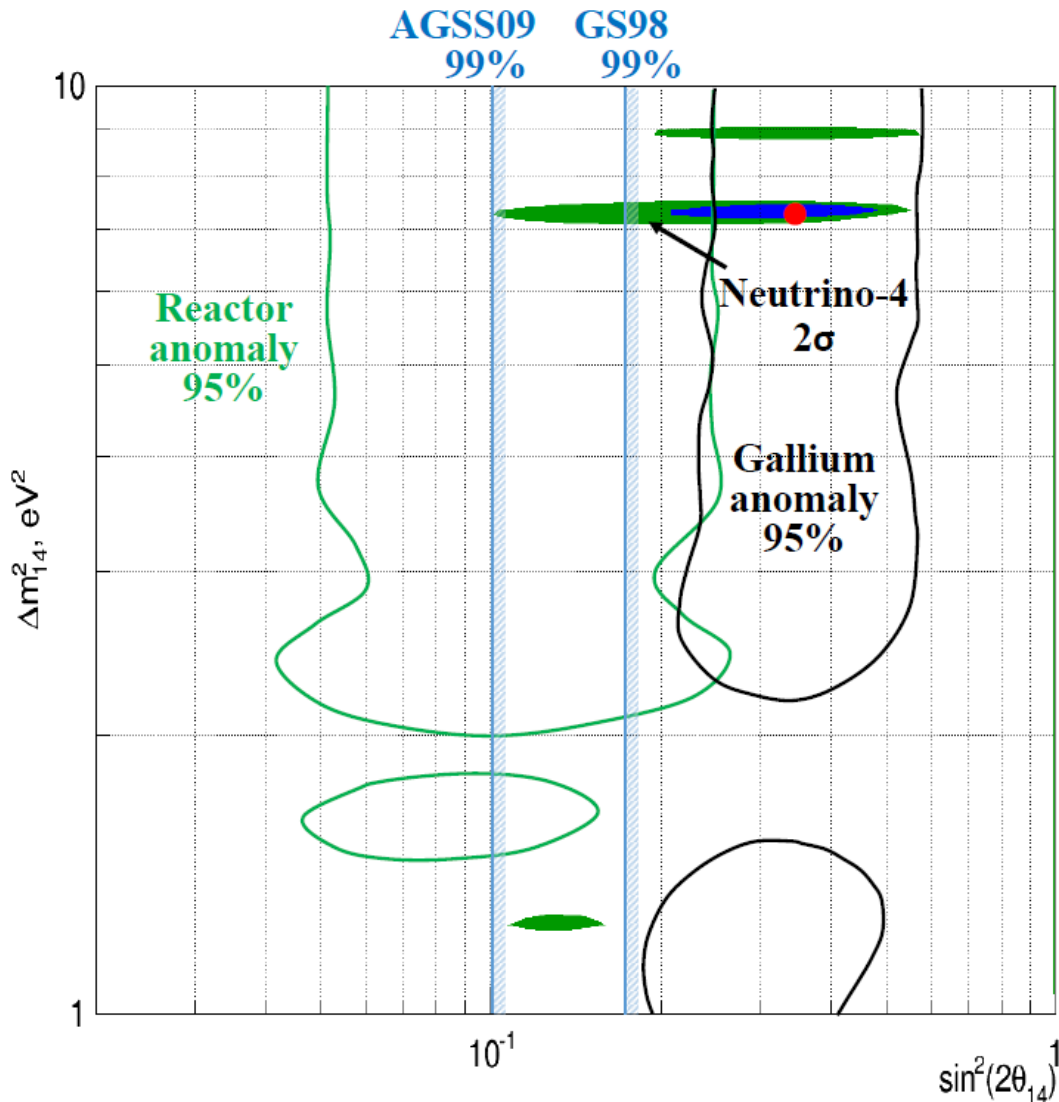
$$\sin^2 2\theta_{14} = 0.36 \pm 0.12$$

Красный эллипс на рисунке учитывает систематическую ошибку для уровня достоверности 95%.

3. Результат эксперимента KATRIN [15,16] не исключает области Нейтрино-4 (рис.).

4. Особого внимания требует эксперимент GERDA [17], так как он направлен на поиск массы нейтрино майорановского типа. В настоящее время предел массы Майораны, полученный в эксперименте GERDA для нормальной иерархии масс, на одно стандартное отклонение меньше, чем предсказание массы Майорана, полученное по результатам эксперимента Neutrino-4 (красная штриховка на рис.). Если в будущем предел майорановской массы эксперимента по двойному бета-распаду будет понижен и результат эксперимента Нейтрино-4 подтвердится, это закроет гипотезу о том, что нейтрино является частицей майорановского типа.

# Противоречие результатов Нейтрино-4 и нового результата галлиевой аномалии (ГА) с реакторной антинейтринной аномалией (РАА) и солнечными ограничениями



Следует заметить, что результат (РАА)

$$\sin^2 2\theta_{14} = 0.13 \pm 0.05 (2.6\sigma)$$

в  $\approx 2.5$  раза меньше, чем Нейтрино-4 и ГА(BEST) :  $0.36 \pm 0.12$  и  $0.34 \pm 0.09$  соответственно.

Разница РАА и Нейтрино-4 + ГА(BEST) составляет  $0.20 \pm 0.086$  . т.е.  $2.3\sigma$  в основном из-за большой ошибки РАА

Результаты экспериментов Neutrino-4 and BEST находятся в области параметров исключаемой глобальным фитом экспериментов по измерению потока солнечных нейтрино.

Солнечная модель:

GS98  $0.18$  (99% CL)

AGSS09  $0.10$  (99% CL)

**Разница оценок между двумя моделями составляет 1.8 раза**

*Эксперименты MiniBooNE, LSND на ускорителях  
эксперимент IceCube*

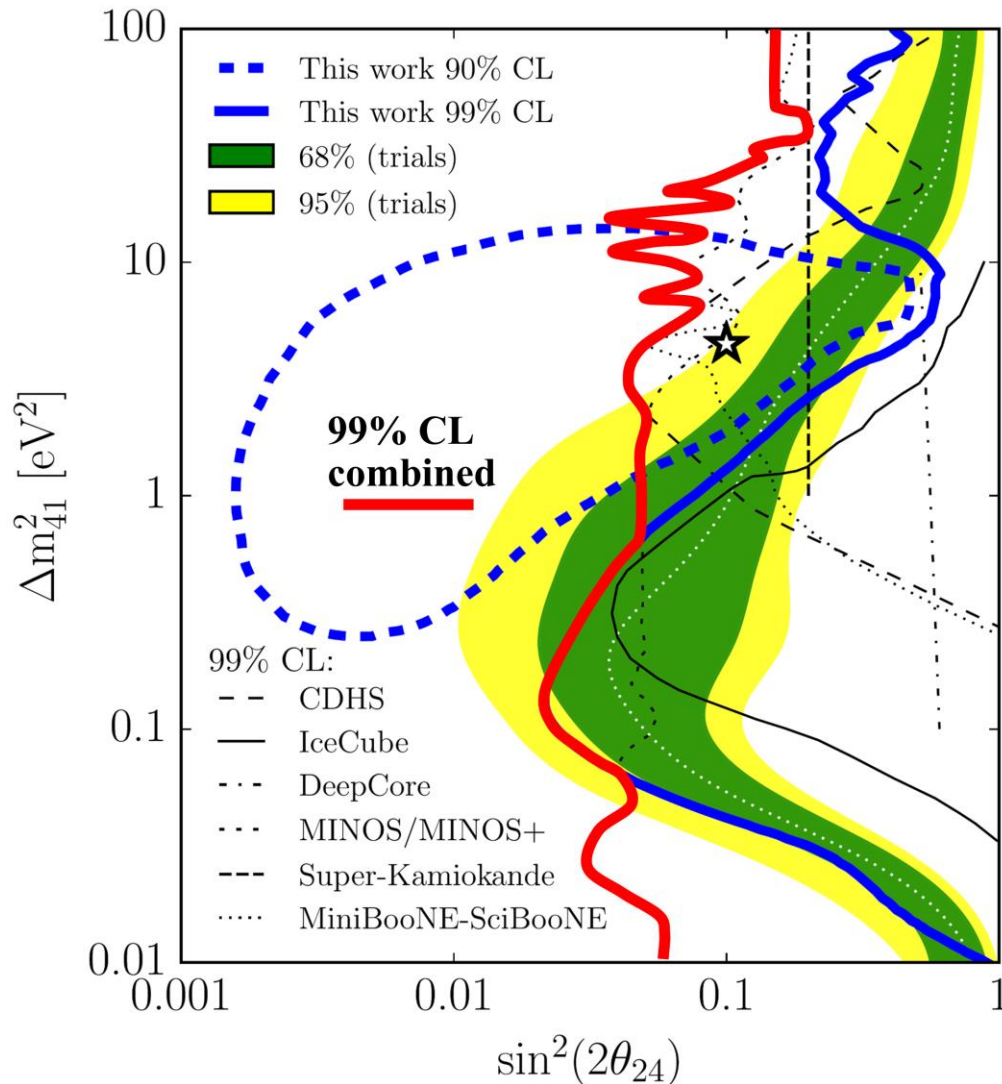
**Возможность экспериментальной проверки  
нейтринной модели 3 + 1 по соотношению**

$$\sin^2 2\theta_{\mu e} \approx \frac{1}{4} \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 2\theta_{24}$$



# Результаты эксперимента IceCube

PHYSICAL REVIEW LETTERS 125, 141801 (2020)



$$\Delta m_{14}^2 = 4.47_{-2.08}^{+3.53}$$

$$\sin^2(2\theta_{24}) = 0.10_{-0.07}^{+0.102}$$

**IceCube  
best fit**

Красная линия на рисунке есть огибающая пределов всех экспериментов при 99% CL. Она исключает best fit, но не опровергает результат эксперимента IceCube из-за большого диапазона ошибок эксперимента.

**Для проверки соотношения**

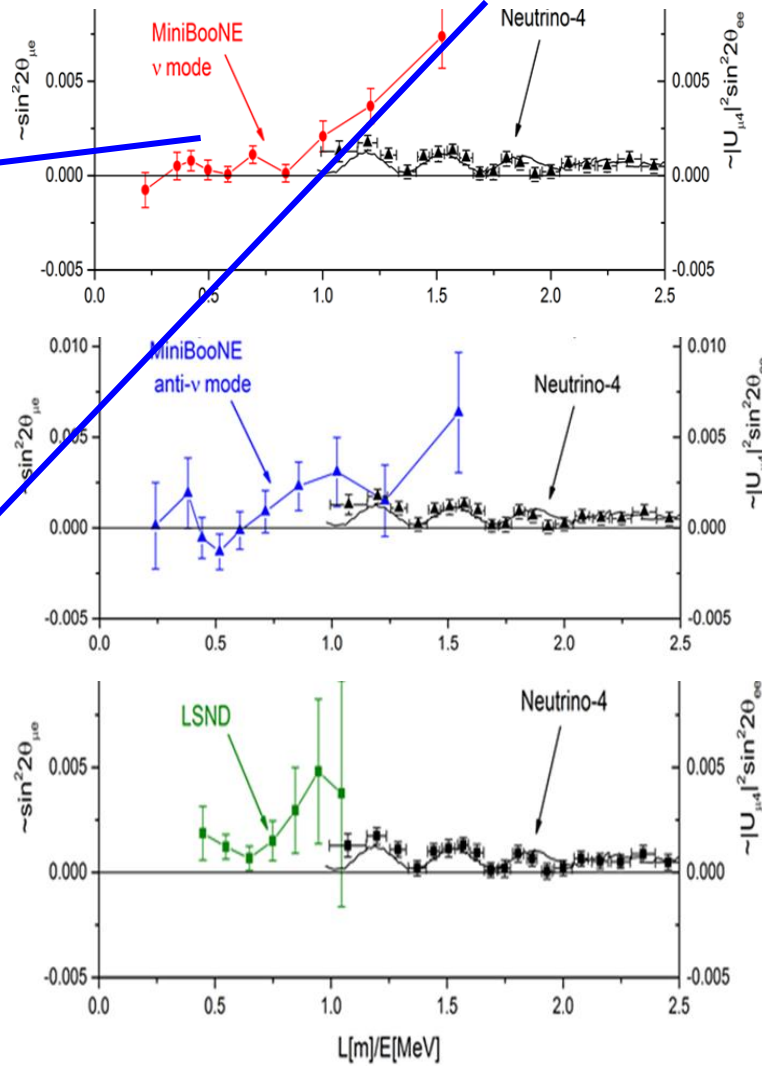
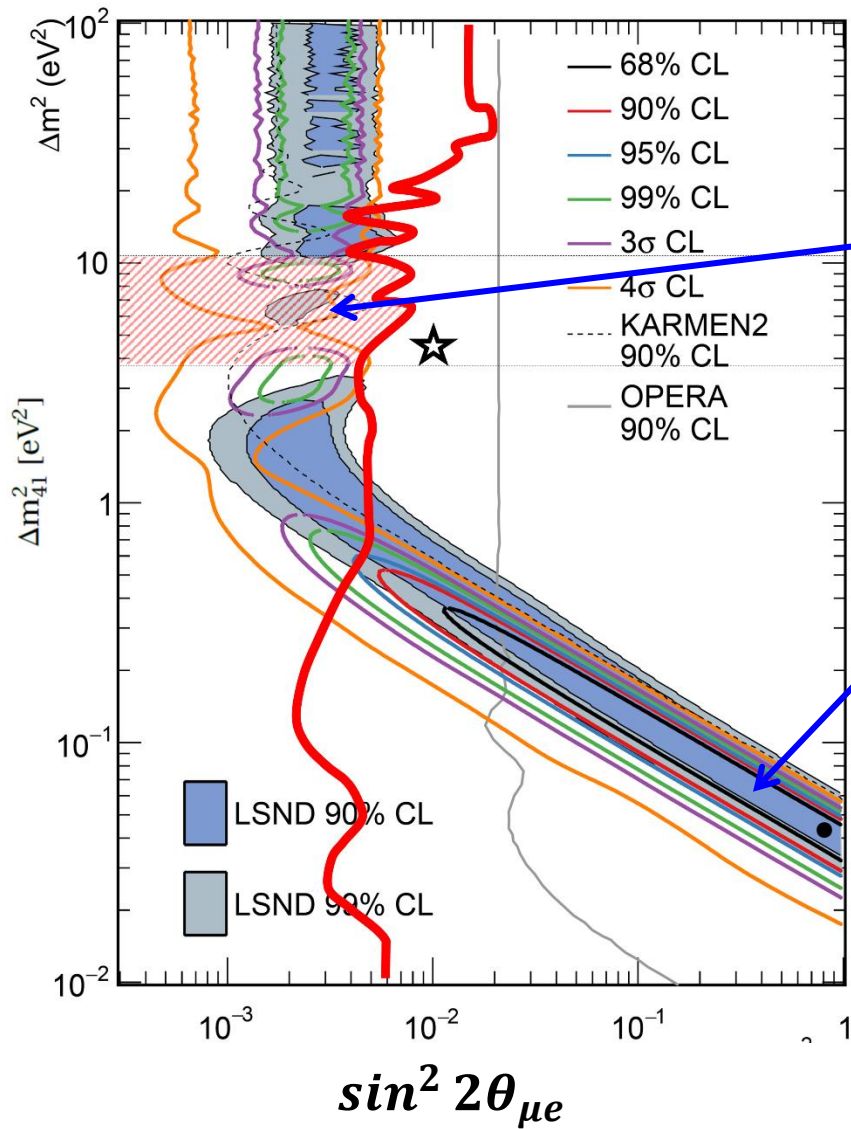
$$\sin^2 2\theta_{\mu e} \approx \frac{1}{4} \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 2\theta_{24}$$

**можно умножить это распределение на  $\frac{1}{4} \sin^2 2\theta_{14}$**

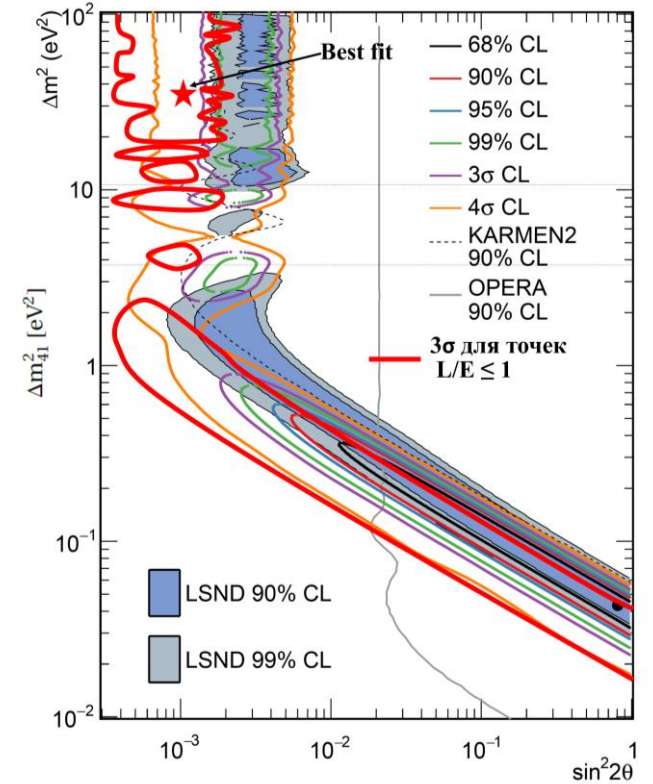
**из данных эксперимента Нейтрино-4 и ГА(BEST)**

$$\sin^2 2\theta_{14} = 0.35 \pm 0.07$$

Сравнение результатов эксперимента Нейтрино-4 с результатами экспериментов MiniBooNE, LSND в предположении, что  $\sin^2 2\theta_{24} = 2 \cdot 10^{-2}$  при экспериментальном значении  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.35 \pm 0.07$



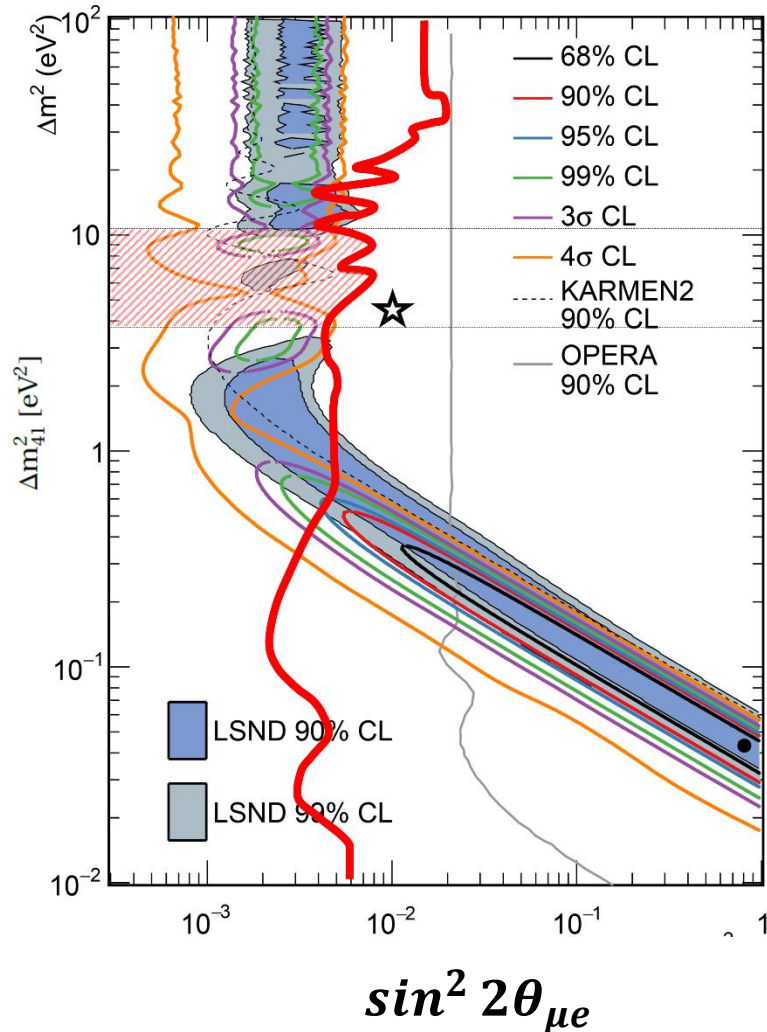
Анализ ограничений на плоскости  $\Delta m_{14}^2, \sin^2 2\theta_{24}$  после обрезания точек при  $L/E > 1$ .



После обрезания точек при  $L/E > 1$  best fit сместился в область больших  $\Delta m_{14}^2$

# Сравнение результатов данного анализа с ограничениями из эксперимента MicroBoone

Анализ на основе модели 3+1 с использованием результата Нейтрино-4 и ГА (BEST)

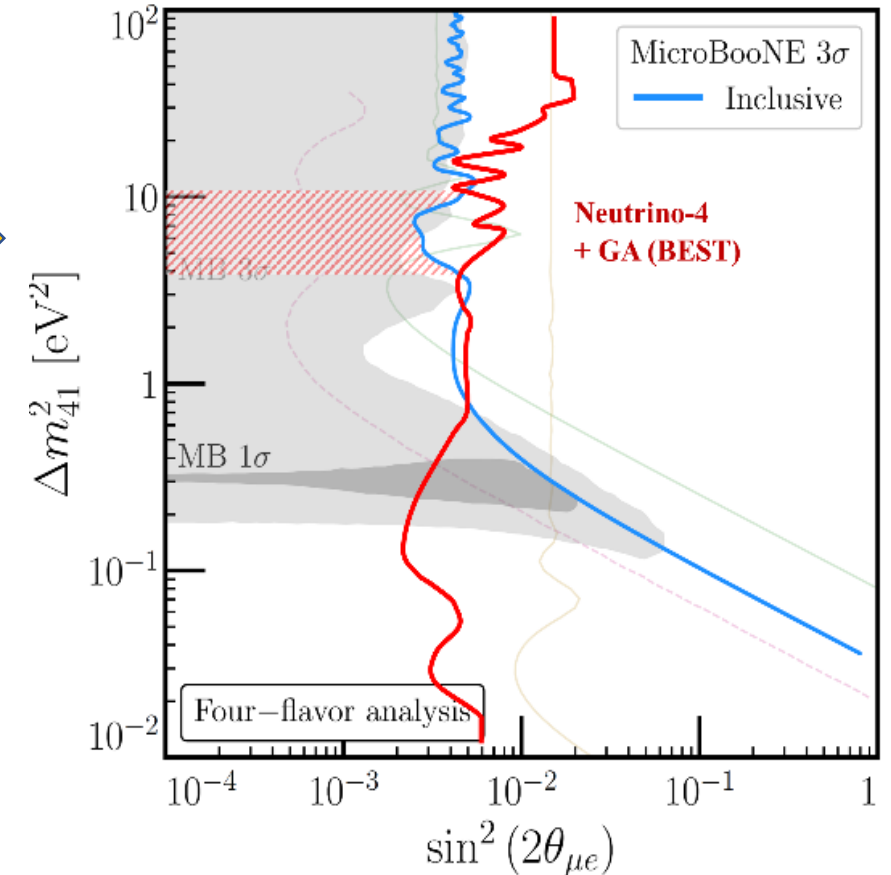


Эксперимент MicroBoone не закрыл область предсказаний из экспериментов Нейтрино-4 + ГА (BEST)

Согласие выводов + ограничения по  $m_{14}^2$  из эксперимента Нейтрино-4

Анализ эксперимента MicroBoone.

arXiv: 2111.10359  
19 ноября 2021



Ограничение MicroBoone. Предпочитаемые MiniBoone области показаны серым цветом. Красная штриховка это добавлена наша область с левой картинки.

# Заключение по анализу результата эксперимента Нейтрино-4 совместно с результатами других экспериментов по поиску стерильного нейтрино

1. Не обнаружено очевидных противоречий с экспериментами на реакторах, хотя имеется некоторая напряженность с экспериментами STEREO +PROSPECT, а также с РА и СМ.
2. В экспериментах на ускорителях MiniBooNE, LSND результаты наблюдений не противоречат результату эксперимента Нейтрино-4.
3. В эксперименте IceCube имеет место слабое наблюдение эффекта осцилляций.
4. Эксперимент BEST с нейтринным источником Cr51 подтверждает угол смешивания в эксперименте Нейтрино-4

$$\sin^2 2\theta_{14} = 0.35_{-0.07}^{+0.09} (5\sigma)$$

Нейтрино-4 + BEST+GA

## РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НЕЙТРИНО-4, BEST И ICE CUBE

$$\Delta m_{14}^2 = 7.30 \pm 0.13_{st} \pm 1.16_{syst} = 7.30 \pm 1.17$$
$$\sin^2 2\theta = 0.36 \pm 0.12_{stat} (2.9\sigma)$$

НЕЙТРИНО-4

$$m_4 = (2.70 \pm 0.22) \text{eV}$$

НЕЙТРИНО-4

$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.35 \pm 0.07 (4.9\sigma)$$

НЕЙТРИНО-4 + BEST

## Нейтринная модель с одним стерильным нейтрино

$$m_{4\nu_e}^{\text{eff}} = (0.82 \pm 0.18) \text{eV}$$

НЕЙТРИНО-4 + BEST

$$m_{4\nu_\mu}^{\text{eff}} = 0.21 \pm 0.08 \text{eV}$$

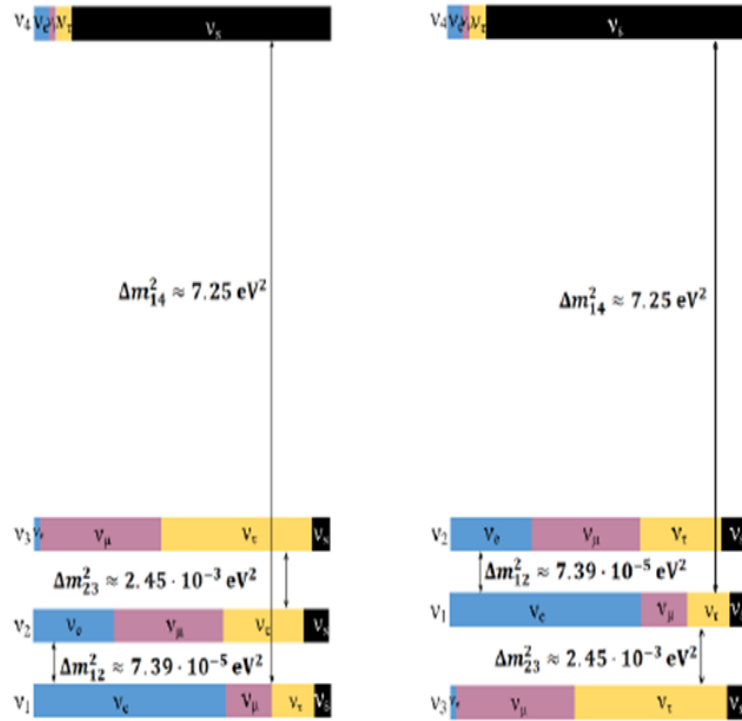
ICE CUBE

$$m_{4\nu_\tau}^{\text{eff}} = 0.05 \div 0.53 \text{eV}$$

**Нейтринная модель с одним  
стерильным нейтрино**

**Параметры стерильного нейтрино**

# Схема смешивания ароматов нейтрино, включая стерильное нейтрино и иерархия эффективных масс



## PMNS matrix for 3-x neutrino model

$$U_{PMNS}^{(3)} = \begin{pmatrix} 0.824_{-0.008}^{+0.007} & 0.547_{-0.011}^{+0.011} & 0.147_{-0.003}^{+0.003} \\ 0.409_{-0.060}^{+0.036} & 0.634_{-0.065}^{+0.022} & 0.657_{-0.014}^{+0.044} \\ 0.392_{-0.048}^{+0.025} & 0.547_{-0.028}^{+0.056} & 0.740_{-0.048}^{+0.012} \end{pmatrix}$$

## PMNS matrix for 3 + 1 model

$$U_{PMNS}^{(3+1)} = \begin{pmatrix} 0.782_{-0.016}^{+0.017} & 0.524_{-0.016}^{+0.017} & 0.148_{-0.004}^{+0.004} & 0.301_{-0.035}^{+0.035} \\ 0.484_{-0.034}^{+0.028} & 0.473_{-0.036}^{+0.027} & 0.732_{-0.025}^{+0.016} & 0.074_{-0.021}^{+0.021} \\ 0.280 \div 0.330 & 0.678 \div 0.705 & 0.622 \div 0.657 & 0 \div 0.194 \\ 0.210 \div 0.273 & 0.060 \div 0.203 & 0.104 \div 0.236 & 0.931 \div 0.951 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} m_1 &= (0.05 \pm 0.05) \text{ eV} \\ m_2 &= (0.05 \pm 0.05) \text{ eV} \\ m_3 &= (0.05 \pm 0.05) \text{ eV} \\ m_4 &= (2.70 \pm 0.22) \text{ eV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\nu_e}^{\text{eff}} &= (0.82 \pm 0.16) \text{ eV} \\ m_{\nu_\mu}^{\text{eff}} &= (0.21 \pm 0.08) \text{ eV} \\ m_{\nu_\tau}^{\text{eff}} &= (0.05 \div 0.53) \text{ eV} \\ m_{\nu_s}^{\text{eff}} &= (2.51 \pm 2.57) \text{ eV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (m_{\nu_e}^{\text{eff}})^2 &= (0.66 \pm 0.26) \text{ eV}^2 \\ (m_{\nu_\mu}^{\text{eff}})^2 &= (0.04 \pm 0.03) \text{ eV}^2 \\ (m_{\nu_\tau}^{\text{eff}})^2 &= (0.0025 \div 0.28) \text{ eV}^2 \\ (m_{\nu_s}^{\text{eff}})^2 &= (6.33 \div 6.60) \text{ eV}^2 \end{aligned}$$

**Предсказание эффективной массы электронного нейтрино из эксперимента Нейтрино-4 и сравнение с экспериментами по измерению массы нейтрино: KATRIN и GERDA**

$$m_{4\nu_e}^{eff} = \sqrt{\sum m_i^2 |U_{ei}|^2}; \quad \sin^2 2\theta_{14} \approx 4|U_{14}|^2; \quad \sum m_\nu = m_1 + m_2 + m_3 \approx 0.54 \div 0.11 \text{eV}$$

$$\Delta m_{14}^2 \approx m_4^2 \approx 7.3 \text{eV}^2, \quad m_1^2, m_2^2, m_3^2 \ll m_4^2$$

$$m_4 = (2.70 \pm 0.22) \text{eV}$$

$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.35 \pm 0.07 (4.9\sigma)$$

$$m_{4\nu_e}^{eff} \approx \sqrt{m_4^2 |U_{e4}|^2} \approx \frac{1}{2} \sqrt{m_4^2 \sin^2 2\theta_{14}}$$

$$m_{4\nu_e}^{eff} = (0.82 \pm 0.18) \text{eV}$$

$$m_{4\nu_e}^2 = 0.68 \pm 0.29$$

В экспериментах по двойному  $\beta$ -распаду масса майораны определяется соотношением:

$$m(0\nu\beta\beta) = \left| \sum U_{ei}^2 m_i \right| \quad m(0\nu\beta\beta) \approx m_4 U_{14}^2 \quad m(0\nu\beta\beta) = (0.25 \pm 0.09) \text{eV}$$



# СРАВНЕНИЕ ПРОГНОЗА МАССЫ НЕЙТРИНО-4 С ИЗМЕРЕНИЕМ МАССЫ НЕЙТРИНО

	Neutrino-4	KATRIN
$m_{\nu_e}^{eff} = \sqrt{\sum m_i^2  U_{ei} ^2}$ $\Delta m_{14}^2 \approx m_4^2$ <p>Effective mass and mass squared: <math>m_{\nu_e}^{eff}</math>, <math>m_\nu^2</math></p>	$m_{4\nu_e}^{eff} = 0.82 \pm 0.18$ <div style="border: 1px solid black; background-color: #f0e68c; padding: 5px; margin: 5px 0;"> <math display="block">(m_{4\nu_e}^{eff})^2 = 0.68 \pm 0.29</math> </div> $m_1^2, m_2^2, m_3^2 \ll m_4^2$	$m_{3\nu_e}^{eff} < 0.8 \text{ eV (90\%)}$ $m_{3\nu_e}^{eff\ 2} = 0.26 \pm 0.34$ $m_{4\nu_e}^{eff\ 2} = ?$

Параметры четвертого нейтрино, полученные в эксперименте «Нейтрино-4»  $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.35 \pm 0.07(4.9\sigma)$  и  $m_4^2 \approx 7.3 \text{ eV}^2$ , должны быть использованы в качестве таких дополнительных параметров. Мы думаем, что коллаборация KATRIN представит такой анализ в одной из своих будущих публикаций для получения оценки  $m_{1,2,3}^2$

# KATRIN

$$m_{3\nu_e}^{\text{eff}} < 0.8 \text{ eV (90\%)}$$

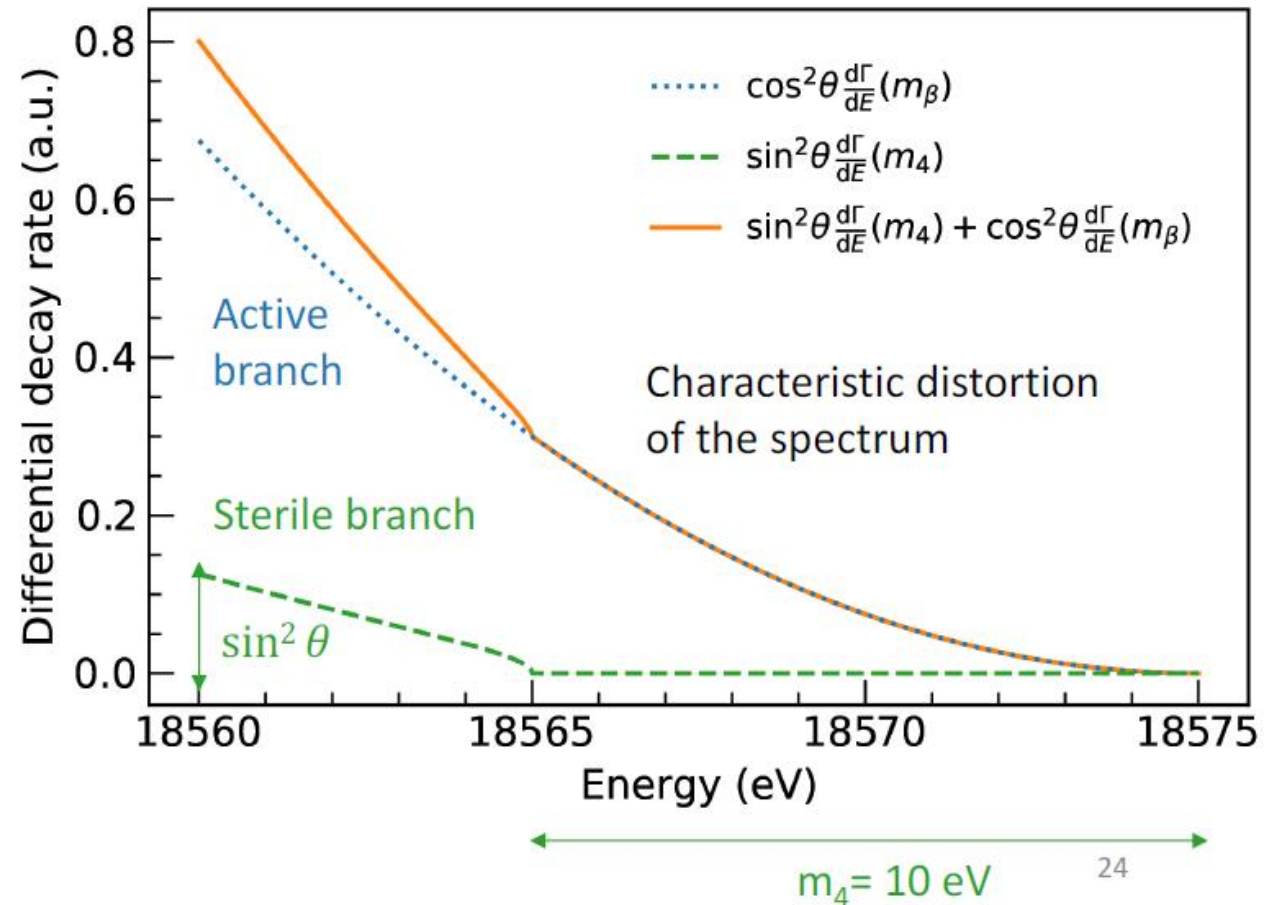
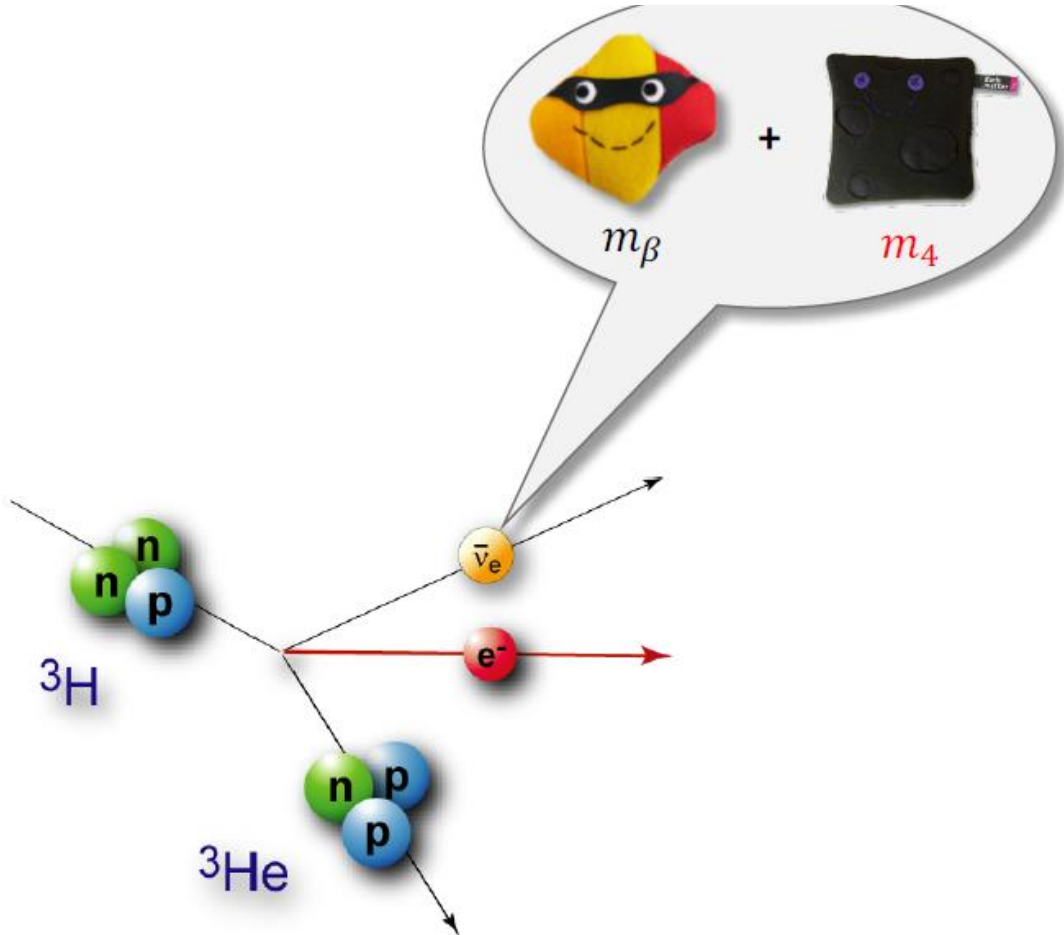
$$(m_{3\nu_e}^{\text{eff}})^2 = 0.26 \pm 0.34$$

$$m_{4\nu_e}^{\text{eff}2} = ?$$

$$m_{4\nu_e}^{\text{eff}} = (0.82 \pm 0.18) \text{ eV}$$

*Neutrino4*

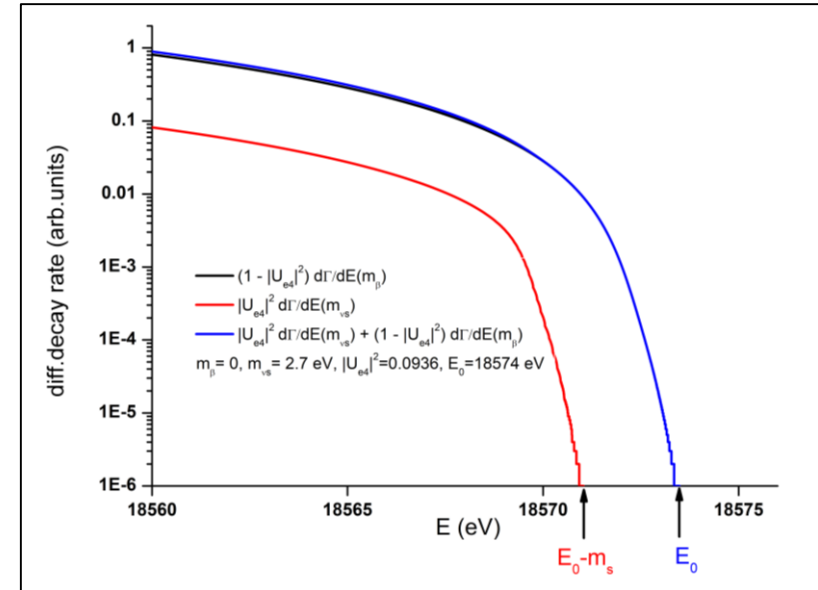
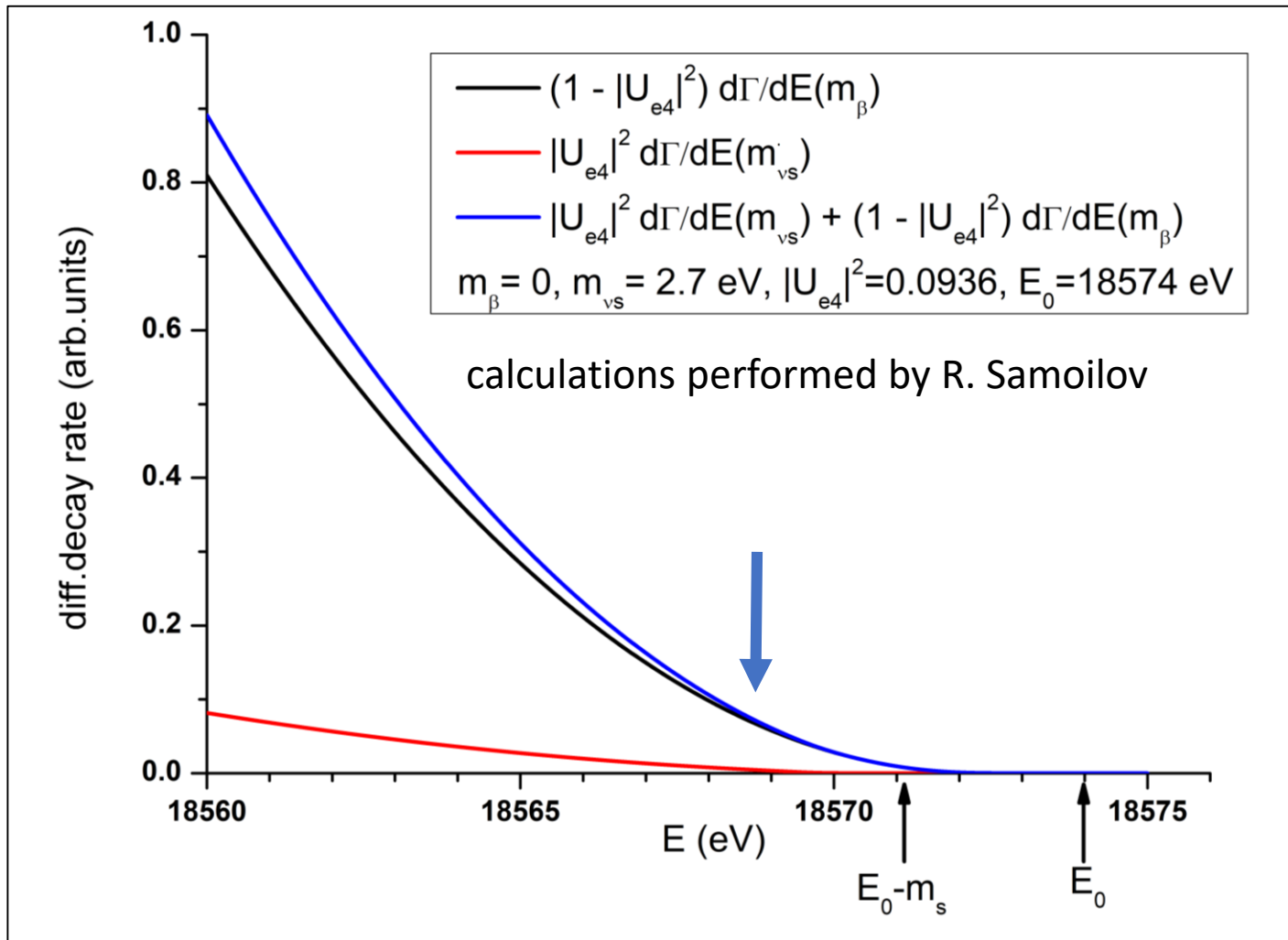
$$(m_{4\nu_e}^{\text{eff}})^2 = 0.68 \pm 0.29$$



Что должна видеть *KATRIN* с учетом стерильного нейтрино с параметрами:

$$m_4 = (2.70 \pm 0.22) \text{ eV}$$

$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.35 \pm 0.07 (4.9\sigma)$$



## Сравнение с ограничениями на массу нейтрино из экспериментов по поиску двойного бета-распада без нейтрино

Это выражение для модели  $3 + 1$  и с предположением  $m_1, m_2, m_3 \ll m_4$  можно упростить:


$$m_{ee} = \left| \sum_i m_i U_{ei}^2 \right| = \begin{cases} \left| m_0 c_{12}^2 c_{13}^2 + \sqrt{\Delta m_{21}^2 + m_0^2 s_{12}^2 c_{13}^2} e^{2i(\eta_2 - \eta_1)} + \sqrt{\Delta m_{32}^2 + \Delta m_{21}^2 + m_0^2 s_{13}^2} e^{-2i(\delta_{CP} + \eta_1)} \right| & \text{in NO,} \\ \left| m_0 s_{13}^2 + \sqrt{m_0^2 - \Delta m_{32}^2} s_{12}^2 c_{13}^2 e^{2i(\eta_2 + \delta_{CP})} + \sqrt{m_0^2 - \Delta m_{32}^2 - \Delta m_{21}^2} c_{12}^2 c_{13}^2 e^{2i(\eta_1 + \delta_{CP})} \right| & \text{in IO,} \end{cases}$$

**our estimation**

Численный результат в показан ниже.

**experiments**

$$m(0\nu\beta\beta) = (0.25 \pm 0.09) \text{ eV}$$

$$m(0\nu\beta\beta) \approx m_4 U_{14}^2$$


$$m(0\nu\beta\beta) < [0.080 - 0.182] \text{ eV}$$

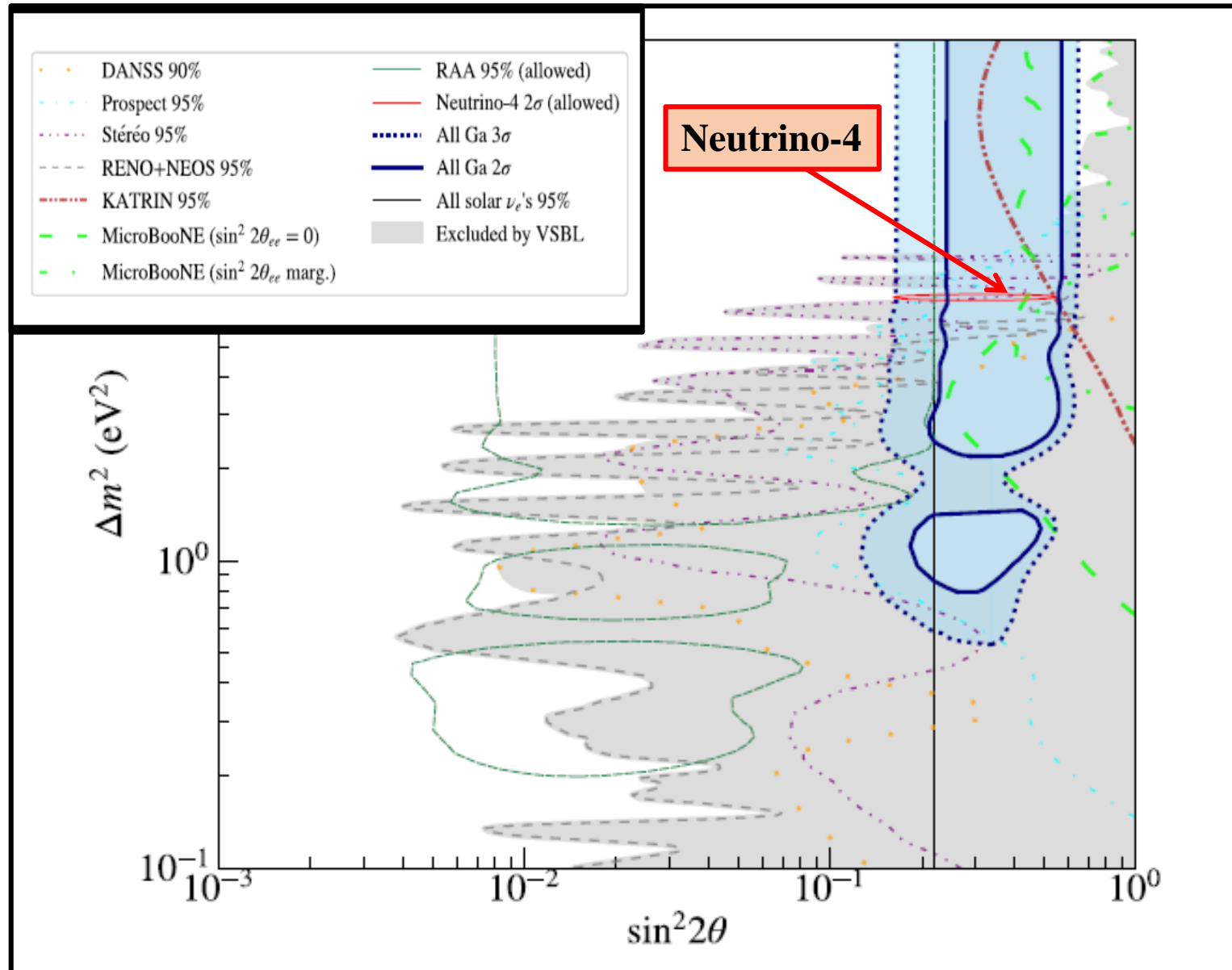
$m < 0.036 \div 0.156 \text{ eV}$  KamLAND-Zen

Наилучшие ограничения на массу Майораны были получены в эксперименте GERDA.

Значение, полученное с параметрами осцилляций Нейтрино-4, составляет  $m(0\nu\beta\beta) = (0.25 \pm 0.09) \text{ eV}$ , что **в 3 раза (или 6 раз)** превышает предел, заявленный экспериментом GERDA (KamLAND-Zen).

Это существенное несоответствие, но делать достоверные выводы пока рано. **Если в будущем предел майорановской массы эксперимента по двойному бета-распаду будет понижен и результат эксперимента Нейтрино-4 подтвердится, это закроет гипотезу о том, что нейтрино является частицей майорановского типа.**

# Search for electron-neutrino transitions to sterile states in the BEST experiment



PHYSICAL REVIEW C **105**,  
065502 (2022)

$$\Delta m^2 = 3.3_{-2.3}^{+\infty} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta = 0.42_{-0.17}^{+0.15}$$

FIG. 13. Exclusion contours of all gallium anomaly experiments: two GALLEX, two SAGE, and two BEST results. The blue solid line and the blue tightly dotted line with the blue shadings show the  $2\sigma$  and  $3\sigma$  confidence level, respectively. The figure also presents the exclusion contours from Prospect [62], DANSS [63], Stéréo [64], KATRIN [65], the combined analysis of RENO and NEOS data [66], reactor antineutrino anomalies (RAA) [22], interpretations of the MicroBooNE result for the oscillation hypothesis with fixed mixing angle ( $\sin^2 2\theta$ ) and profiled over the angle [30], and the model-independent 95% upper bound on  $\sin^2 2\theta$  from all solar neutrino experiments [67]. The  $2\sigma$  allowed region of Neutrino-4 [68] is also presented and the gray shading represents the merged exclusion of the very short baseline (VSBL) null results.

# **Космология**

# Космология - роль стерильных нейтрино во время формирования Вселенной.

Введение в теорию ранней Вселенной  
Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков

$$\Omega_{\nu_s} \simeq 0.2 \cdot \left( \frac{\sin 2\theta_\alpha}{10^{-4}} \right)^2 \cdot \left( \frac{m_\nu}{1 \text{keV}} \right)^2$$

$$\Omega_{\nu_s} = 48$$

На этом основании возникло утверждение, что стерильное нейтрино с параметрами

$$\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ eV}^2, \sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \text{ противоречит Космологии.}$$

Однако, формула была получена без учёта стока стерильных нейтрино.

## Генерация и сток стерильных нейтрино

Sterile neutrino and dark matter [arXiv:2203.09401](https://arxiv.org/abs/2203.09401)

$$\frac{dn_{\nu_s}}{dt} + 3Hn_{\nu_s} = \frac{1}{2} \left( \frac{\sin^2 2\theta_{m 14} n_{\nu_e}}{\tau_{\nu_e}} + \frac{\sin^2 2\theta_{m 24} n_{\nu_\mu}}{\tau_{\nu_\mu}} + \frac{\sin^2 2\theta_{m 34} n_{\nu_\tau}}{\tau_{\nu_\tau}} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{\sin^2 2\theta_{m 14}}{\tau_{\nu_e}} + \frac{\sin^2 2\theta_{m 24}}{\tau_{\nu_\mu}} + \frac{\sin^2 2\theta_{m 34}}{\tau_{\nu_\tau}} \right) n_{\nu_s}$$

Генерация

Сток

$$\frac{1}{\tau_{\nu_e}} = \Gamma_{\nu_e} = \frac{137\pi}{9 \cdot 24} G_f^2 T^4 E$$

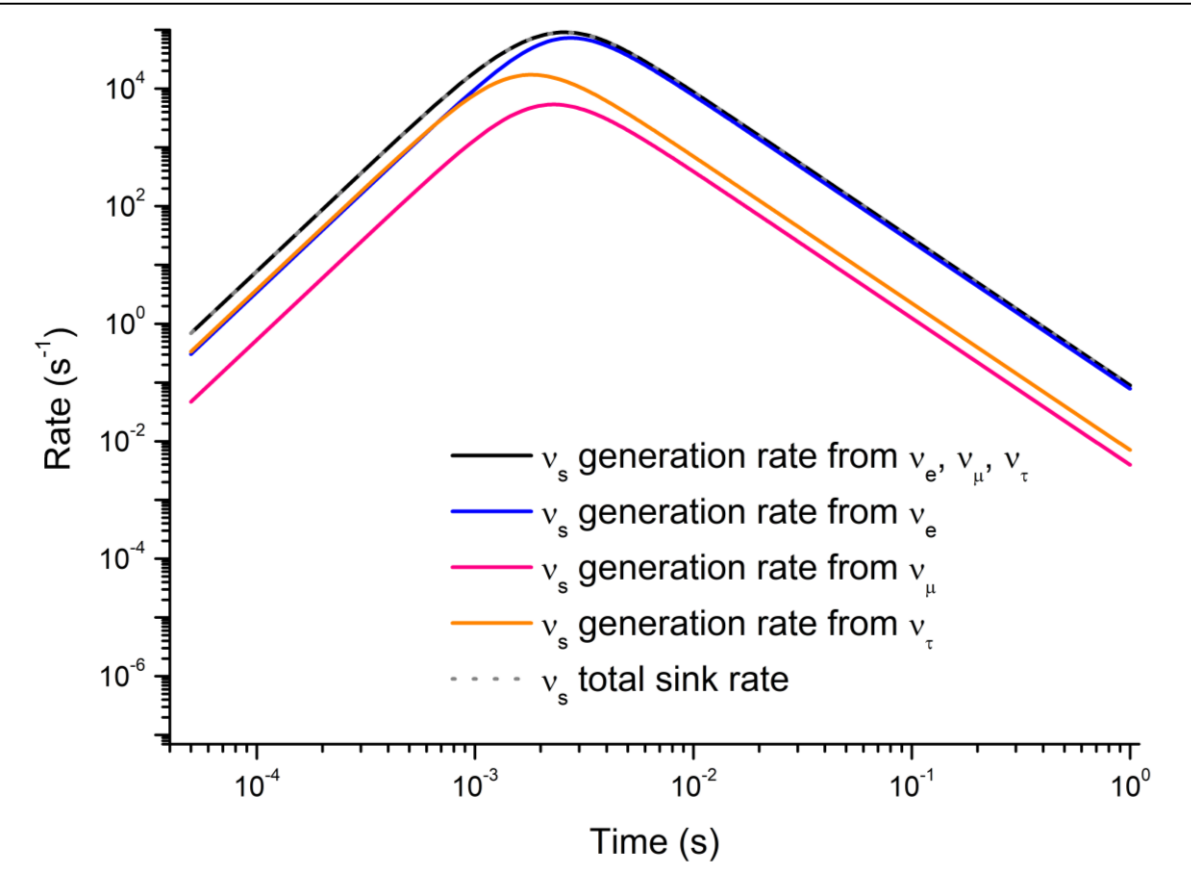
$$\frac{1}{\tau_{\nu_e}} = f_{\nu_e}(t) \sim t^{-\frac{5}{2}}$$

$$T[\text{eV}] \sim \frac{887734}{\sqrt{t[\text{s}]}} \quad E = 3.15T$$

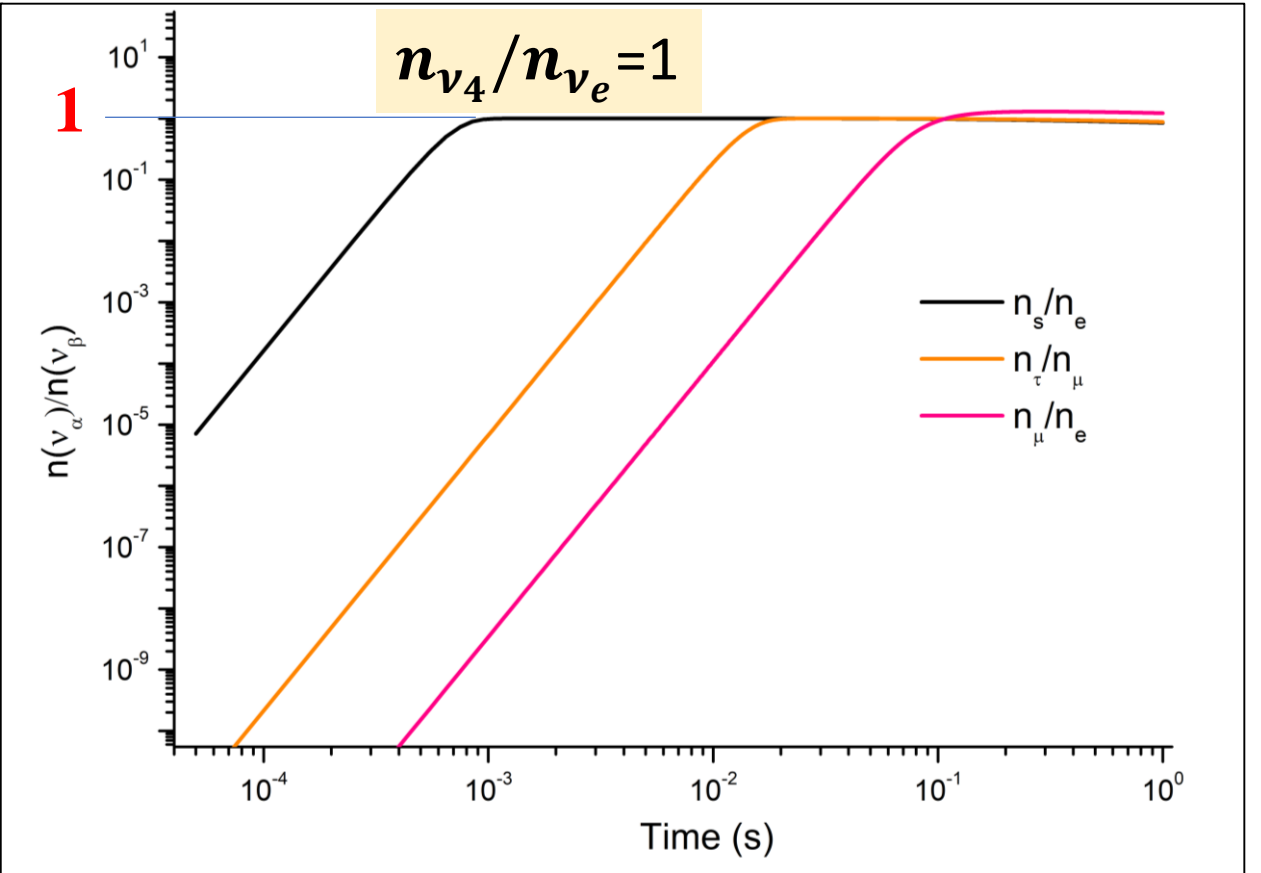
$$\frac{1}{\tau_{\nu_\mu}} = \frac{1}{\tau_{\nu_\tau}} = \Gamma_{\nu_\mu} = \frac{7\pi}{24} G_f^2 T^4 E$$

$$\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ eV}^2, \sin^2 2\theta_{14} = 0.33$$

## Генерация и сток стерильных нейтрино



## Относительные плотности нейтрино



**Генерация и сток стерильных нейтрино равны друг другу. Эффекта накачки нет.**

**Плотности различных типов нейтрино совпадают.**

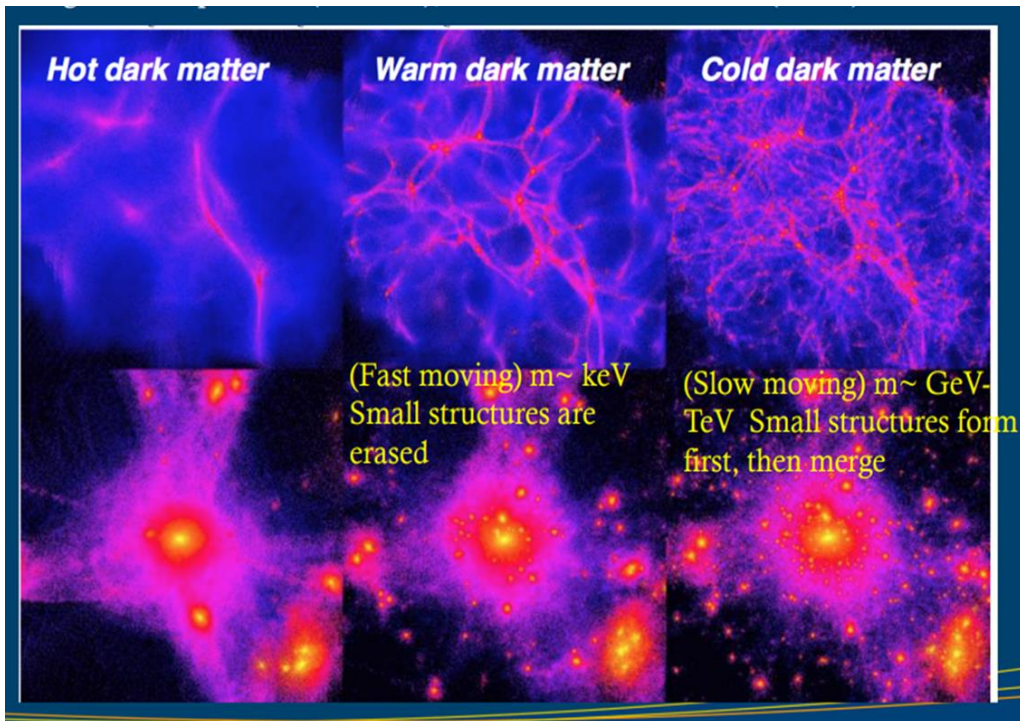


# Вклад стерильного нейтрино в плотность энергии Вселенной

$$\Omega_{\nu_4} \approx (\sum m_{\nu_i} / 1eV) 0.01 h^{-2} \cdot n_{\nu_4} m_{\nu_4} / \sum (n_{\nu_i} m_{\nu_i})$$

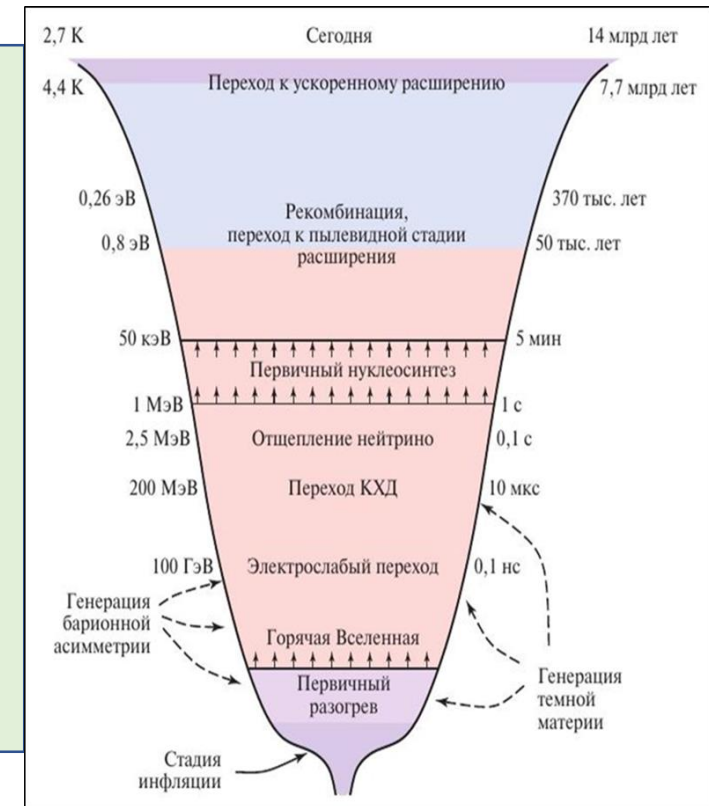
$$n_{\nu_i} = n_{\nu_e}, \quad \sum (n_{\nu_i} m_{\nu_i}) = n_{\nu_e} \sum m_{\nu_i}$$

$$\Omega_{\nu_4} \approx (2.7 eV / 1eV) \cdot 0.01 h^{-2} \cdot n_{\nu_4} / n_{\nu_e} = 5\% \quad n_{\nu_4} / n_{\nu_e} = 1$$

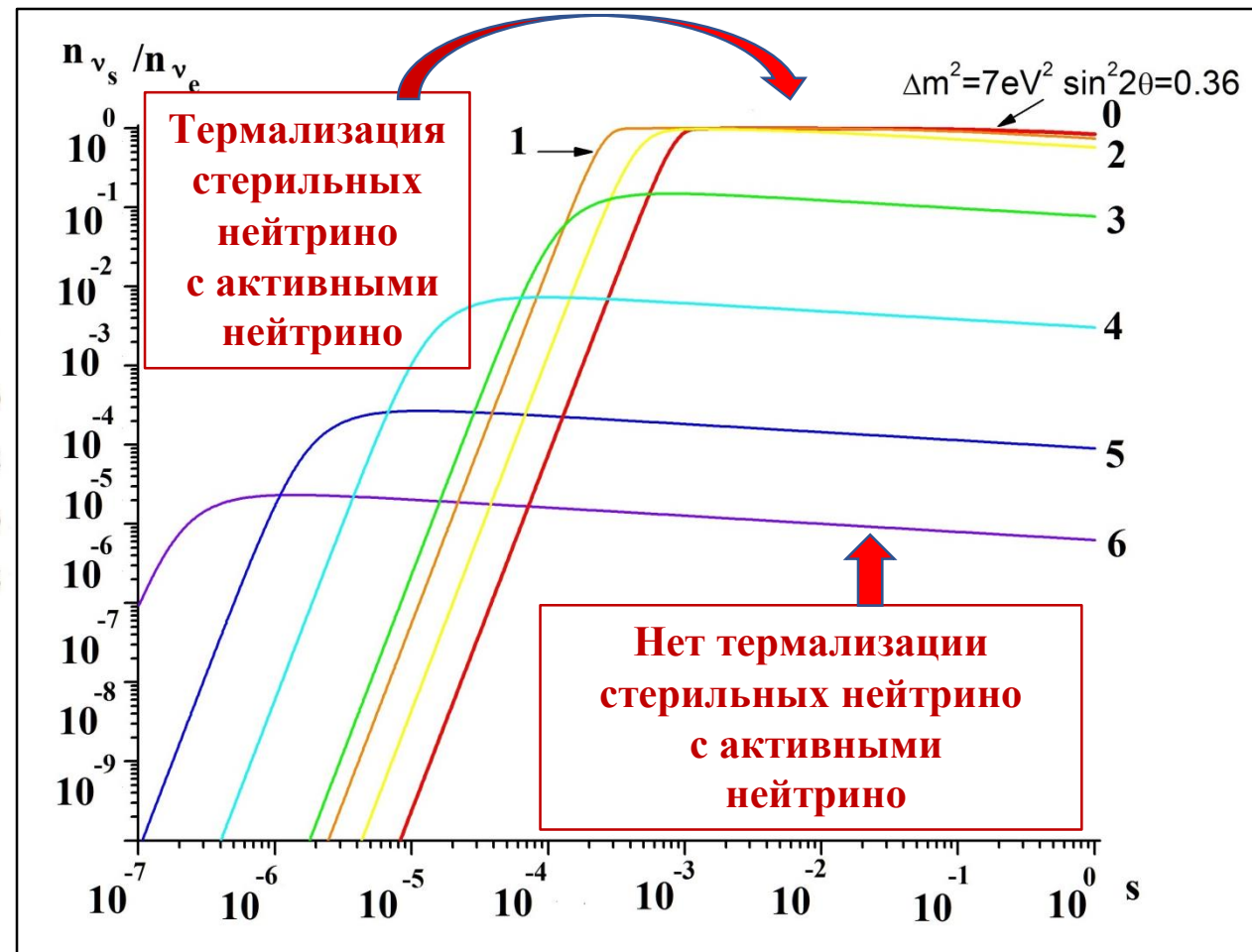
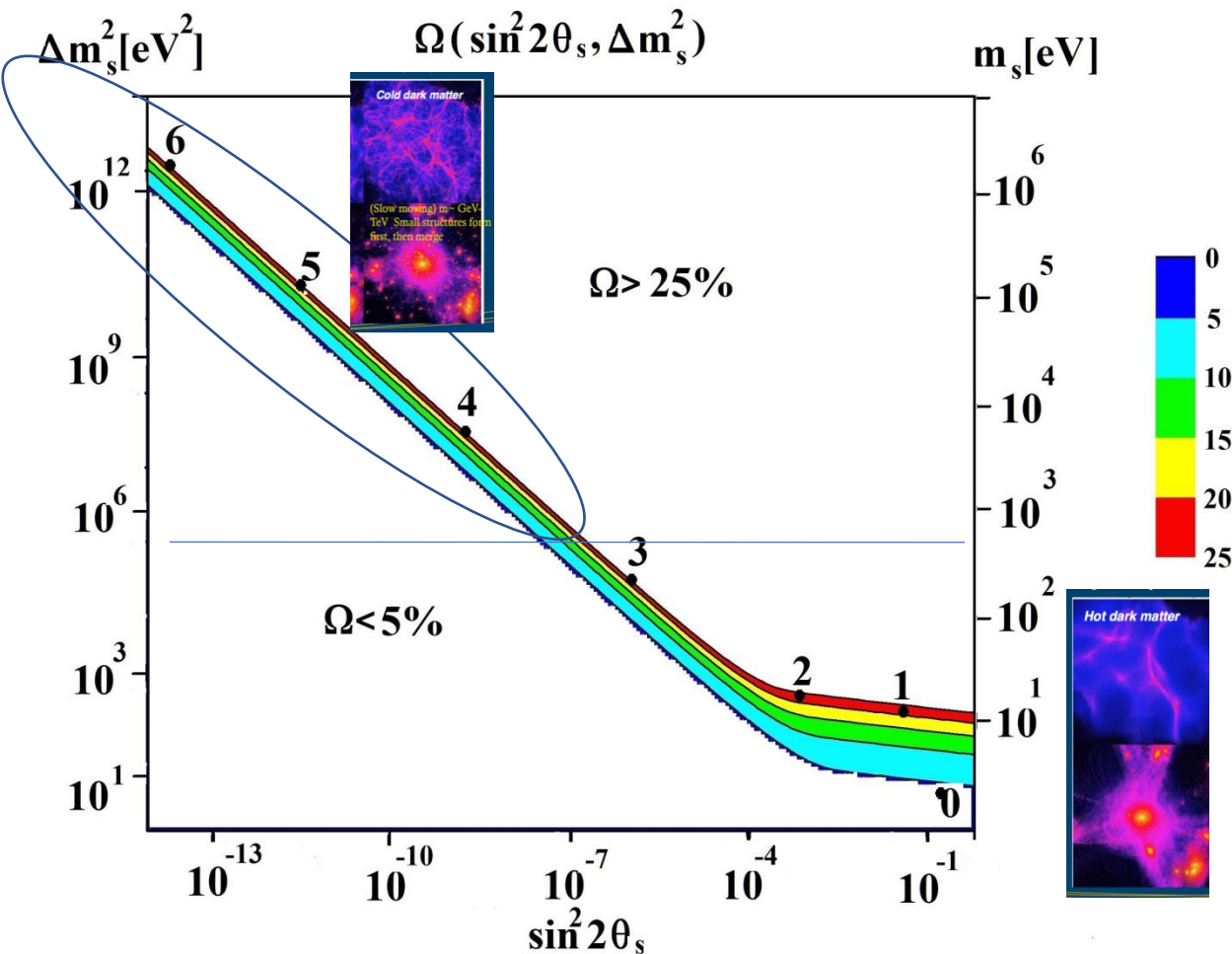


**стерильное нейтрино с параметрами**  
 $\Delta m_{14}^2 = 7.3 eV^2, \sin^2 2\theta_{14} = 0.33$   
**не противоречит космологии, но не объясняет структуру Вселенной.**

**Нужны тяжёлые стерильные нейтрино с очень малыми углами смешивания**



# Тяжёлые стерильные нейтрино с очень малыми углами смешивания



Тяжёлые стерильные нейтрино с очень малыми углами смешивания могут рассматриваться, как холодная тёмная материя и объяснить структуру Вселенной ??

# Заключение по космологии

1. Стерильное нейтрино с параметрами

$$\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ eV}^2, \sin^2 2\theta_{14} = 0.33$$

не противоречит космологии, но не объясняет структуру Вселенной.  
Вклад в тёмную материю составляет приблизительно 5%.

2. Для объяснения структуры Вселенной нужны тяжёлые стерильные нейтрино с очень малыми углами смешивания.

3. Расширение нейтринной модели введением ещё двух тяжёлых стерильных нейтрино позволит объяснить структуру Вселенной и довести вклад стерильных нейтрино в тёмную материю Вселенной до уровня 27%.

# Перспективы эксперимента

**Ожидается улучшение статистической точности  
эксперимента **Нейтрино4+** в 3 раза и  
достижение уровня достоверности **5 сигма****

Метод	Последствие	Коэффициент увеличения точности
4 детектора	В 3 раза больший объем	<b>1.6</b>
Gd concentration	В 4 раза меньше случайных совпадений	<b>1.5</b>
PSD	В 4 раза меньше коррелированного фона	<b>1.3</b>
Общий коэффициент увеличения точности		<b>3.1</b>

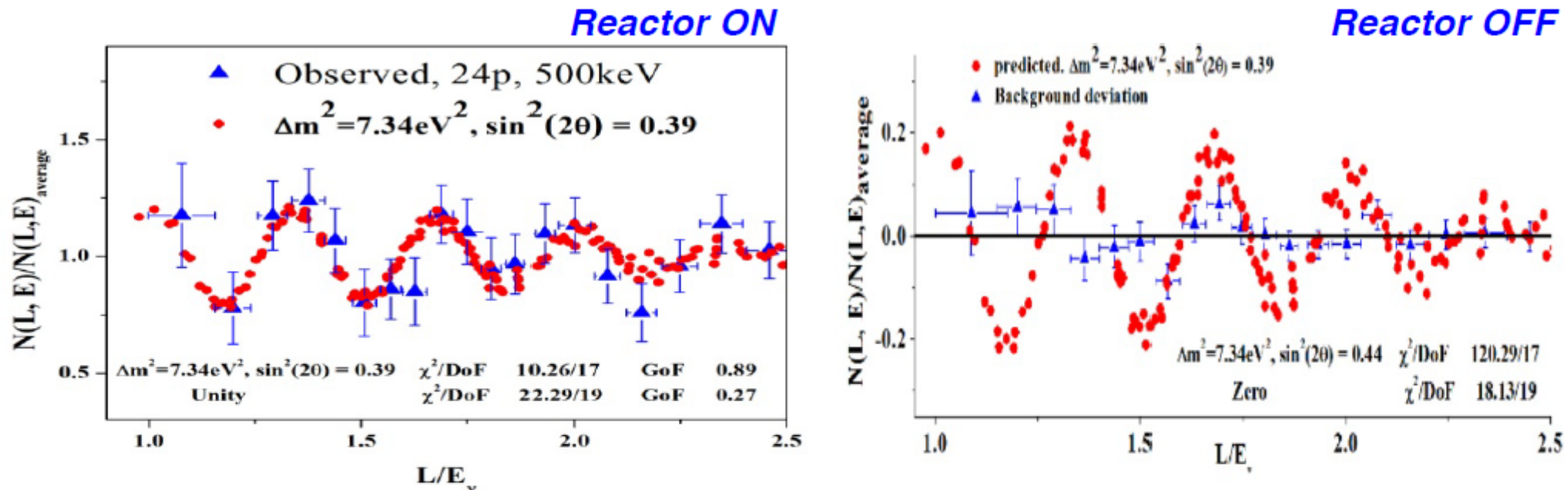
Доклад Карло Руббиа  
про проект проверки результата эксперимента Нейтрино-4

# Experimental searches of neutrino anomalies.

*Feb. 18<sup>th</sup>, 14:40 - 15:10*

*(Venice NeuTel 2021)*

# NEUTRINO-4 reactor signal



- Data has been collected for 3 years until June 2019, followed by background measurements until January 2020: 720 days reactor "on" and 417 days reactor "off", with 87 reactor cycles.
- The difference ON-OFF is 223 events per day in the range from 6.5 to 9 meters. The signal/background ratio is 0.54.
- The obtained value of the difference between the masses of the electron and sterile neutrinos is  $\Delta m_{14}^2 = 7.26 \pm 0.13 \text{ stat} \pm 1.08 \text{ syst} \Rightarrow 7.25 \pm 1.09 \text{ eV}^2$  and the angle  $\theta_{14}$  parameter  $\sin^2(2\theta_{14}) = 0.26 \pm 0.08 \text{ stat} \pm 0.05 \text{ syst} \Rightarrow 0.26 \pm 0.09$ . Lower probability satellite peaks are also observed at other masses.

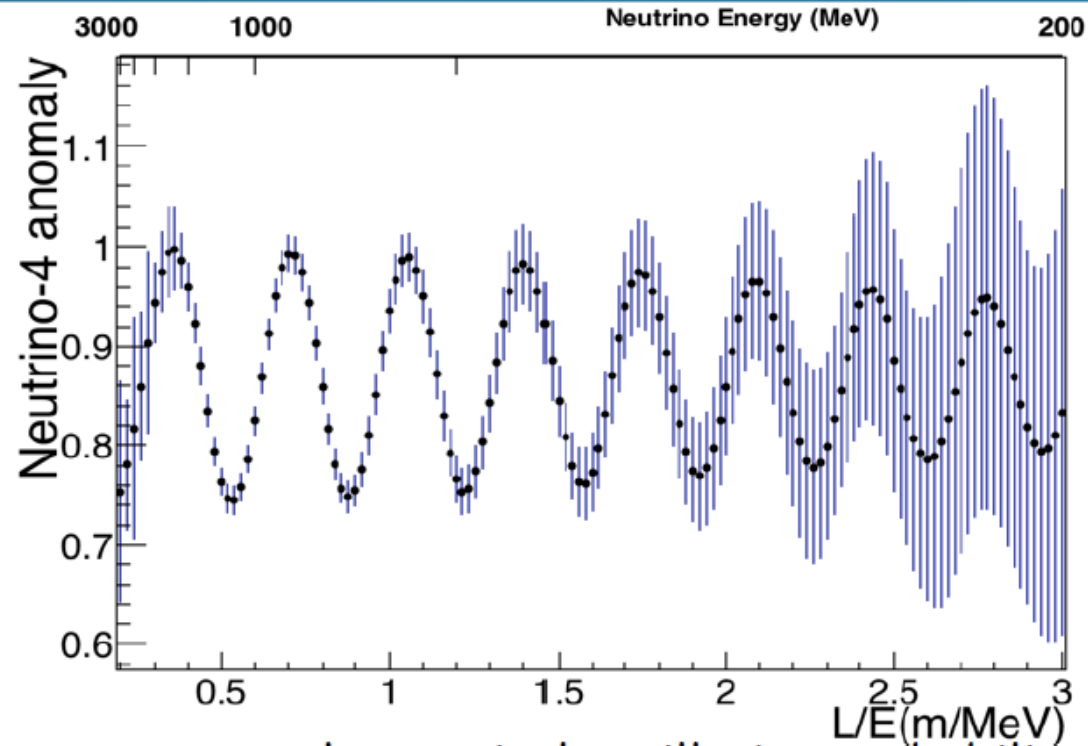
# Neutrino layouts at Fermilab



*ICARUS T600 will collect also ~3 GeV  $\nu_e$  NuMI Off-Axis:)*



# 1.- Booster beam



- The figure represents the survival oscillation probability in the presence of the Neutrino-4 anomaly.
- The calculation has been performed considering a 3 years long run ( $\sim 117k$   $\nu_{\mu}CC$  QE contained events) for steps of  $\Delta(L/E) = 0.02$  and considering the best fit of NEUTRINO-4 parameters  $\Delta m_{N4}^2 = 7.25 \text{ eV}^2$  and  $\sin^2 2\theta_{N4} = 0.26$  (only statistical errors are reported)

Venice NeuTel 2021

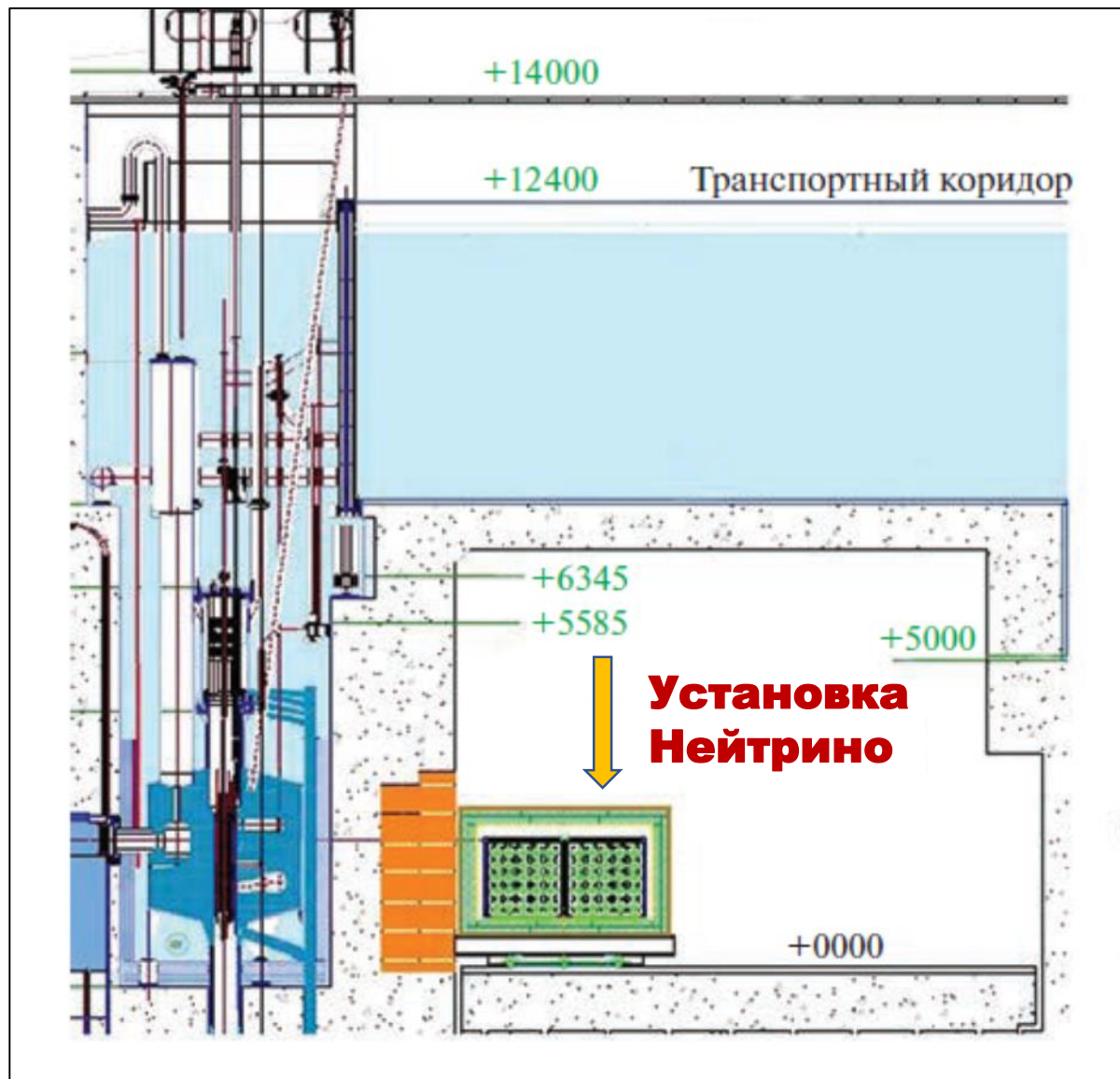
Slide: 18

# Перспективы нашего эксперимента Нейтрино4

**В настоящее время в рамках приборной программы реактора ПИК завершается изготовление установки**  
**Нейтрино**

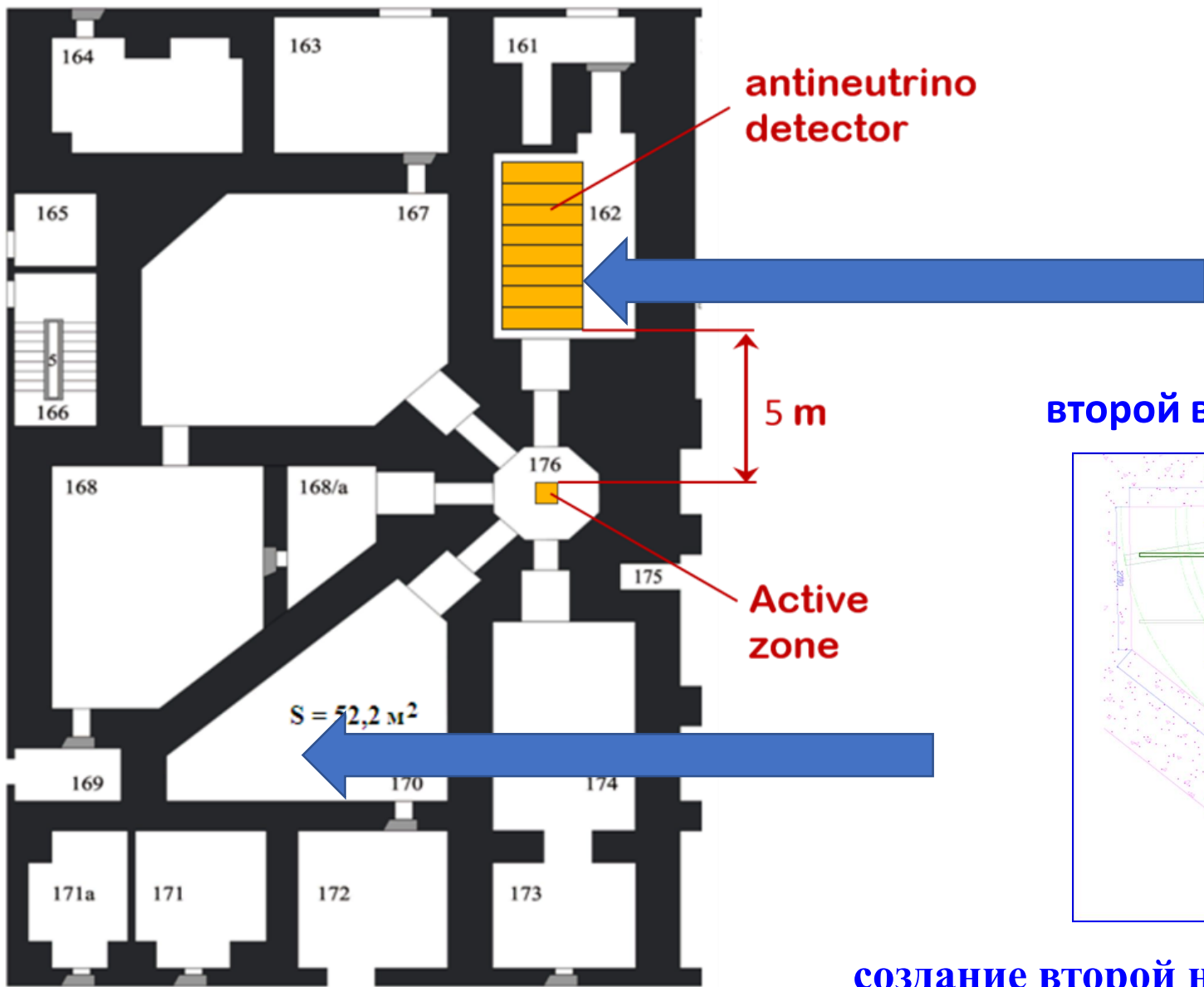
**и создание второй нейтринной лаборатория на реакторе**  
**СМ-3, где будут осуществляться испытания.**

# Установка Нейтрино на реакторе ПИК

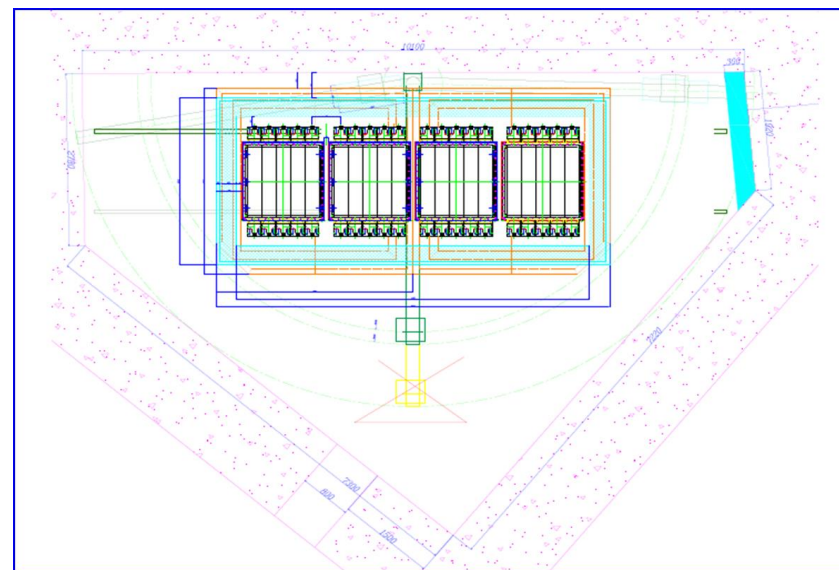


- Дизайн установки «НЕЙТРИНО» разработан.
- Выполнены нейтронные и прочностные расчеты.
- Установка «Нейтрино» будет состоять из:
- Детектора нейтрино
- Пассивной защиты
- Активной защиты
- Системы движения детектора
- Системы распределения высокого напряжения
- Системы сбора и обработки данных

Parameter	Value
Detector section size, cm	22x22
Energy resolution	10% for 1 MeV
Fast neutron background inside the detector shielding	less then $6 \cdot 10^{-5}$ $s^{-1}cm^{-2}$
Thermal neutron background inside the detector shielding	less then $4 \cdot 10^{-5}$ $s^{-1}cm^{-2}$
The ratio of the neutrino level signal to the correlated background	more then 1
The ratio of the neutrino level signal to the background of random coincidences	more then 0,6

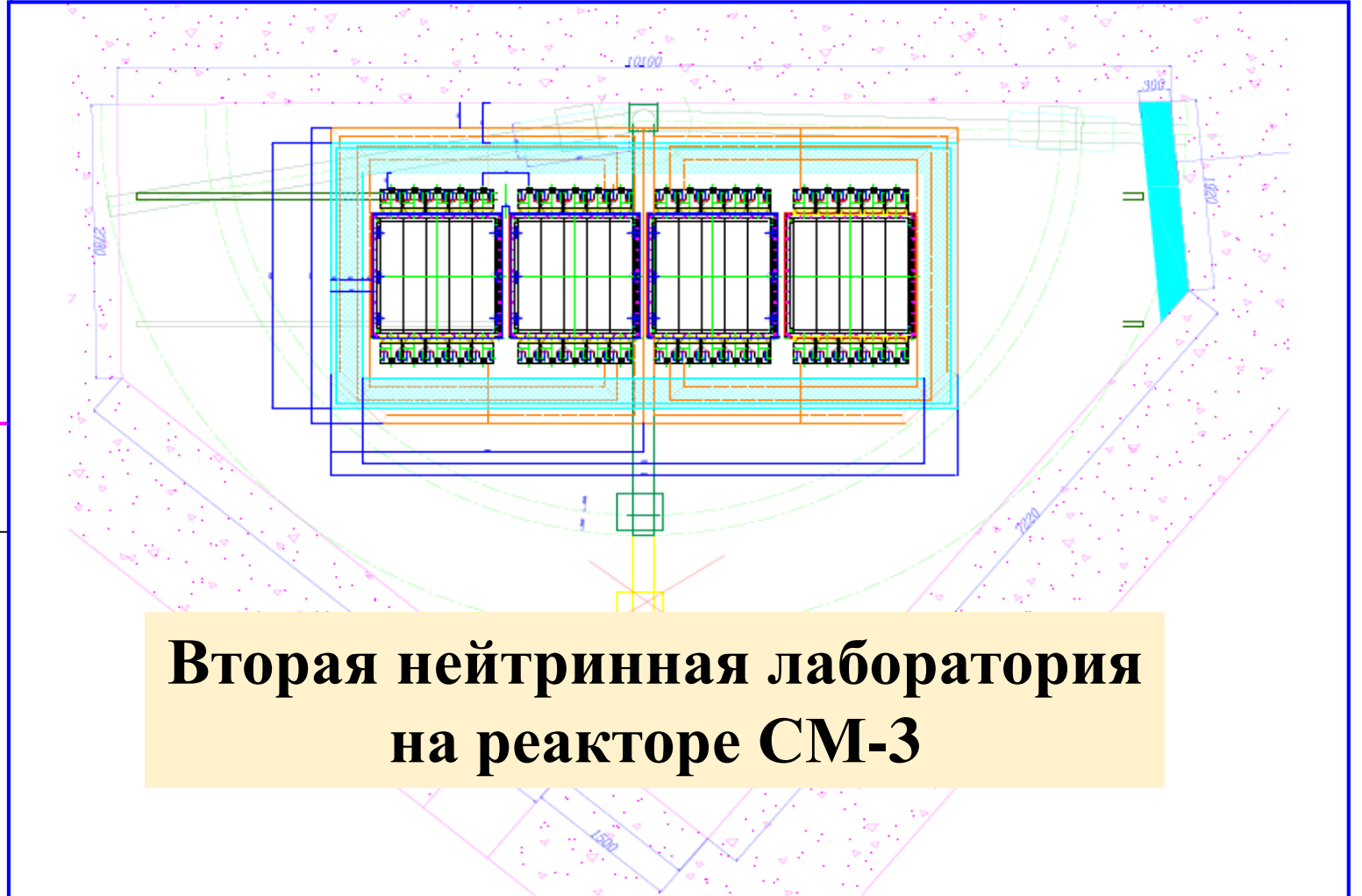
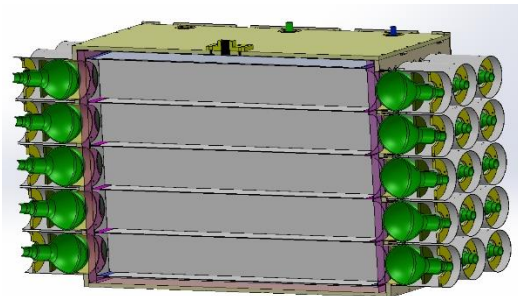
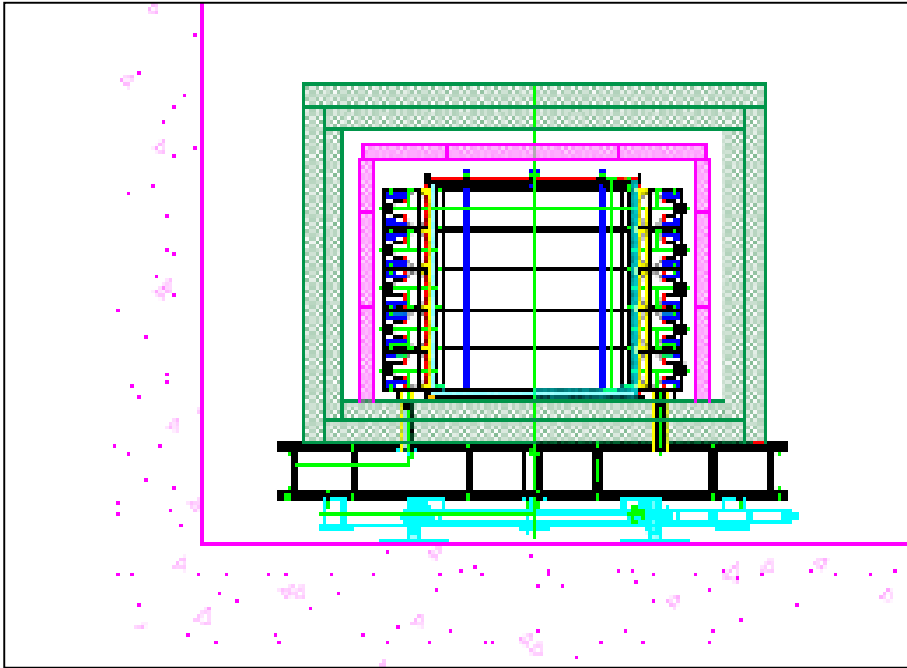


второй вариант установки Нейтрино-4



создание второй нейтринной лаборатория и новой установки

# Схема новой установки на реакторе СМ-3



**Вторая нейтринная лаборатория  
на реакторе СМ-3**

**Изготовление новой установки  
Нейтрино для реактора ПИК  
и испытания на реакторе СМ-3**

# Световоды



# Световоды



**4 модуля 100 секций**  
**200 ФЭУ**





Подвижная платформа



Аквариум для сцинтиллятора



10 тонн

140 штук

Активная и пассивная защита



ФЭУ



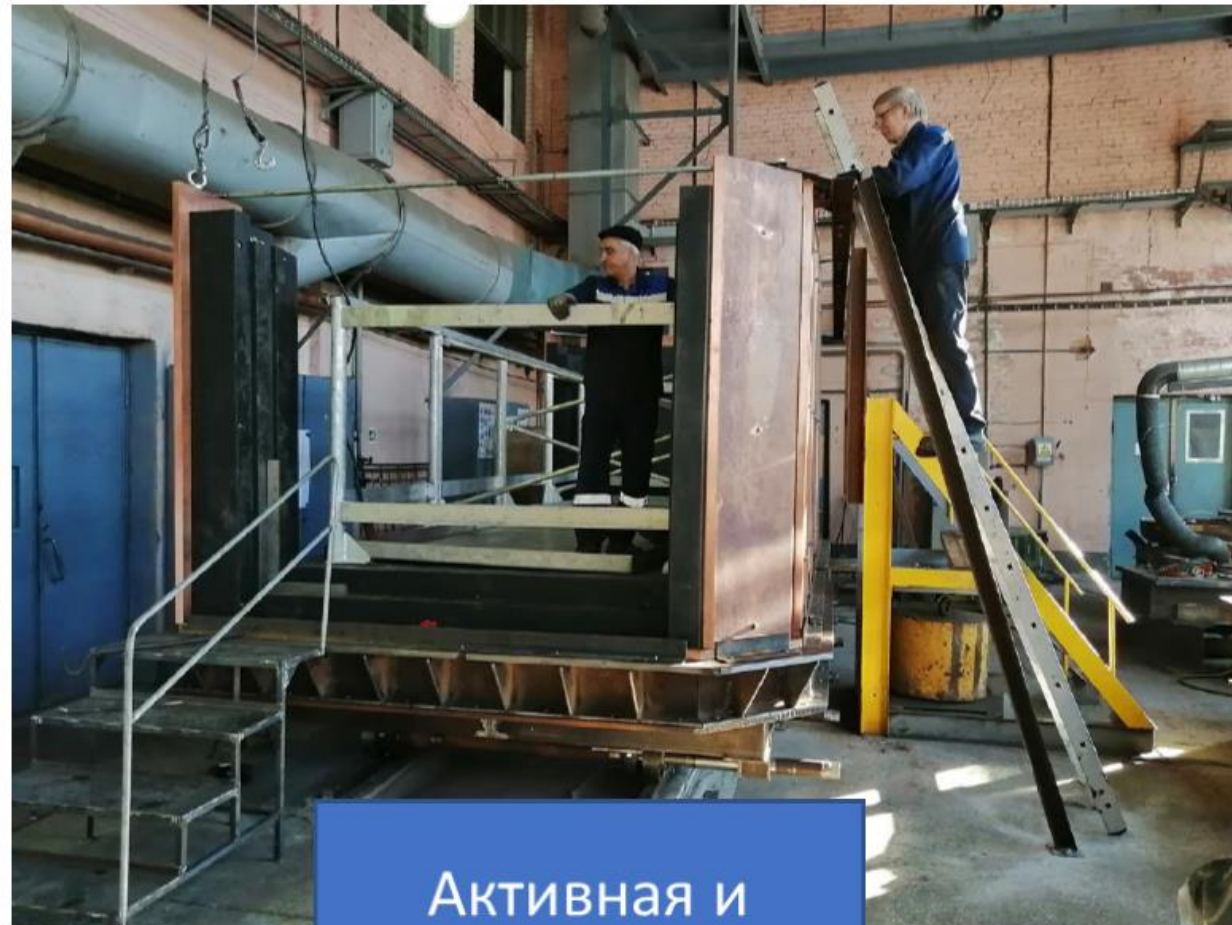
Световоды



## Завершение изготовления пассивной защиты



Подвижная платформа



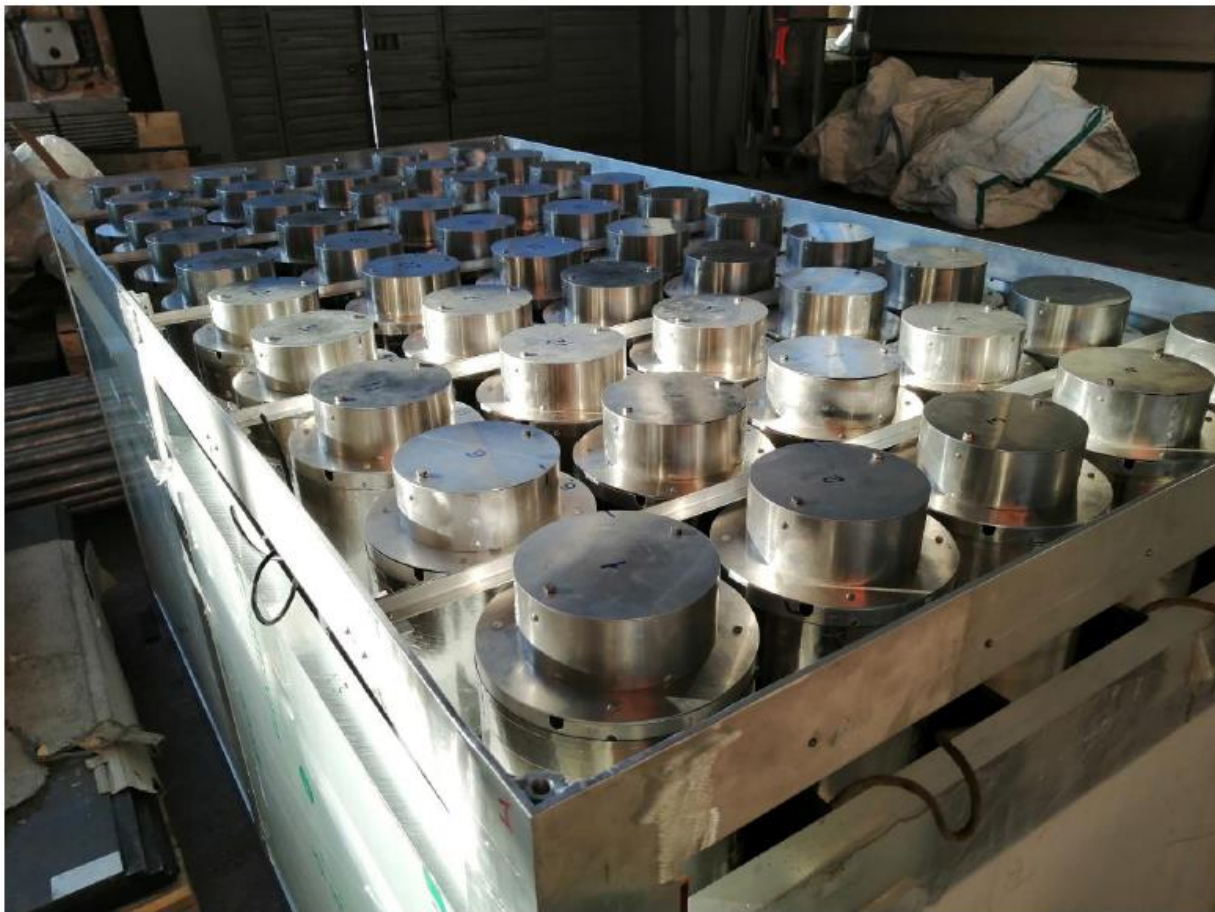
Активная и  
пассивная  
защита

## Завершение изготовления пассивной защиты



**Борированный полиэтилен, медь, итого 60 тонн**

# Завершение изготовления второго варианта первой установки



## Испытания второго варианта первой установки



**Ожидается улучшение статистической точности  
эксперимента Нейтрино4+ в 3 раза и  
достижение уровня достоверности 5 сигма**

Метод	Последствие	Коэффициент увеличения точности
4 детектора	В 3 раза больший объем	<b>1.6</b>
Gd concentration	В 4 раза меньше случайных совпадений	<b>1.5</b>
PSD	В 4 раза меньше коррелированного фона	<b>1.3</b>
Общий коэффициент увеличения точности		<b>3.1</b>

Что будет дальше?  
Покажет эксперимент!

**Спасибо за внимание!**

# приложение



# Начнем со случая двух нейтрино.

$$|v_e(t)\rangle = \exp(-iE_1 t)|v_e(0)\rangle = \exp(-iE_1 t) \cos \theta |v_1\rangle + \exp(-iE_2 t) \sin \theta |v_2\rangle,$$

$$\begin{pmatrix} |v_e\rangle \\ |v_s\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_m & \sin \theta_m \\ -\sin \theta_m & \cos \theta_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |v_1\rangle \\ |v_2\rangle \end{pmatrix}$$

$$P(v_e \leftrightarrow v_e) = |\langle v_e | v_e \rangle|^2 = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \left[ \frac{1}{2} (E_2 - E_1) t \right]$$

$$E_2 - E_1 = \left( \left( \frac{\Delta m^2 \cos(2\theta)}{2E} - V \right)^2 + \left( \frac{\Delta m^2 \sin(2\theta)}{2E} \right)^2 \right)^{1/2}$$

*в среде*

$$\sin^2 2\theta_m = \sin^2 2\theta \cdot \left( \left( \cos^2 2\theta - \frac{2 \cdot E \cdot V_e}{\Delta m^2} \right)^2 + \sin^2 2\theta \right)^{-1}$$

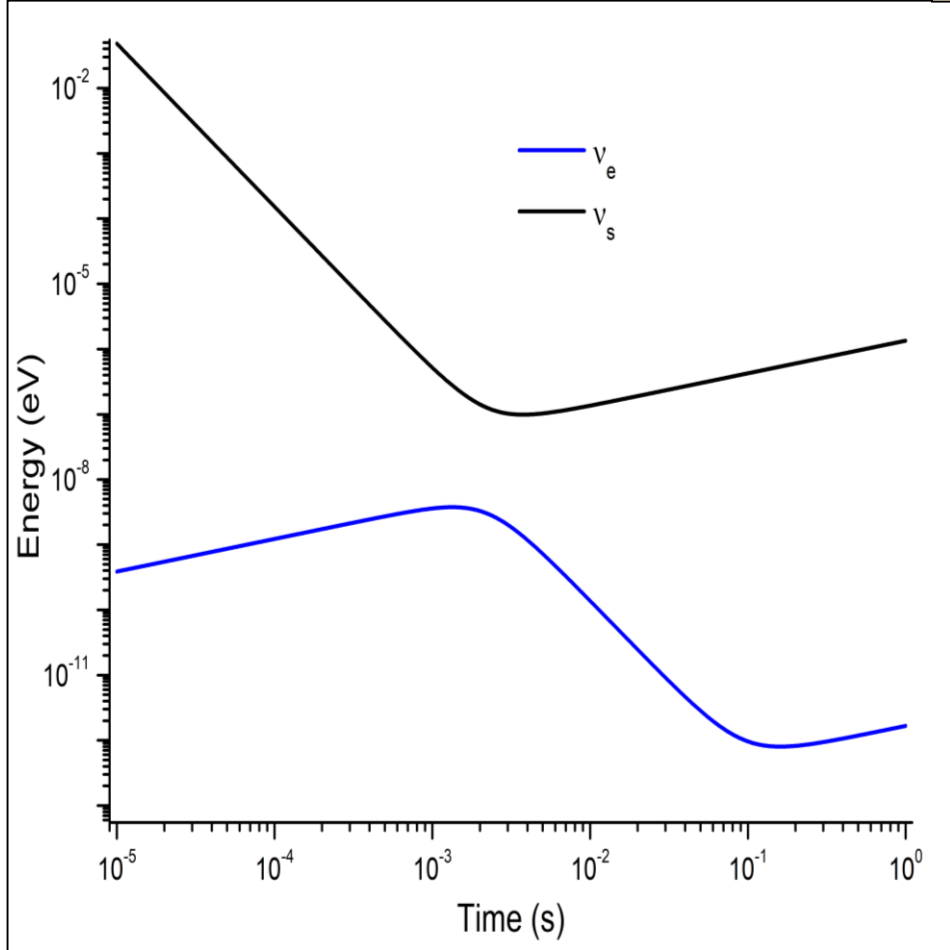
$$\frac{\Delta m^2 \cos(2\theta)}{2E} \gg V$$

$$E_2 - E_1 = \frac{m_2^2 - m_1^2}{2E_\nu} = \pm \frac{\Delta m^2}{2E_\nu},$$

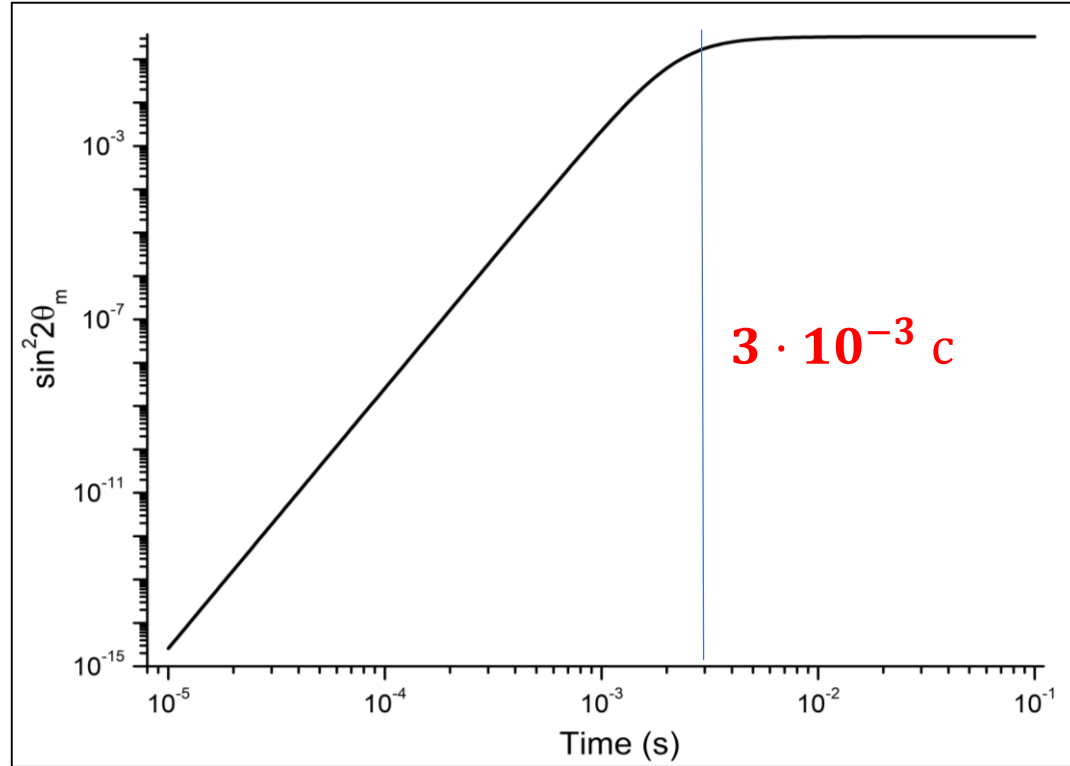
*в вакууме*

# Адиабатические уровни энергии в двух нейтринной системе

$$\sin^2 2\theta_m = \sin^2 2\theta \cdot \left( \left( \cos^2 2\theta - \frac{2 \cdot E \cdot V_e}{\Delta m^2} \right)^2 + \sin^2 2\theta \right)^{-1}$$



где  $\Delta m_{14}^2 = 7.3$ ,  
 $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33$ .



**Поведение амплитуды осцилляций электронного нейтрино в стерильное состояние в космической плазме в зависимости от времени.**

Для случая 4-х нейтрино мы учитываем следующие потенциалы из работ [14,15]:

$$V_e = -3.5 \times 25 \times G_f^2 \times T^4 \times E$$

$$V_\mu = -2 \times 25 \times G_f^2 \times T^4 \times E$$

$$V_\tau = -25 \times G_f^2 \times T^4 \times E$$

$$V_s = 0$$

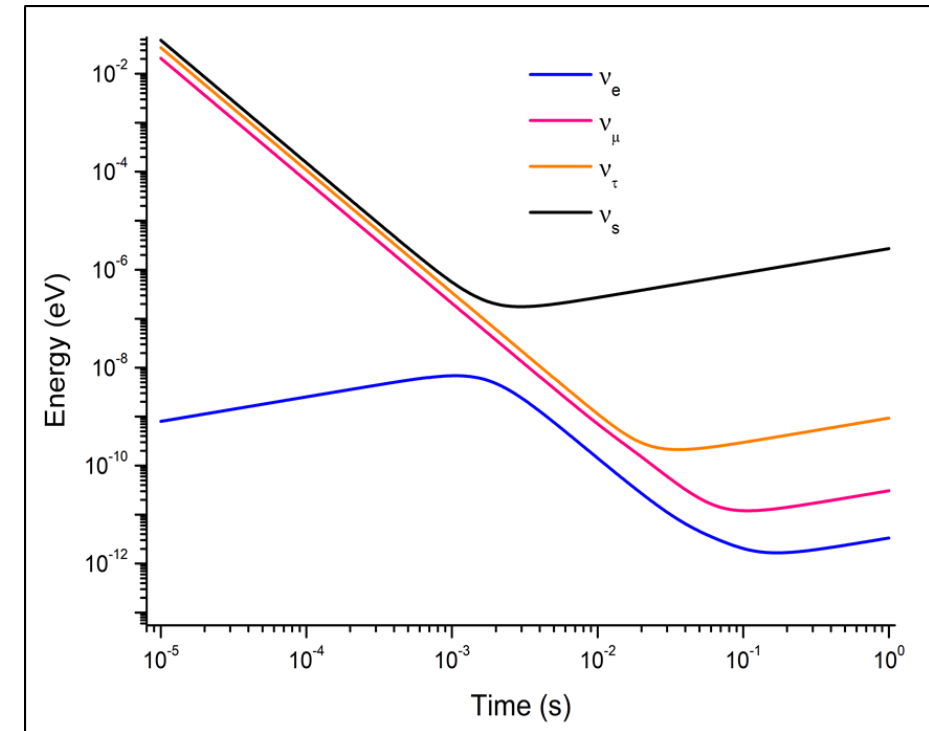
Подробнее в  
Приложение

Для проведения расчётов требуется ввести вакуумные углы смешивания и массы нейтрино. Для масс взяты значения:

$$m_1 = 0.003\text{eV}; \quad m_2 = 0.0091\text{eV}; \quad m_3 = 0.0502\text{eV}; \\ m_4 = 2.7\text{eV},$$

$$\text{так что } m_2^2 - m_1^2 = 7.38 \cdot 10^{-5}\text{eV}^2 \quad \text{и} \quad m_3^2 - m_2^2 = \\ 2.44 \cdot 10^{-3}\text{eV}^2$$

Поведение адиабатических  
уровней энергии в системе  
4-х нейтрино.



**Взаимодействия нейтрино с космической плазмой радикально подавляют процесс осцилляций, особенно в ранней Вселенной.**

**Эффективная матрица смешивания постепенно меняется от диагональной матрицы при  $t = 10^{-5}$  с .**

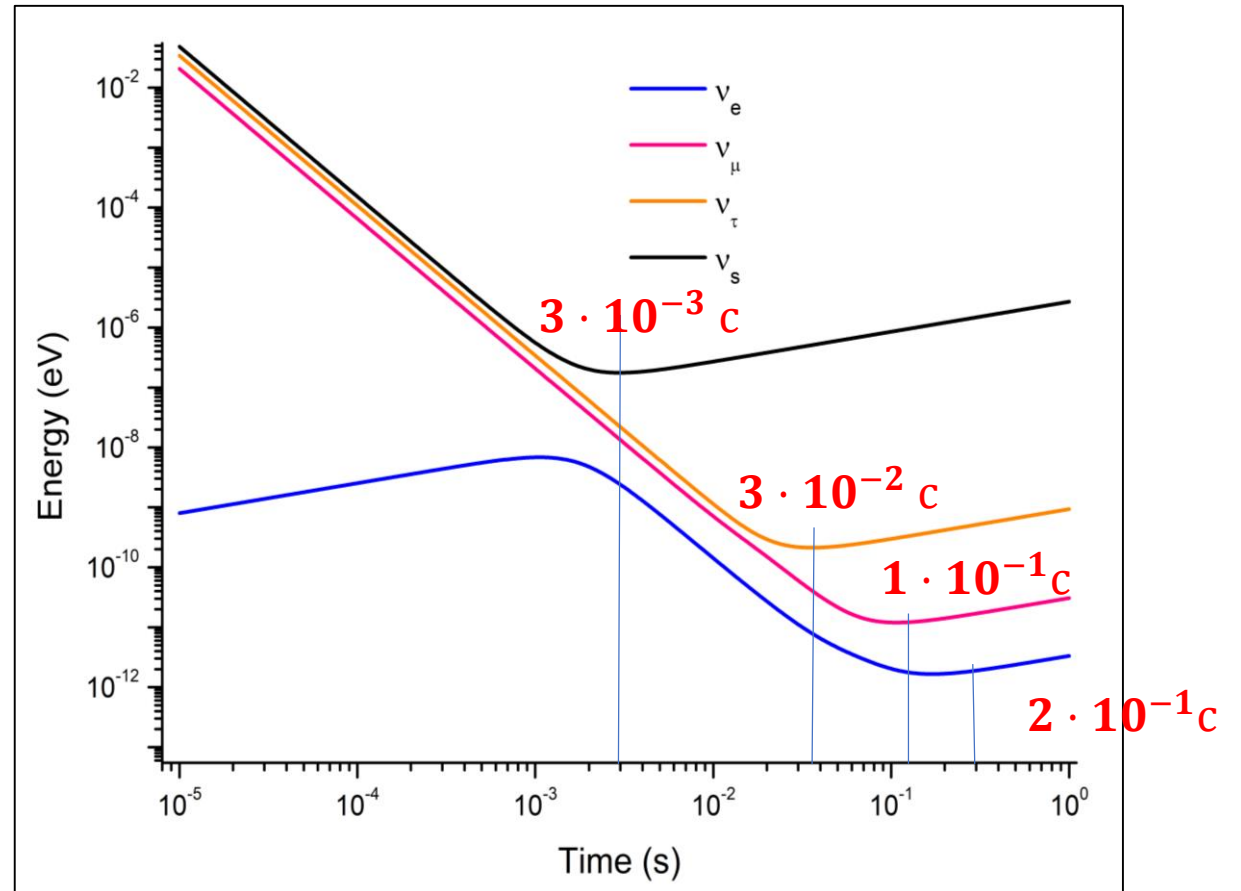
$$U_{\text{ef}}(10^{-5}\text{с}) = \begin{pmatrix} 1. & 0. & 0. & 0. \\ 0. & 1. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 1. & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{pmatrix}$$

$$U_{\text{ef}}(10^{-4}\text{с}) = \begin{pmatrix} 1. & 0. & 0. & 0.01 \\ 0. & 1. & 0.01 & 0.02 \\ 0. & 0.01 & 1. & 0.01 \\ 0.01 & 0.02 & 0.01 & 1. \end{pmatrix}$$

$$U_{\text{ef}}(10^{-3}\text{с}) = \begin{pmatrix} 0.99 & 0.03 & 0.02 & 0.13 \\ 0.03 & 1. & 0.02 & 0.04 \\ 0.02 & 0.02 & 1. & 0.07 \\ 0.13 & 0.04 & 0.07 & 0.99 \end{pmatrix}$$

$$U_{\text{ef}}(10^{-2}\text{с}) = \begin{pmatrix} 0.95 & 0.07 & 0.07 & 0.3 \\ 0.12 & 0.9 & 0.41 & 0.07 \\ 0.07 & 0.42 & 0.9 & 0.1 \\ 0.29 & 0.05 & 0.15 & 0.95 \end{pmatrix}$$

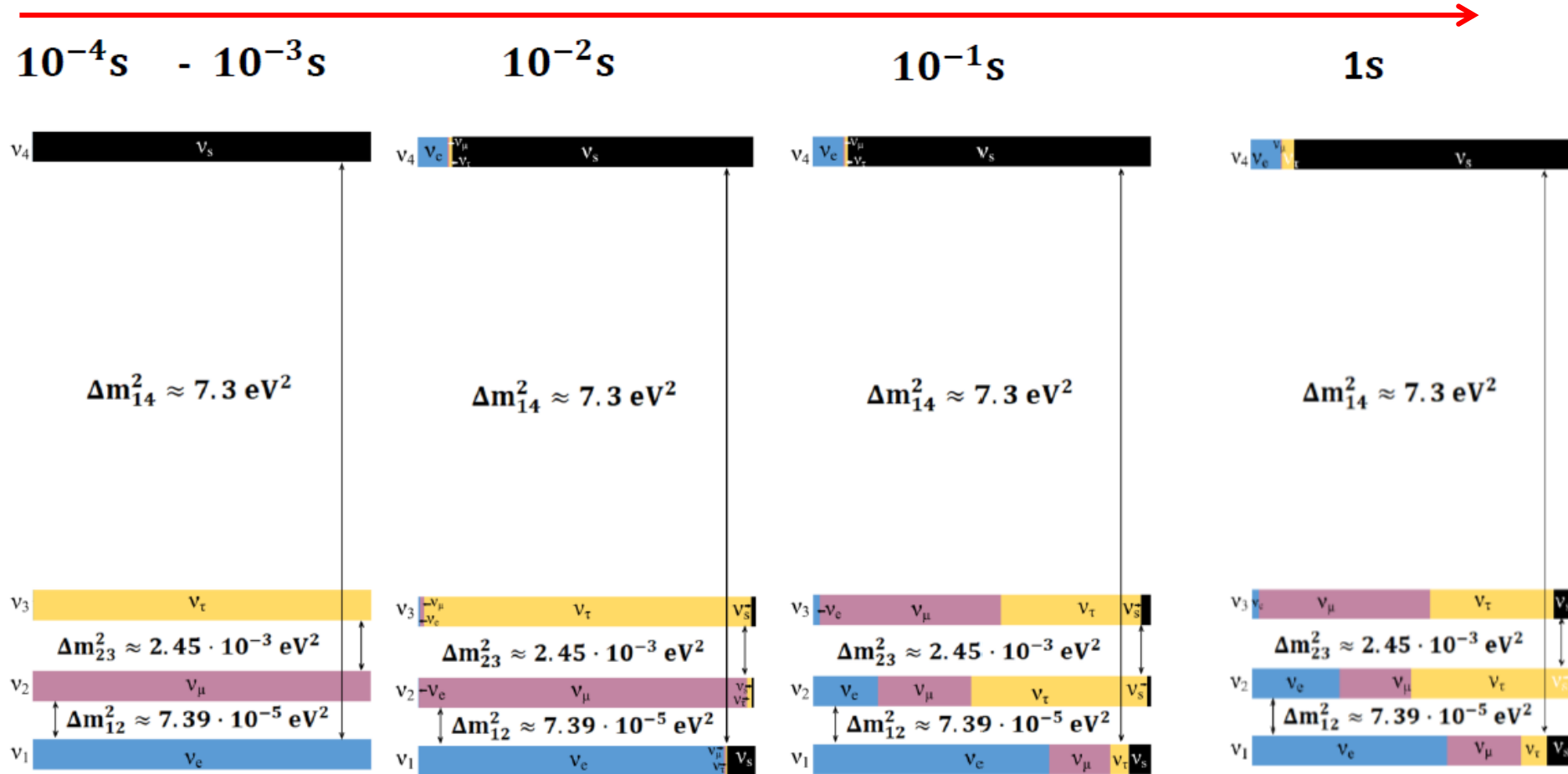
$$U_{\text{ef}}(10^{-1}\text{с}) = \begin{pmatrix} 0.79 & 0.51 & 0.15 & 0.3 \\ 0.47 & 0.48 & 0.73 & 0.07 \\ 0.29 & 0.7 & 0.64 & 0.1 \\ 0.25 & 0.12 & 0.17 & 0.95 \end{pmatrix}$$



**Поведение адиабатических уровней энергии в системе 4-х нейтрино.**

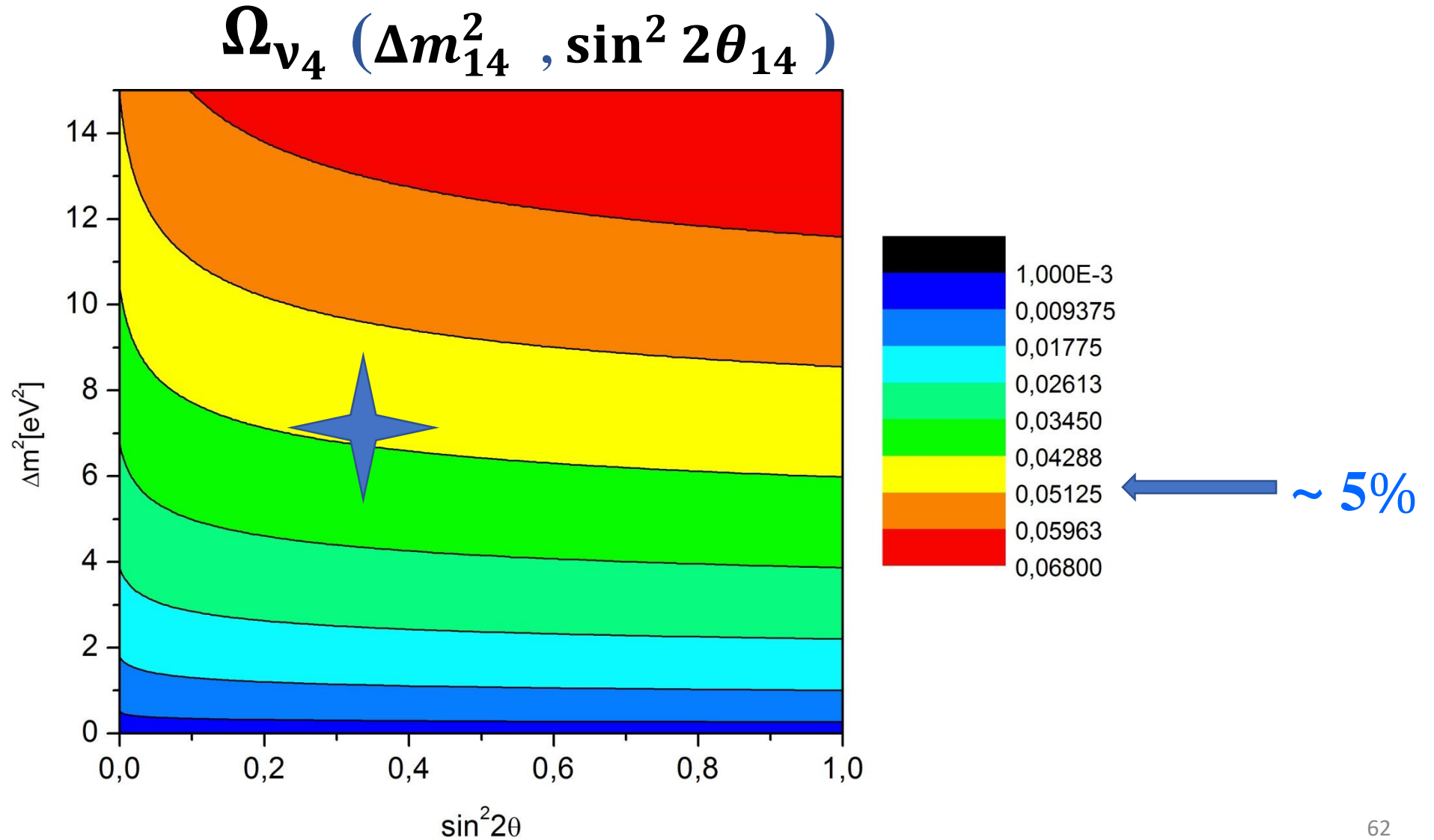
# Влияние космической плазмы на схему смешивания

## Зависимость от времени

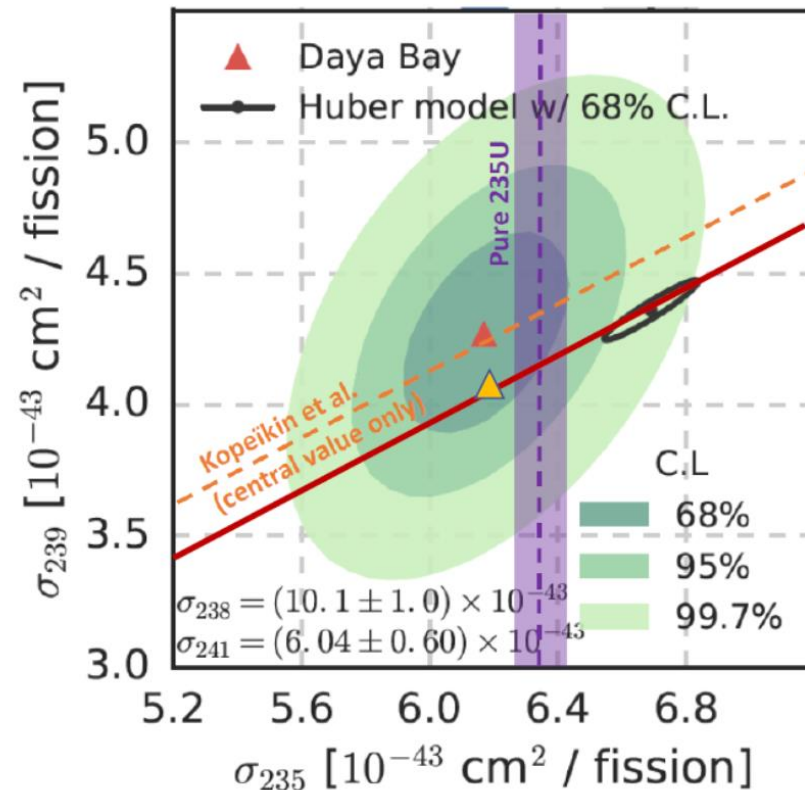
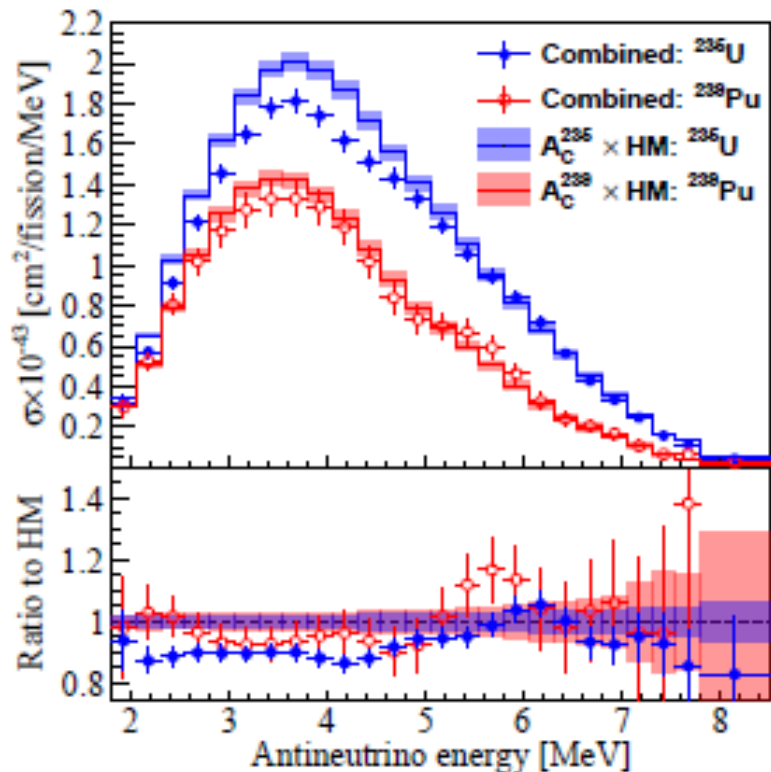
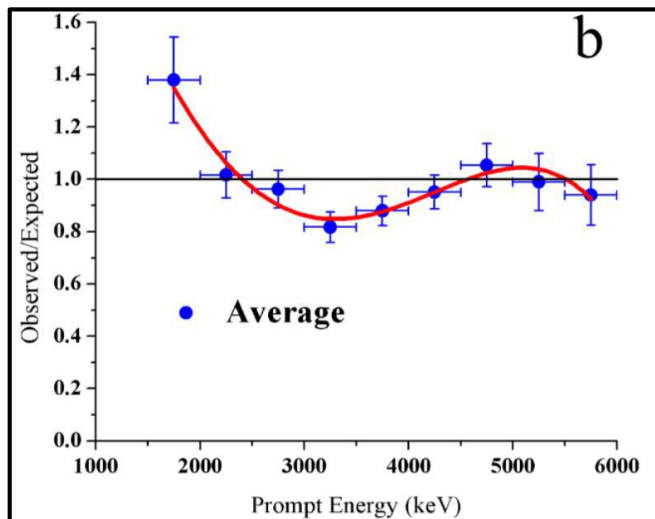
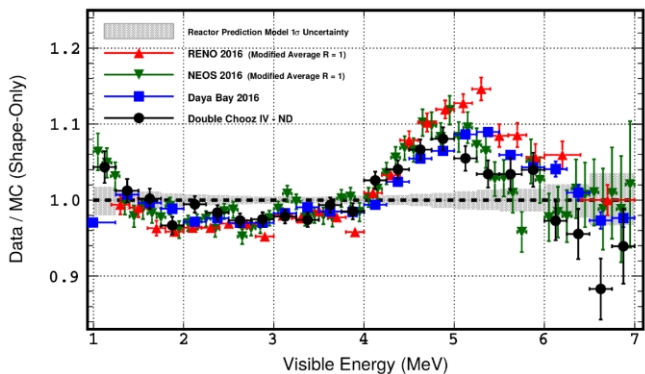


Вклад стерильного нейтрино с параметрами  $\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ eV}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.36$   
в энергетическую плотность Вселенной

  
**Best fit  
Neutrino-4**



# Разговоры вокруг РАА



В нашей работе [11] отмечалось, что возможна альтернативная интерпретация расхождения спектров. Это не бамб в области 5 МэВ, а яма в области максимума в области 3 МэВ

(Вверху) Спектры  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  из анализа данных Daya Bay и PROSPECT. (Внизу) **Соотношение комбинированных** результатов анализа к предсказаниям формы от масштабированной шкалы Хубер- Модель Мюллера.

**Поперечные сечения  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ .**  
**Черный эллипс** соответствует Модель НМ;  
**Зеленые контуры** относятся к разделению U / Pu;  
**Фиолетовая полоса** представляет среднемировое значение для экспериментов с чистым  $^{235}\text{U}$  ;  
**Оранжевая пунктирная линия** соответствует новому измерению Копейкина. отношения спектров  $^{235}\text{U}$  /  $^{239}\text{Pu}$  22.

# Спектры $^{235}\text{U}$ и $^{239}\text{Pu}$ после анализа с учётом формы спектра и с учётом процесса осцилляций с $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07(4.9\sigma)$ .

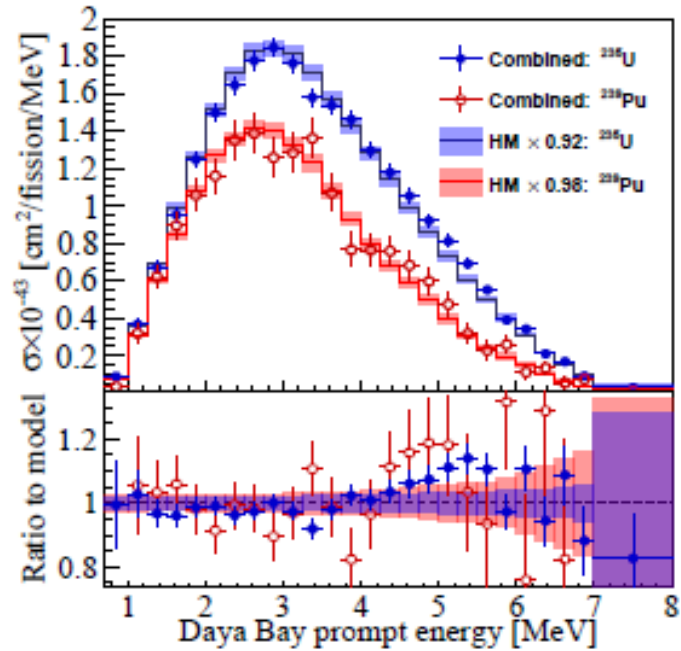


FIG. 3. (Top) The extracted  $^{235}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$  spectra in Daya Bay's prompt energy from the combined analysis of the Daya Bay and PROSPECT data. The corresponding scaled Huber-Mueller (HM) model predictions are overlaid. The error bars in the data points are the square root of the diagonal elements of the covariance matrix for the spectral shape. (Bottom) The ratio of the combined analysis results to the shape predictions from the scaled Huber-Mueller model.

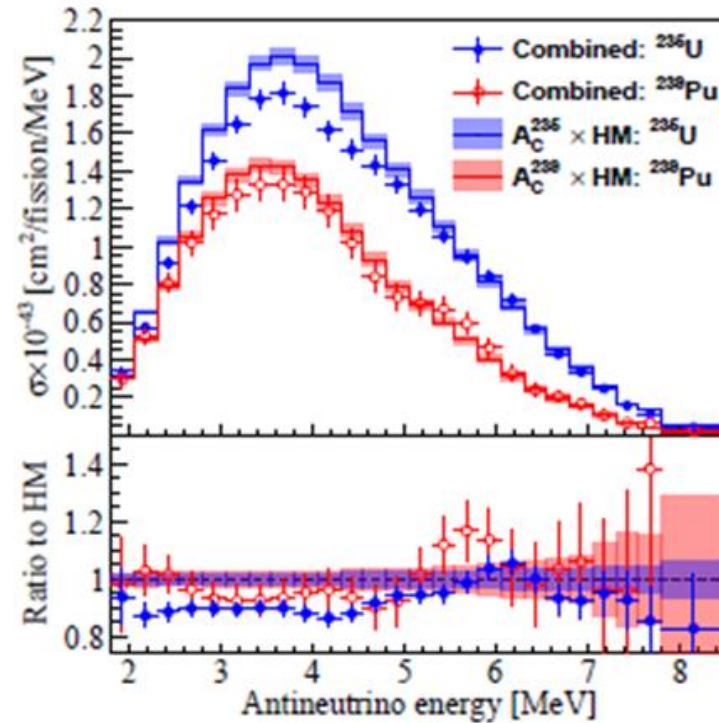
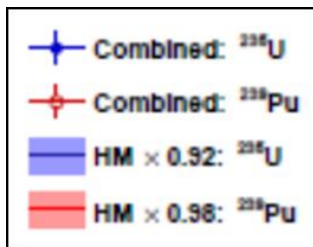
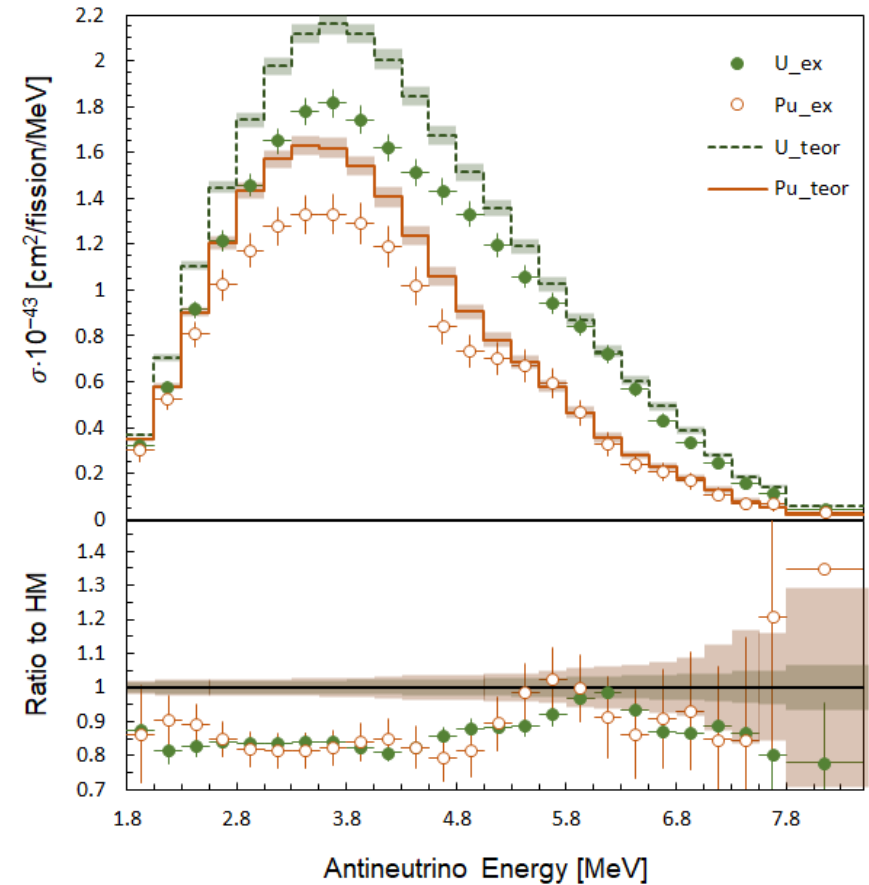
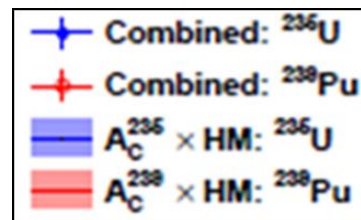


FIG. 5. (Top)  $^{235}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$  antineutrino spectra unfolded from the jointly deconvolved Daya Bay and PROSPECT measurements. (Bottom) Ratio of the measurements to their respective models, which are corrected by the smearing matrices  $A_c$  in both panels.



Спектры  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  после анализа с учётом формы спектра и с учётом процесса осцилляций с  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07(4.9\sigma)$ .

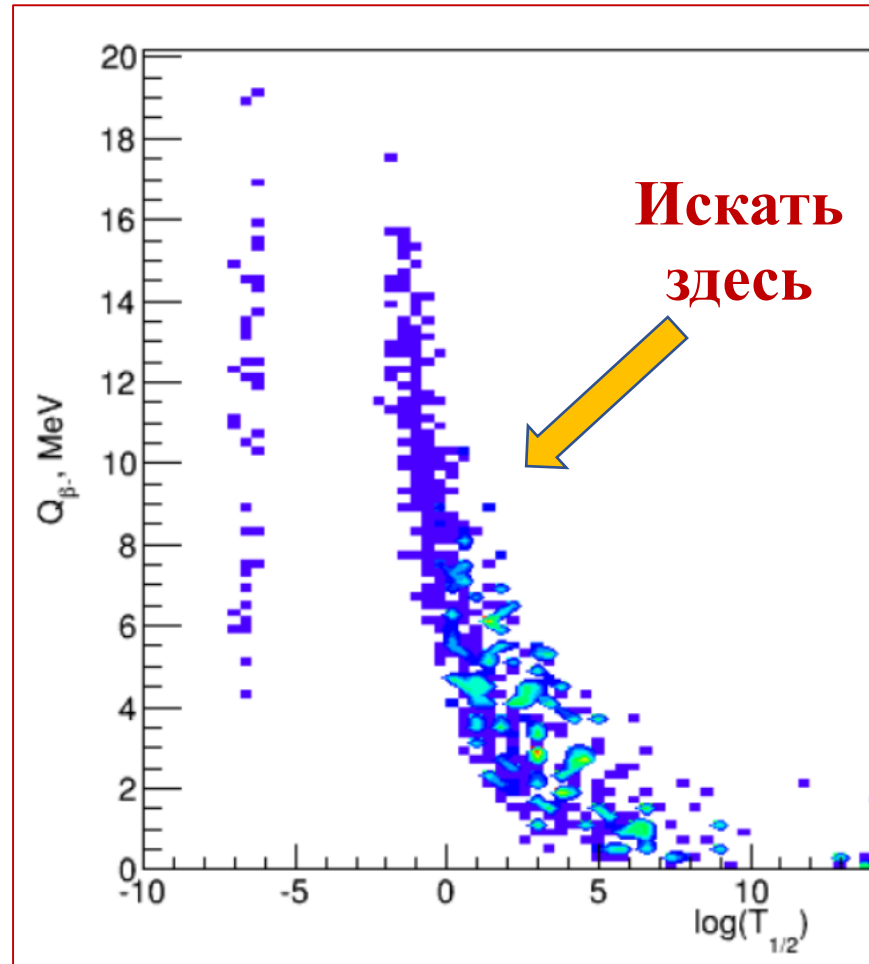


# Сложность задачи реакторного эксперимента по поиску стерильного нейтрино, основываясь на абсолютных измерениях составляющих процесса работы реактора

	$E_{tot}$	$\langle E_{\nu} \rangle$	$E_{\beta\gamma}$	$E_{nc}$	$E_f$
$U^{235}$	202.79 ± 0.06	9.07 ± 0.32	0.35 ± 0.02	8.55 ± 0.22	209.20 ± 0.46
$U^{238}$	205.93 ± 0.13	11.00 ± 0.80	0.33 ± 0.03	10.92 ± 0.28	205.52 ± 0.96
$Pu^{239}$	207.32 ± 0.08	7.22 ± 0.27	0.30 ± 0.02	11.19 ± 0.28	209.99 ± 0.60
$Pu^{241}$	211.04 ± 0.12	8.71 ± 0.30	0.29 ± 0.03	11.50 ± 0.25	213.60 ± 0.65

Продукты ядерного деления (ПЯД) представляют собой сложную смесь более чем 200 радиоактивных изотопов 36 элементов (от цинка до гадолиния). Большую часть активности составляют короткоживущие радионуклиды. Так, через 7, через 49 и через 343 суток после взрыва активность ПЯД снижается соответственно в 10, 100 и 1000 раз по сравнению с активностью через час после взрыва..

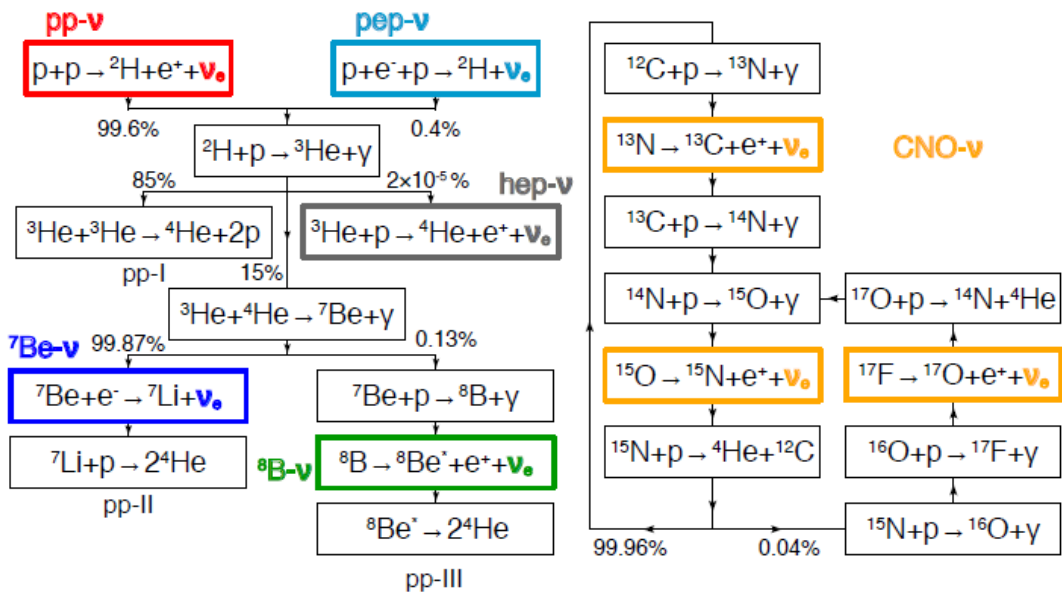
## Энергия и время жизни нуклидов при делении $^{235}U$



## Распределение энергии деления $^{235}U$ тепловыми нейтронами

Кинетическая энергия осколков	167 МэВ
Мгновенные нейтроны	5 МэВ
Электроны $\beta$ -распада	5 МэВ
Антинейтрино $\beta$ -распада	10 МэВ
Мгновенное $\gamma$ -излучение	7 МэВ
$\gamma$ -Излучение продуктов распада	6 МэВ
Полная энергия деления	200 МэВ

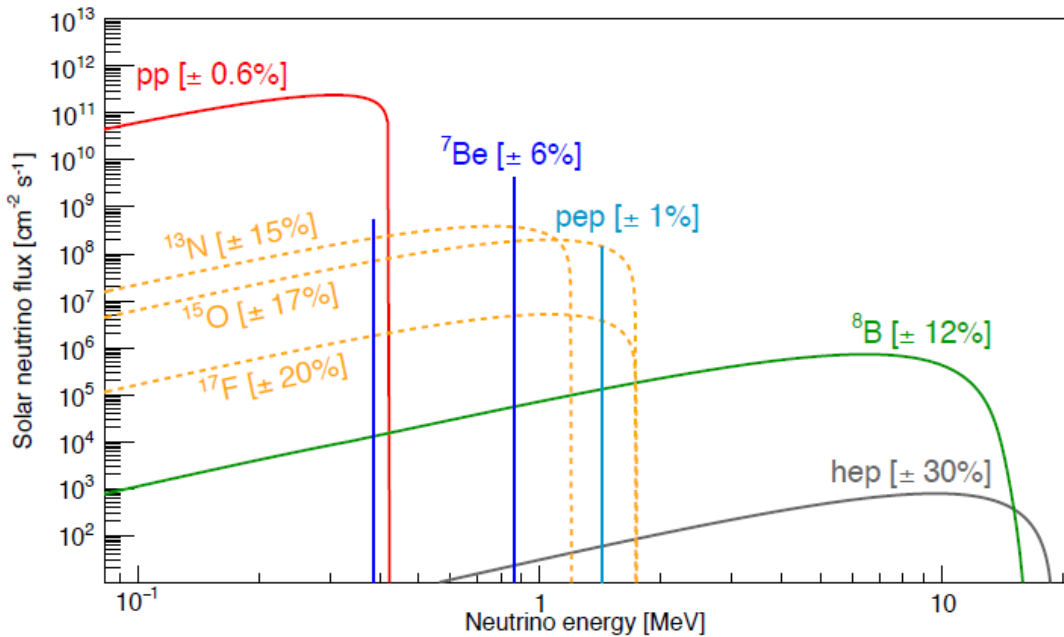
pp chain



CNO cycle

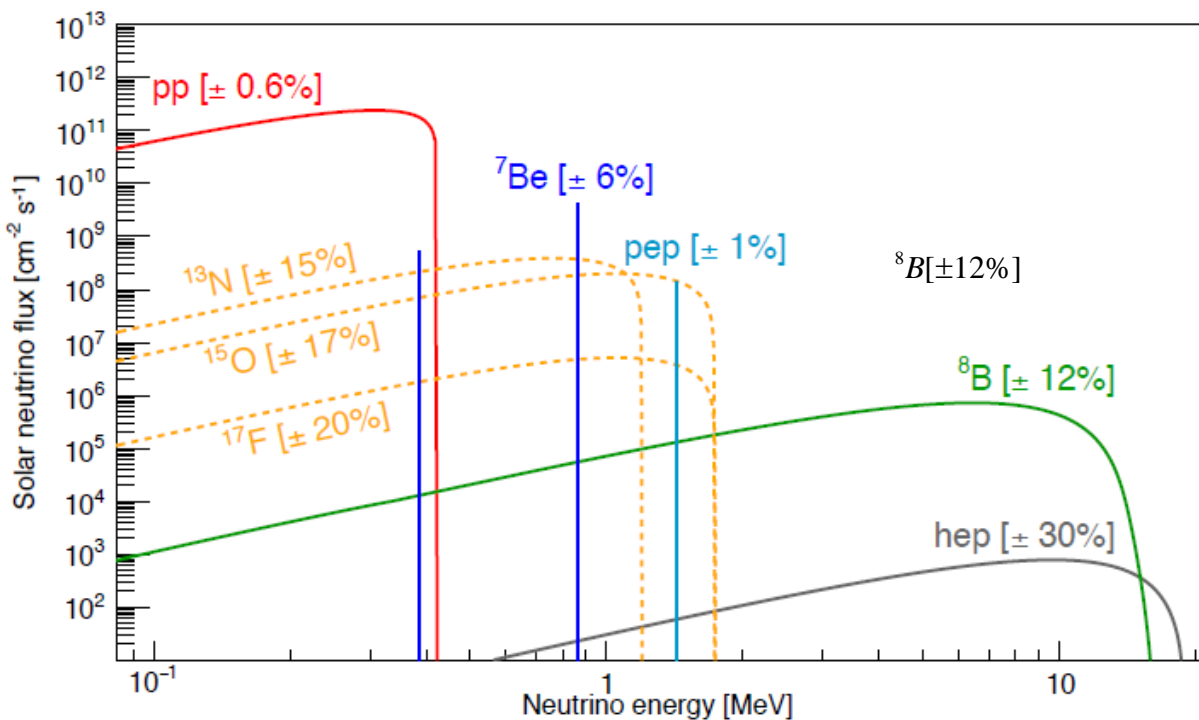
Разница нейтринных потоков для двух моделей  
металличности солнца. HZ – высокая металличность,  
LZ – низкая металличность

Solar $\nu$	B16-GS98 (HZ)	B16-AGSS09met (LZ)	(HZ – LZ)/HZ [%]	Exp
<i>pp-cycle</i>				
<i>pp</i>	5.98(1.0 ± 0.006)	6.03(1.0 ± 0.005)	–0.8	×10 <sup>10</sup>
<sup>7</sup> Be	4.93(1.0 ± 0.06)	4.50(1.0 ± 0.06)	8.9	×10 <sup>9</sup>
<i>pep</i>	1.44(1.0 ± 0.01)	1.46(1.0 ± 0.009)	–1.4	×10 <sup>8</sup>
<sup>8</sup> B	5.46(1.0 ± 0.12)	4.50(1.0 ± 0.12)	–17.6	×10 <sup>6</sup>
<i>hep</i>	7.98(1.0 ± 0.30)	8.25(1.0 ± 0.12)	–3.4	×10 <sup>3</sup>
<i>CNO-cycle</i>				
<sup>13</sup> N	2.78(1.0 ± 0.15)	2.04(1.0 ± 0.14)	26.6	×10 <sup>8</sup>
<sup>15</sup> O	2.05(1.0 ± 0.17)	1.44(1.0 ± 0.16)	29.7	×10 <sup>8</sup>
<sup>17</sup> F	5.29(1.0 ± 0.20)	3.26(1.0 ± 0.18)	38.3	×10 <sup>6</sup>
CNO	4.88(1.0 ± 0.11)	3.51(1.0 ± 0.10)	28.1	×10 <sup>8</sup>

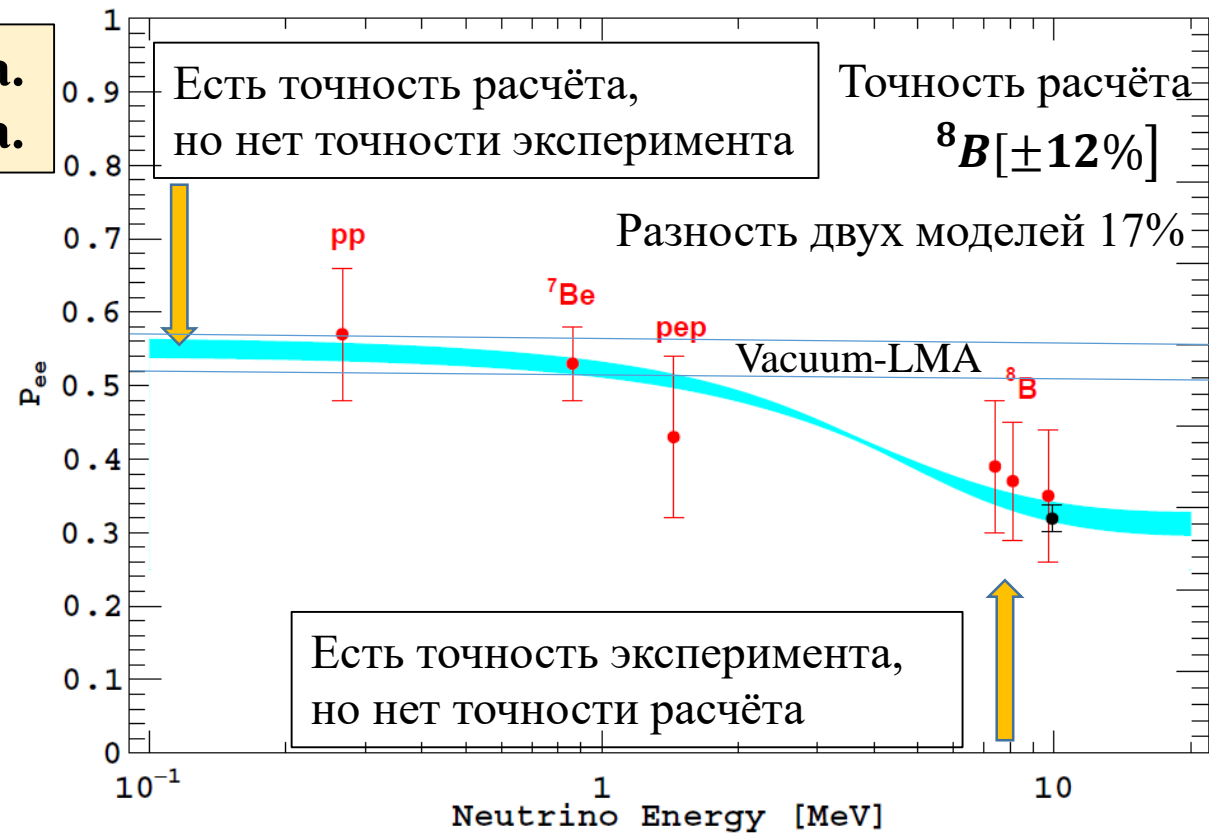


Данные взяты из статьи коллаборации Borexino  
*Universe* **2021**, 7(7), 231 [[arXiv:2105.13858v1](https://arxiv.org/abs/2105.13858v1)]

**Есть точность расчёта, но нет точности эксперимента.  
Есть точность эксперимента, но нет точности расчёта.**

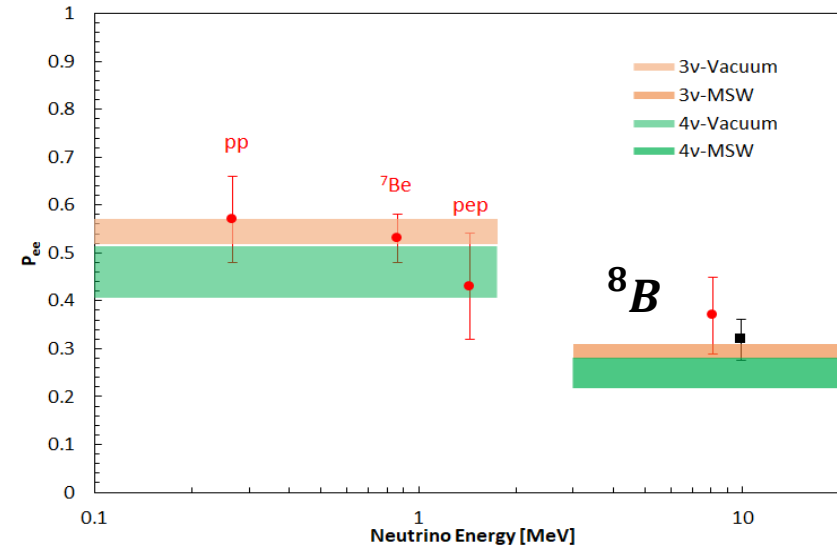
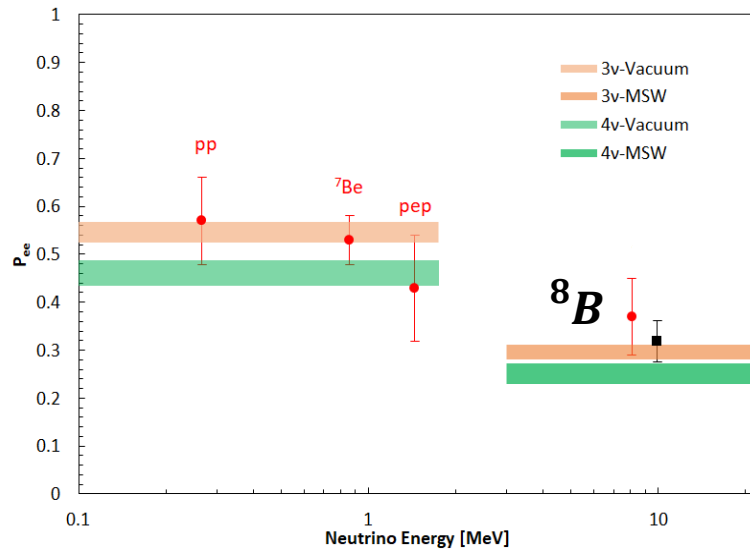


Недавняя работа описывающая ограничения на основе глобального анализа [arXiv:2109.14898v1](https://arxiv.org/abs/2109.14898v1)  
Из **303** точек взятых в рассмотрение больше половины относятся к измерениям нейтрино от распада  ${}^8\text{B}$ , так как эксперименты SK и SNO чувствительны только к нейтрино с энергией выше 3.5 MeV.



Вероятность обнаружения электронного нейтрино как функция энергии. Красные точки - результат Borexino, чёрная точка – SNO+SK для  ${}^8\text{B}$ . Три точки Borexino для  ${}^8\text{B}$  соответствуют измерениям в различных диапазонах энергий. По экспериментальным данным вероятности определяется с использованием ССМ с высокой металличностью. Ошибки соответствуют  $\pm 1\sigma$  экспериментальные + теоретическая. Кривая соответствует  $\pm 1\sigma$  предсказанию модели MSW-LMA

**Ограничения на  $\sin^2 2\theta_{14}$ , полученные в [12], выходят за рамки доступной экспериментальной точности матрицы смешения и точности нейтринных экспериментов.**



Прежде всего, мы оценили (независимо от модели Солнца) возможность выбора между моделью 3-нейтрино и моделью 4-нейтрино, используя текущую точность матричных элементов смешения для двух моделей нейтрино. При расчете выхода электронных нейтрино в модели 3 + 1 следует учитывать необходимость корректировки матричных элементов  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  за счет введения нового угла смешивания. В этом случае также необходимо учитывать погрешности вновь введенного угла смешивания.. На ФИГ.7 представлены результаты двух расчетов: с линейным и квадратичным сложением ошибок. Для модели 3-нейтрино и модели 4-нейтрино у нас есть следующие критерии значимости для экспериментальных результатов в различных моделях:  **$\text{GoF}_{3\nu} = 0,8$  ( $0,25\sigma$ ),  $\text{GoF}_{4\nu} = 0,2$  ( $1,28\sigma$ )** для квадратичного сложения ошибок и  **$\text{GoF}_{3\nu} = 0,81$  ( $0,24\sigma$ ),  $\text{GoF}_{4\nu} = 0,31$  ( $1,01\sigma$ )** для линейного сложения ошибок. Таким образом, невозможно получить убедительное различие между моделями. Ограничения на  $\sin^2 2\theta_{14}$ , полученные в [12], выходят за рамки доступной экспериментальной точности матрицы смешения и точности нейтринных экспериментов.