

**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*

**Коллаборация Нейтрино-4**

*НИЦ «КИ» Петербургский институт ядерной физики, Гатчина, Россия*

*АО «ГНЦ НИИ атомных реакторов», г. Димитровград, Россия*

*Димитровградский инженерно-технологический институт МИФИ, Димитровград, Россия*

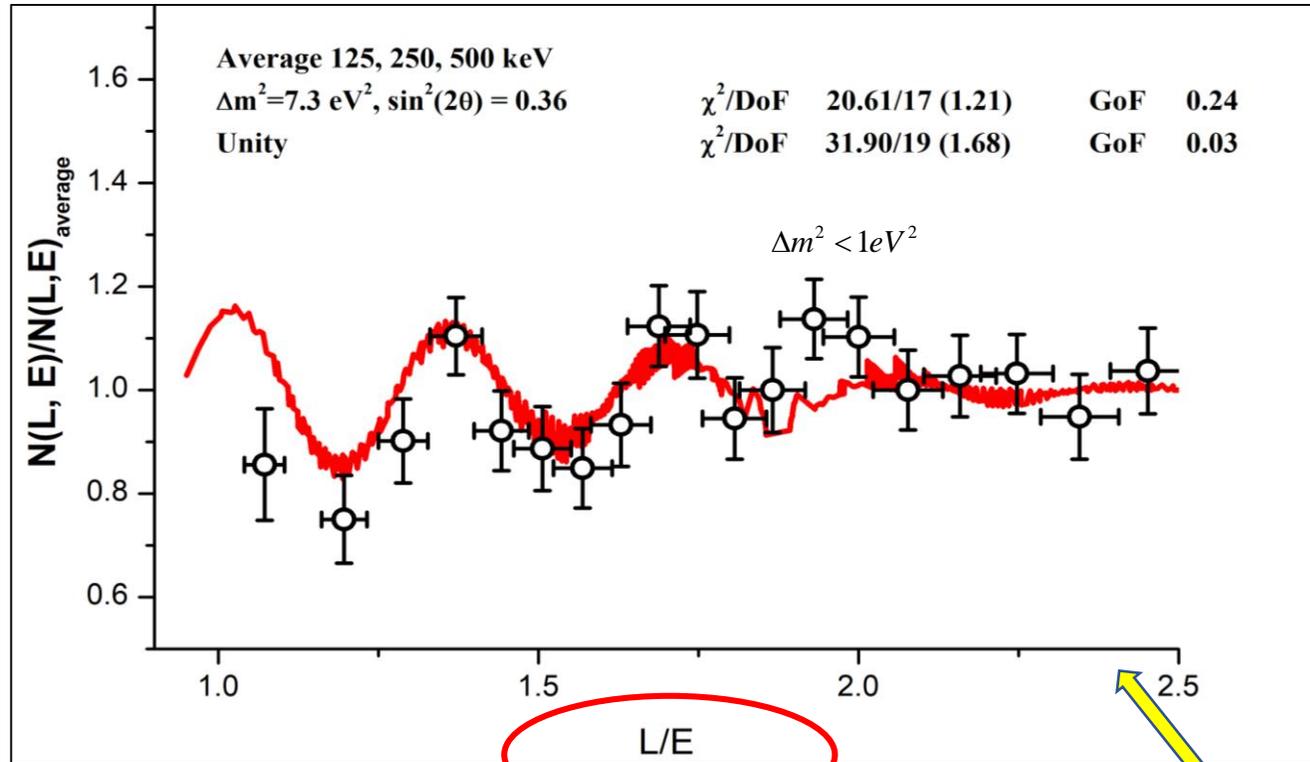
**ИЯИ РАН, Москва**

**6 декабря 2021**

- 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. Возможность экспериментальной проверки нейтринной модели  $3 + 1$** 
  - 3.1. Предсказание эффективной массы электронного нейтрино из эксперимента Нейтрино-4*
  - 3.2. Сравнение с экспериментами по измерению массы нейтрино в эксперименте KATRIN*
  - 3.3. Сравнение с ограничениями массы нейтрино из эксперимента GERDA*
- 4. Параметры стерильного нейтрино. Модель нейтрино с одним стерильным нейтрино**
  - 4.1. Матрица PMNS для модели  $3 + 1$*
  - 4.2. Схема смешивания нейтринных ароматов, включая стерильное нейтрино*
  - 4.3. иерархия эффективных масс*
- 5. Космология - роль стерильных нейтрино в формировании Вселенной.**

# Прямое наблюдение эффекта осцилляций в эксперименте Нейтрино-4 по поиску стерильного нейтрино

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



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

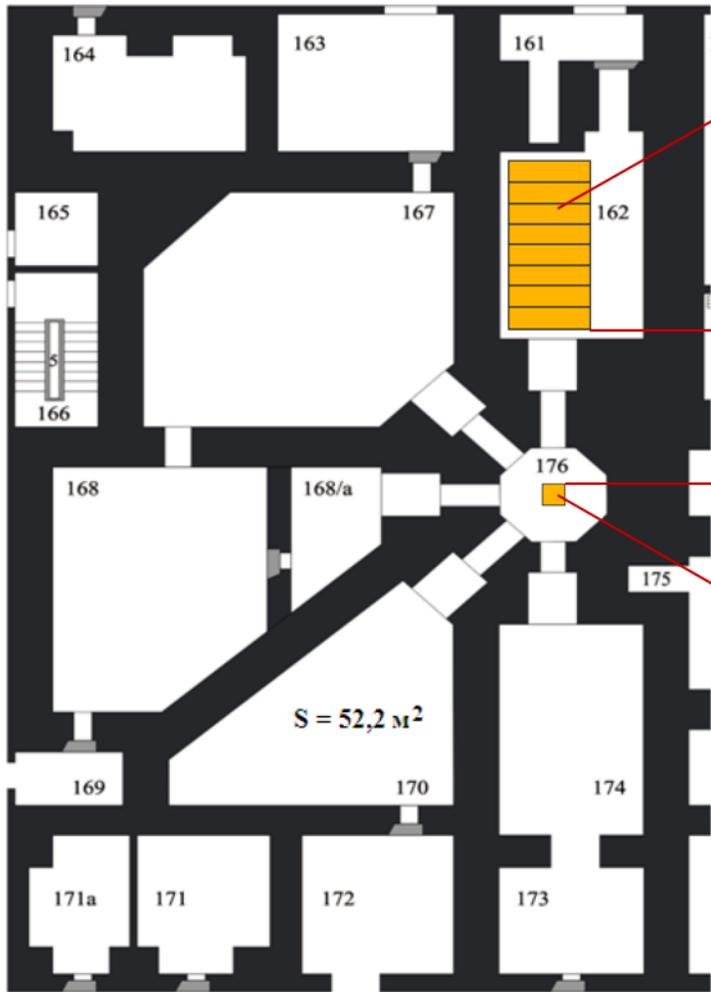
A.P.Serebrov, et al.  
**JETP Letters,**  
**Volume 109, 2019**  
**Issue 4, pp 213–221.**

**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)

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

# Реактор СМ-3



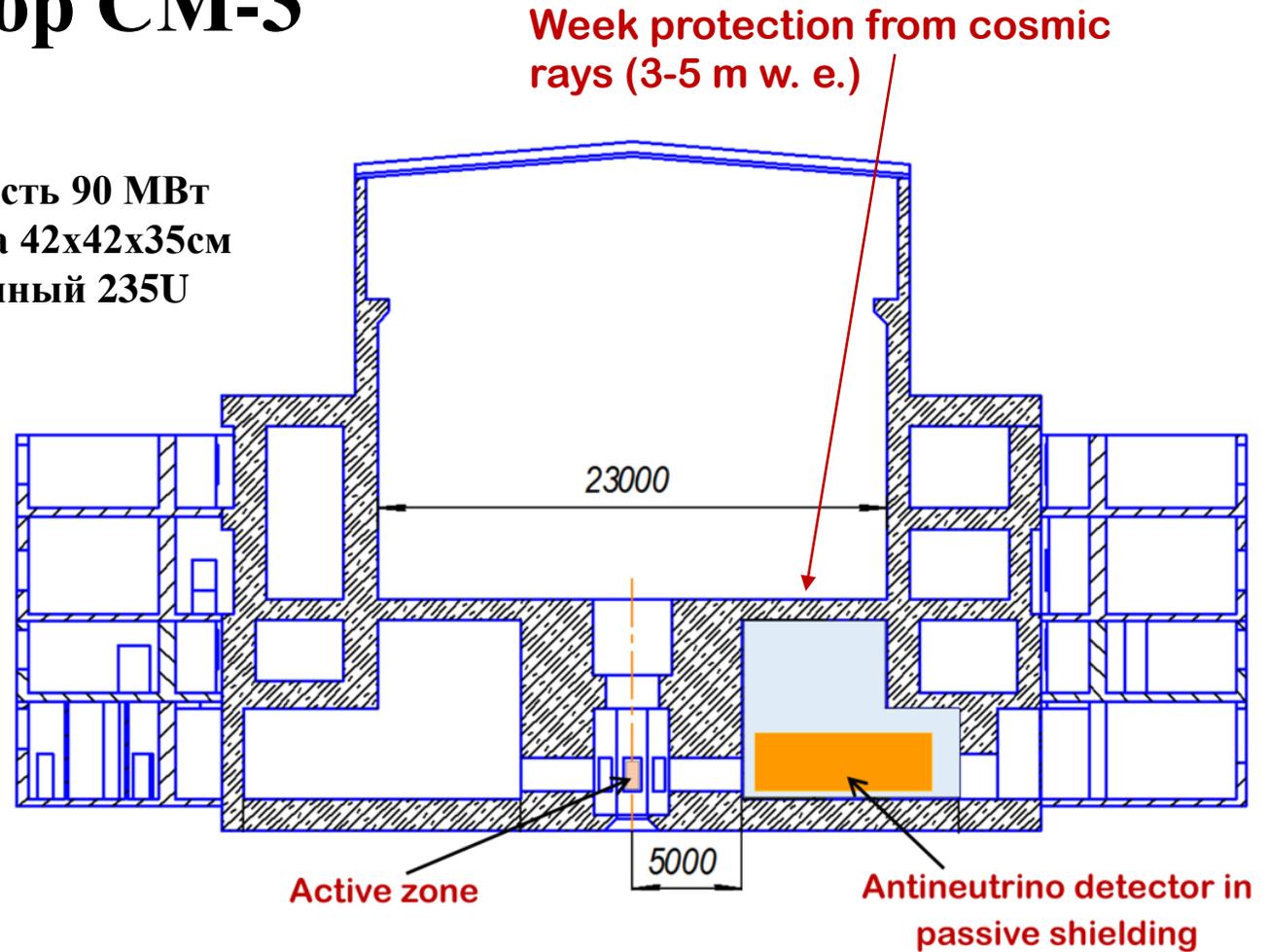
antineutrino  
detector

Тепловая мощность 90 МВт  
Компактная зона 42x42x35см  
Высокообогащенный 235U

5 m

Active  
zone

$S = 52,2 \text{ м}^2$



Week protection from cosmic  
rays (3-5 m w. e.)

23000

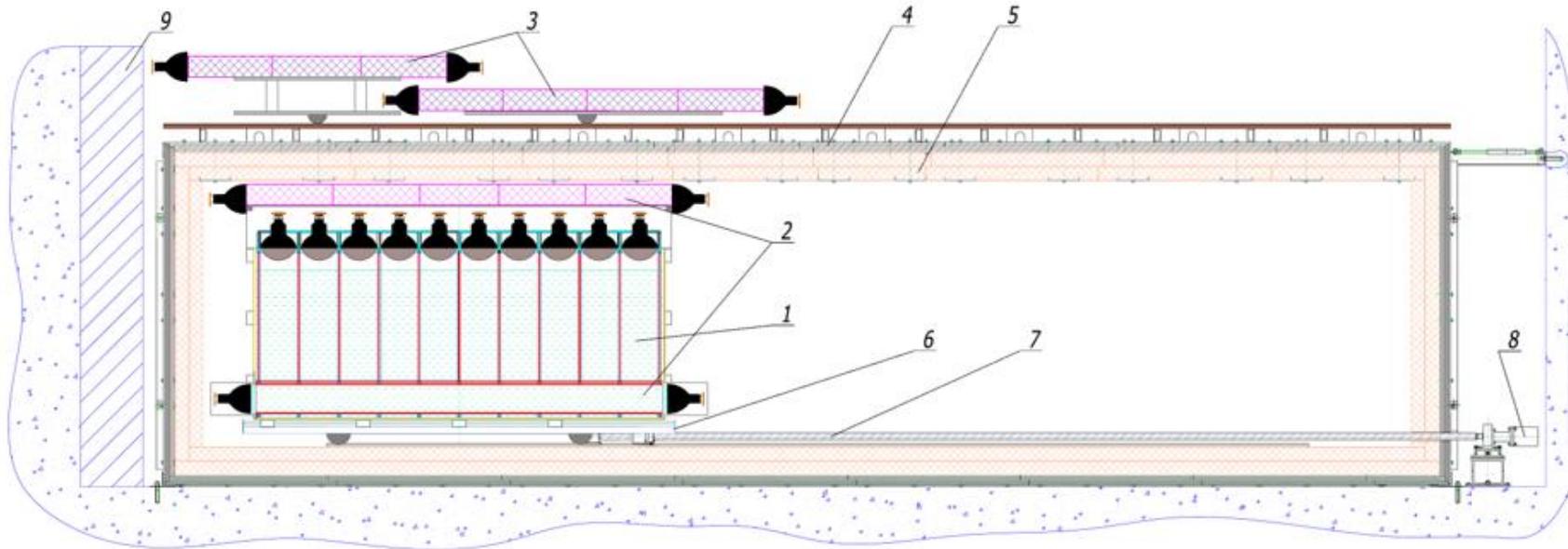
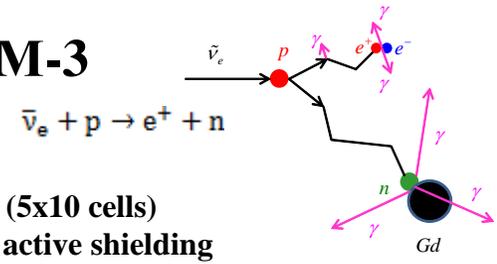
Active zone

5000

Antineutrino detector in  
passive shielding

Благодаря особенностям конструкции реактор СМ-3 обеспечивает наиболее благоприятные условия для поиска нейтринных осцилляций на малых расстояниях. Однако реактор СМ-3, как и другие исследовательские реакторы, находится на поверхности Земли, поэтому космический фон является основной трудностью в рассматриваемом эксперименте.

# Подвижный спектрально-чувствительный детектор антинейтрино на реакторе СМ-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 →*



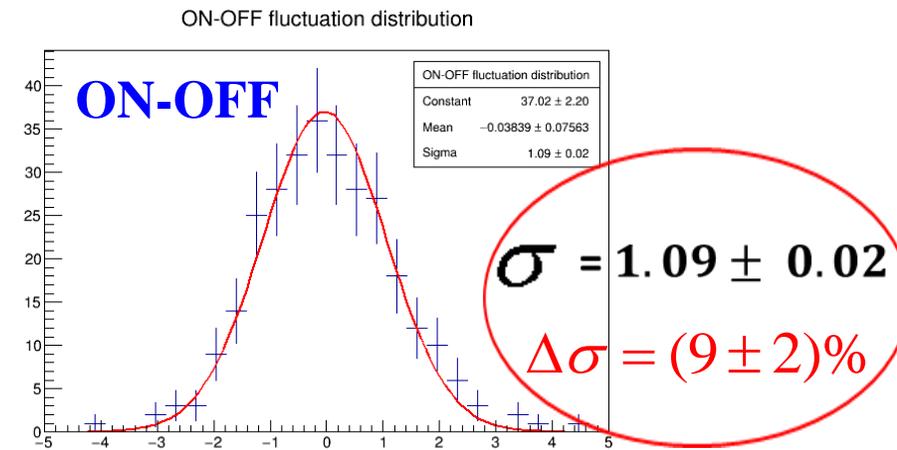
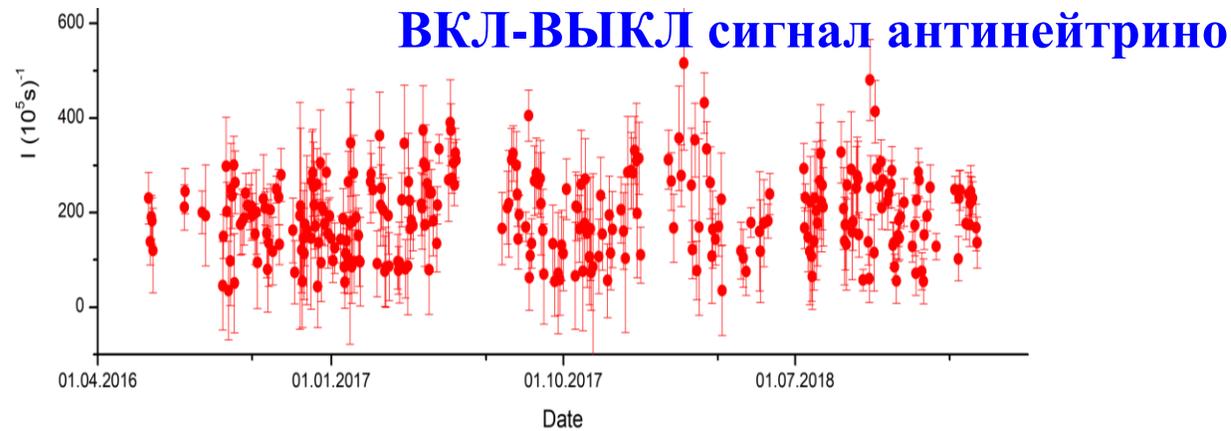
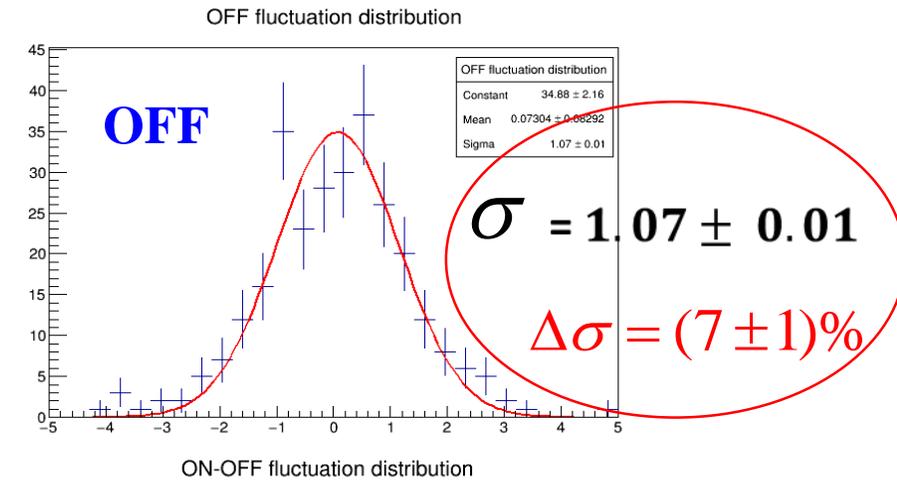
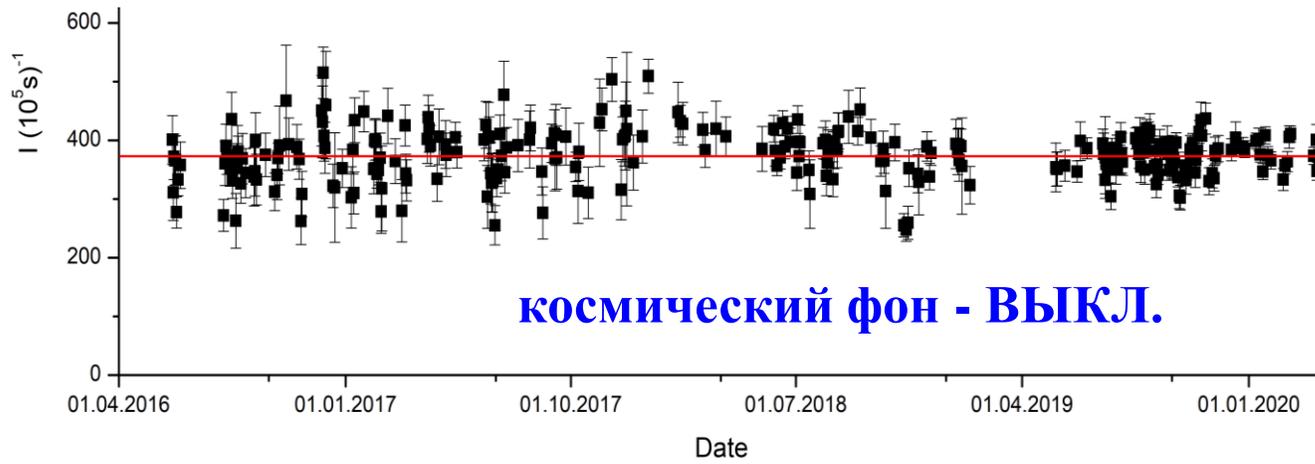
*Детектор  
прототип*

*Детектор*



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

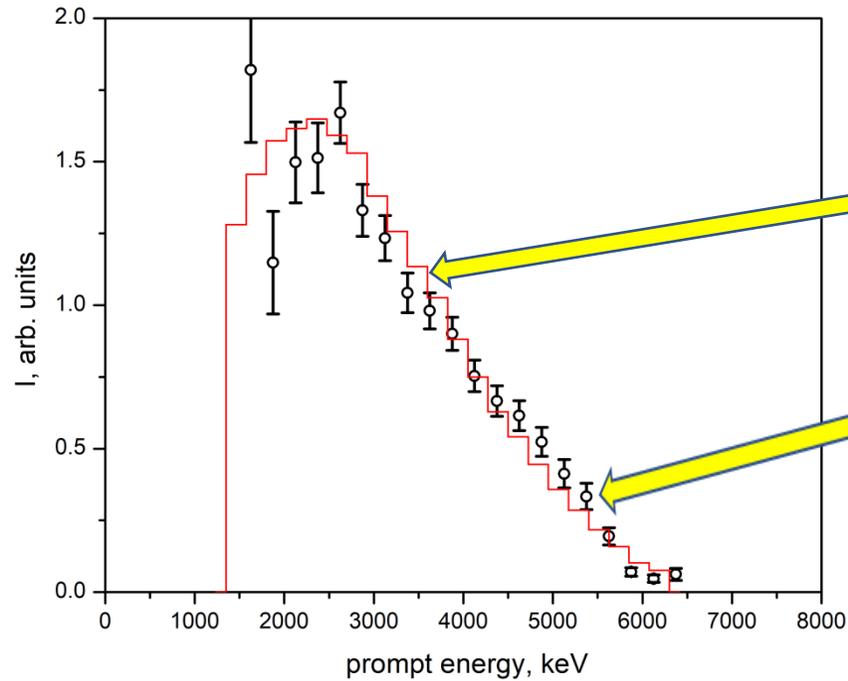
*Диапазон измерений 6 - 12 метров.*



Коррелированный сигнал космического фона (вверху).  
 Коррелированный сигнал ВКЛ-ВЫКЛ (внизу).

Распределение отклонений от среднего значения коррелированных событий, фона (ВЫКЛ) и различий (ВКЛ-ВЫКЛ), нормированных на их статистические погрешности.

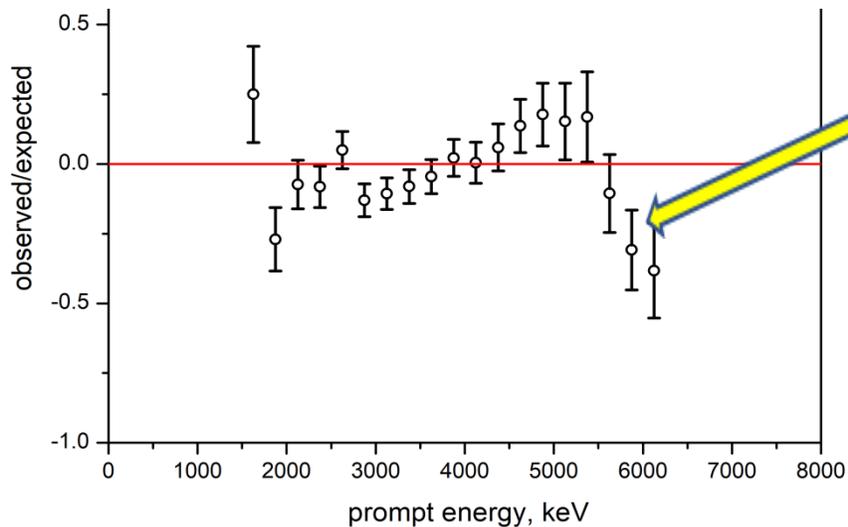
# Сравнение МС-спектра антинейтрино для $^{235}\text{U}$ с экспериментальным ON-OFF спектром



рассчитанный МС спектр антинейтрино для  $^{235}\text{U}$

экспериментальный ВКЛ-ВЫКЛ спектр

разность, нормированная на рассчитанный спектр



**Необходим спектрально независимый метод анализа экспериментальных данных.**

## 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

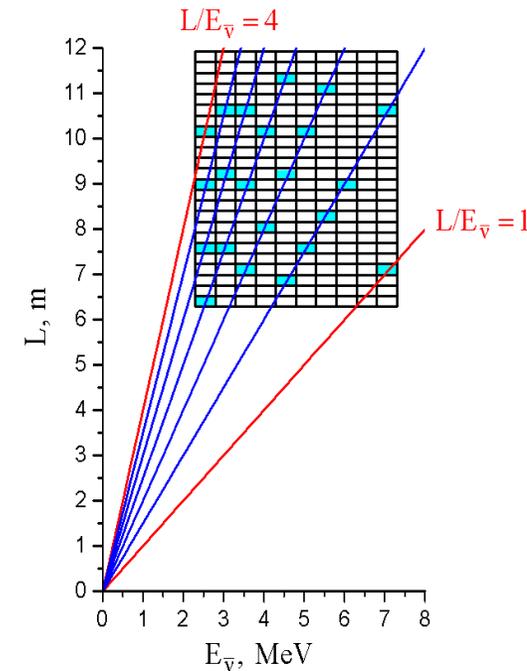
$\mathcal{E}(E)$  - Detector efficiency

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

### 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.**

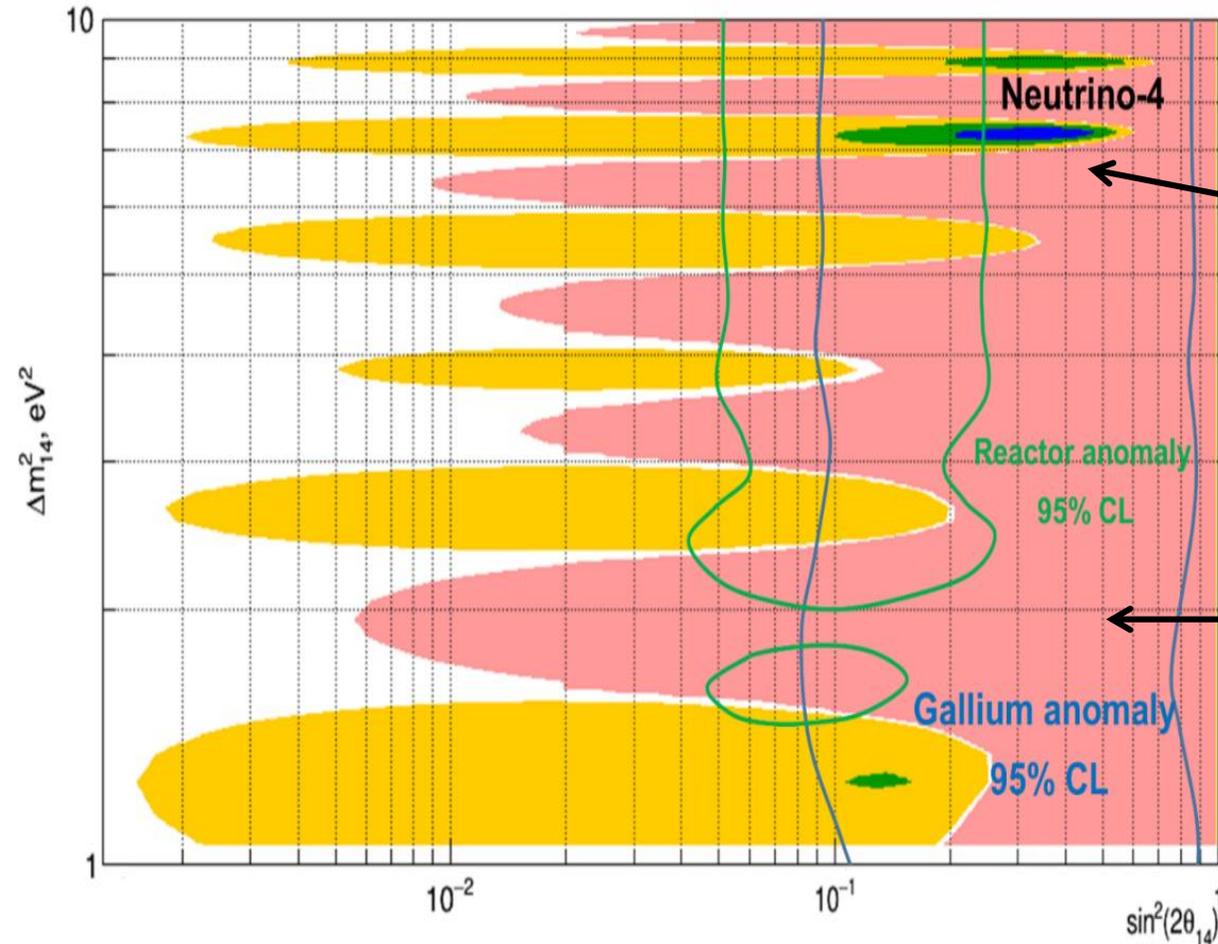
# Результаты анализа оптимальных параметров $\Delta m_{14}^2$ и $\sin^2 2\theta_{14}$ , используя $\Delta\chi^2$ метод

**Мы наблюдаем эффект осцилляции  $2.9\sigma$  в окрестности**

$$\Delta m_{14}^2 \approx 7.25 \text{eV}^2$$

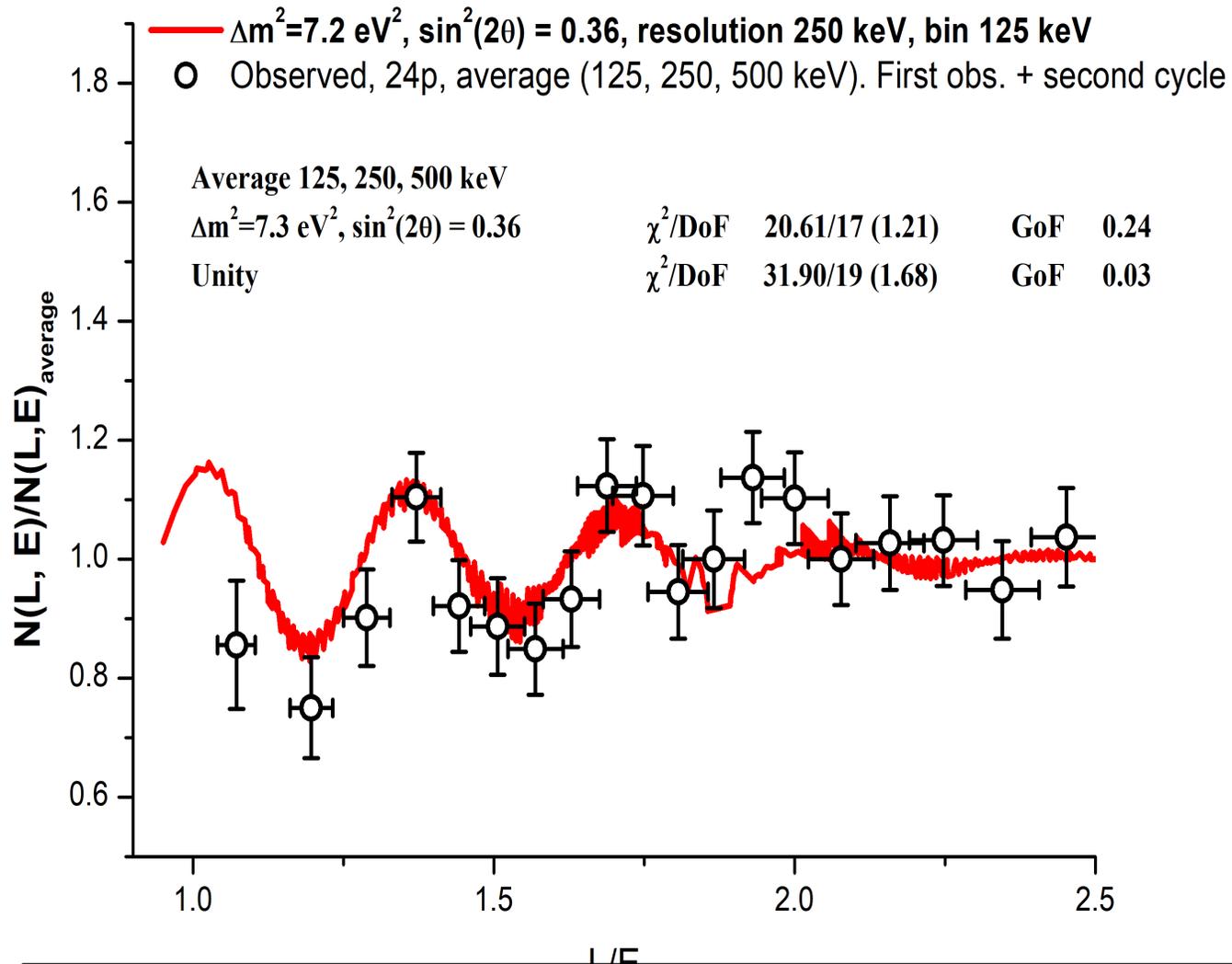
$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.36$$

$$\sum_{i,k} [(R_{i,k}^{\text{exp}} - R_{i,k}^{\text{th}})^2 / (\Delta R_{i,k}^{\text{exp}})^2] = \Delta\chi^2(\sin^2 2\theta_{14}, \Delta m_{14}^2)$$



Expected from Neutrino-4 CL 99.7%

Excluded from Neutrino-4 CL > 99.9% CL



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

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

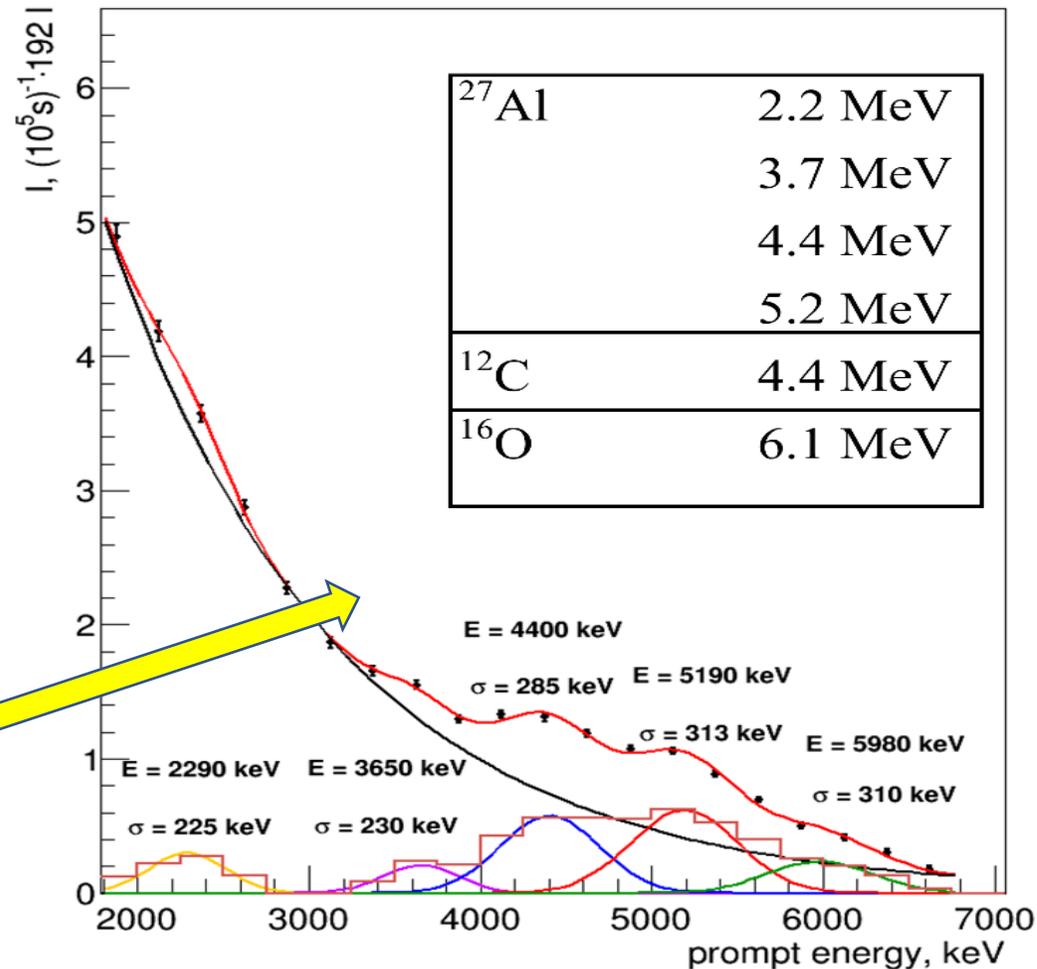
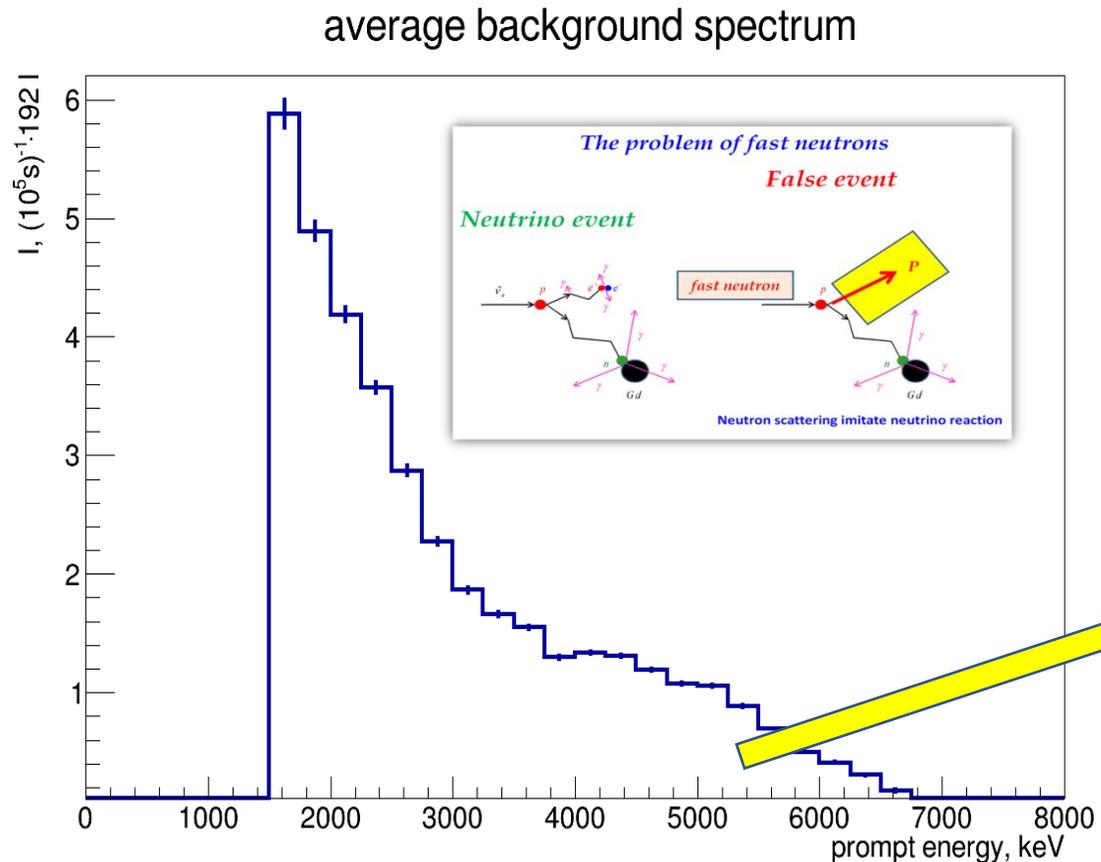
Период осцилляций для энергии нейтрино 4 МэВ составляет 1,4 м

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

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)

Метод обработки данных с фиксированной фазой позволяет наблюдать процесс осцилляций с характерным периодом 1.5 м на расстоянии 6-12 м. **Метод голографии.**

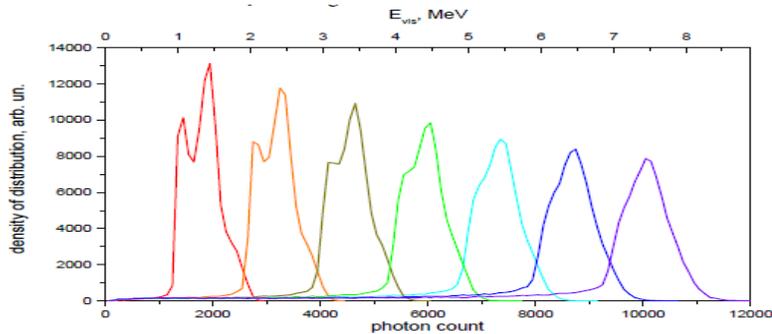
# Энергетическое разрешение детектора



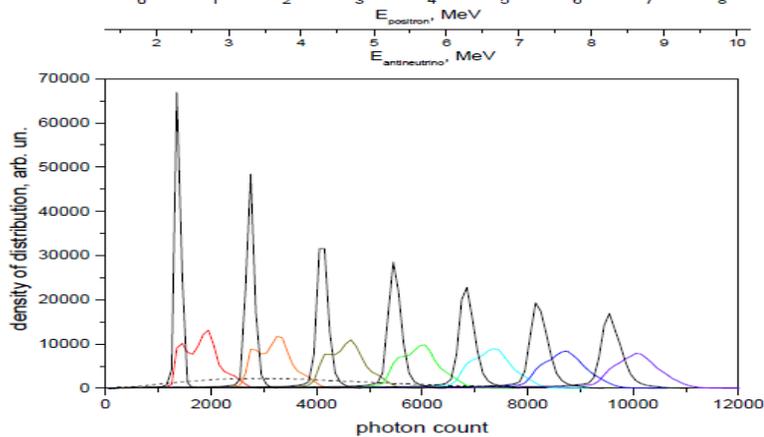
Наличие такой структуры в энергетическом спектре указывает на то, что калибровка детектора по энергии была одинаковой во всех измерениях.

Энергетическое разрешение детектора  $\sigma = 250 \text{ кэВ}$ , которое не зависит от энергии позитрона.

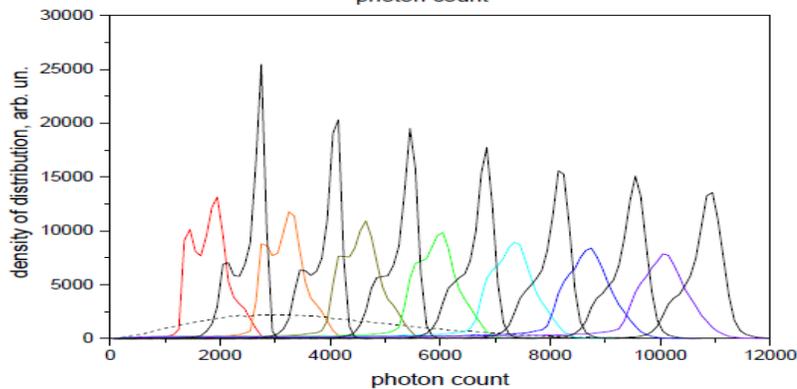
# МС модель энергетического разрешения детектора



**Распределение сигналов для одной ячейки детектора, учитывая сигналы от регистрации двух гамм с энергиями 511кэВ. В основном это определяется неполным поглощением гамма-квантов в пределах одной ячейки.**



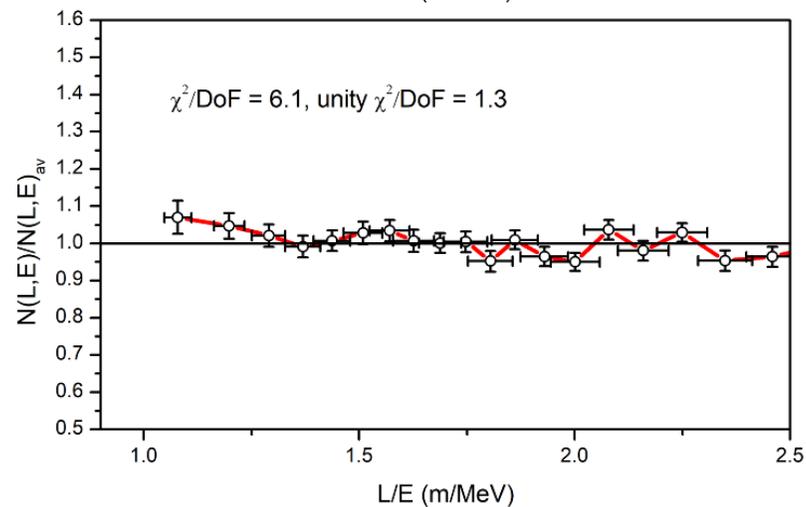
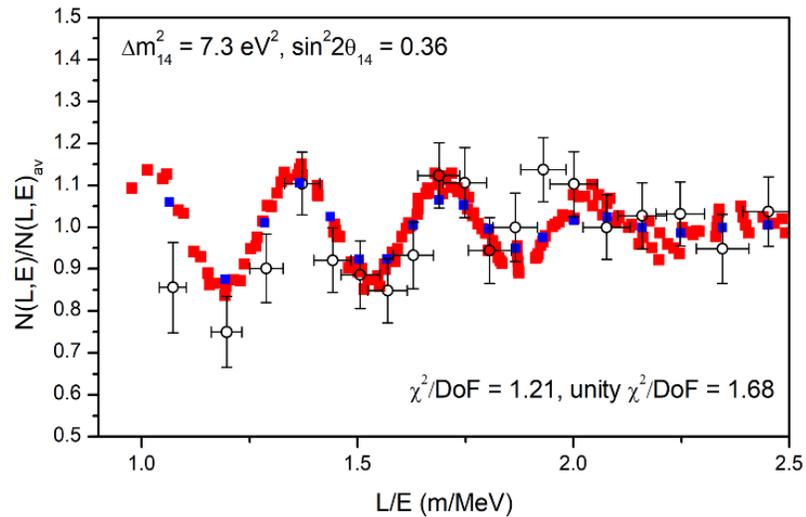
**Распределение сигналов только для одной ячейки детектора от позитрона без двух гамма-квантов от процесса аннигиляции.**



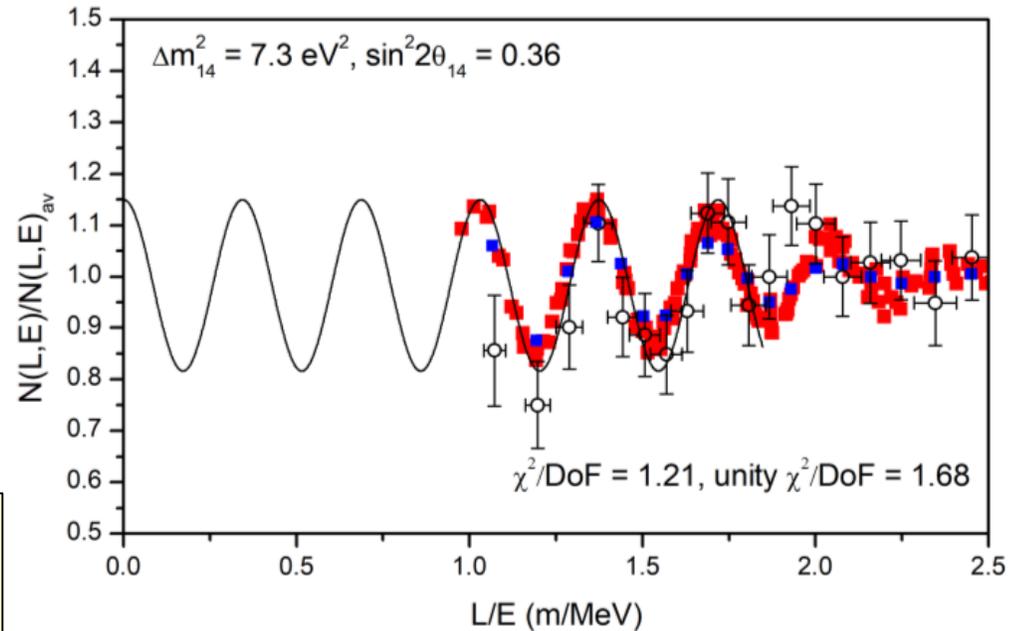
**Распределение сигналов с учетом аннигиляции гамм квантов и регистрация в смежных ячейках. Этот распределение асимметрично. Однако можно взять эффективную ширину распределения  $2\sigma$ , которая покрывает 68% общая площадь под кривой.**

| $E_{\text{pos}}, \text{ MeV}$ | $\sigma, \text{ keV}$ |
|-------------------------------|-----------------------|
| 2                             | 215                   |
| 4                             | 233                   |
| 6                             | 251                   |

**Расчеты показывают, что эффективная ширина почти не зависит от энергии позитронов и оценивается как  $2\sigma = 500 \text{ кэВ}$ .**

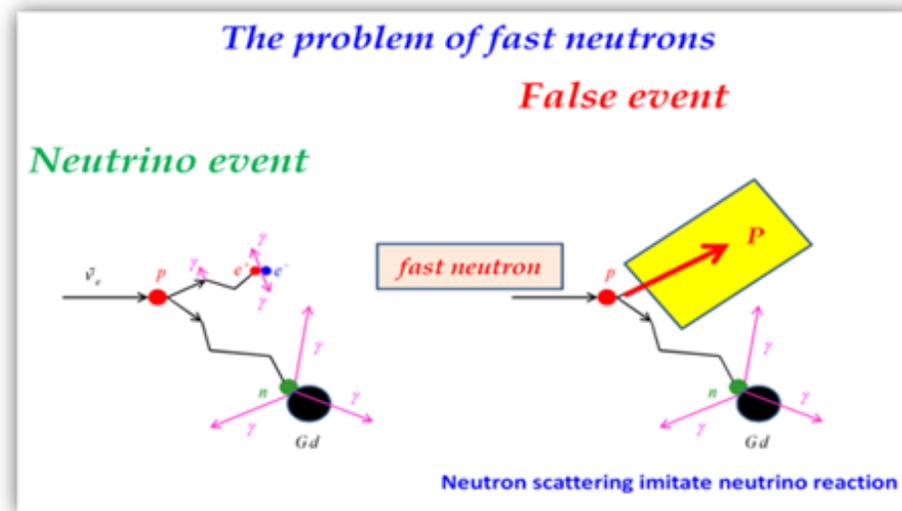


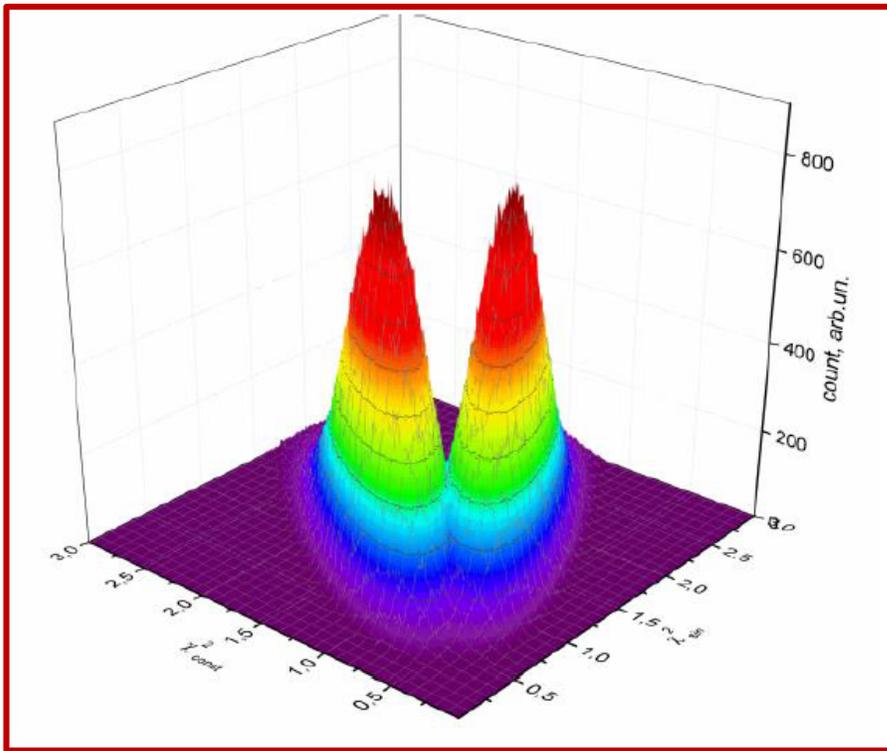
## Контроль систематики



Полная кривая осцилляций от центра активной зоны реактора.

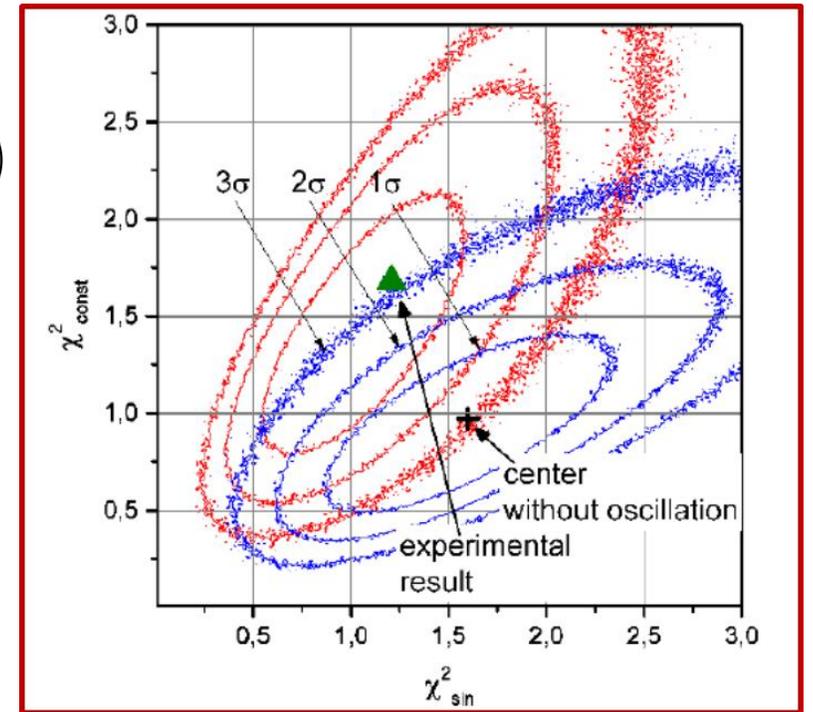
Сравнение отношения  $R$  в зависимости от  $L/E$  для нейтринного сигнала (вверху) и отношения  $R$  в зависимости от  $L/E$  для фона (внизу).





## МС-МОДЕЛЬ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Всего было проведено  $5 \cdot 10^6$  экспериментов для случая с осцилляциями и столько же без осцилляций.

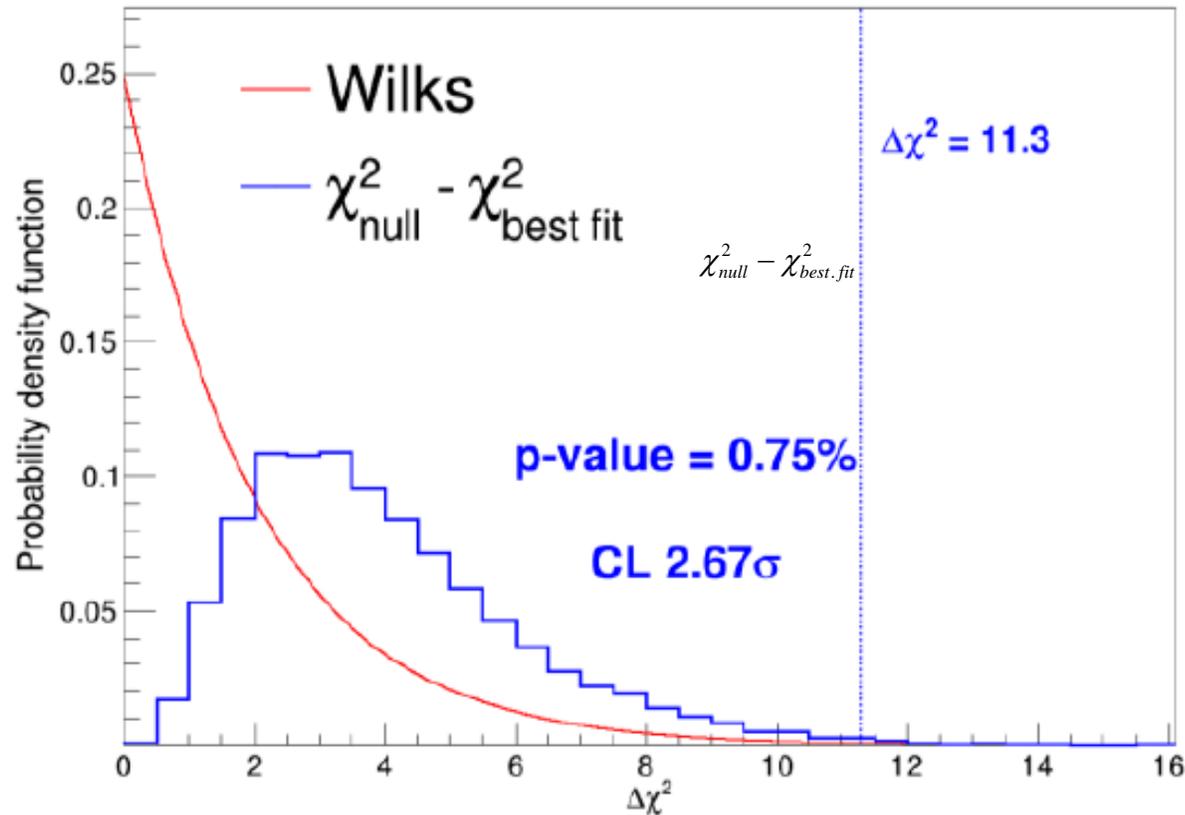


Распределение на плоскости ( $\chi^2_{const}$ ,  $\chi^2_{sin}$ ) для моделирования с точностью согласно экспериментальной статистике и с уровнем фона, соответствующим экспериментальному фону.

Были смоделированы два случая: с гипотезой осцилляций и с гипотезой об отсутствии осцилляций. Для каждого случая анализ проводился с гипотезой осцилляций и с гипотезой без осцилляций.

Указаны: центр распределения без осцилляций (черный крест) и отклонение от этого центра экспериментального результата (зеленый треугольник). Результат анализа экспериментальных данных при обработке гипотезы с осцилляциями и без них дает  $\chi^2 = 1,21$  или  $20,6$  для 17 степеней свободы и  $\chi^2_{const} = 1,68$ , или  $31,9$  для 19 степеней свободы соответственно и  $\Delta\chi^2 = 11,3$ . Обозначены изолинии распределения  $1\sigma$ ,  $2\sigma$  и  $3\sigma$ . Отклонение экспериментального результата от центра распределения без осцилляций составляет примерно  $3\sigma$ .

# 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  $\chi_{null}^2 - \chi_{best.fit}^2 \geq 11,3$  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.

## **2. Сравнение результатов эксперимента Нейтрино-4 с результатами других экспериментов**

*2.1 NEOS, DANSS, STEREO, PROSPECT на реакторах и SSM*

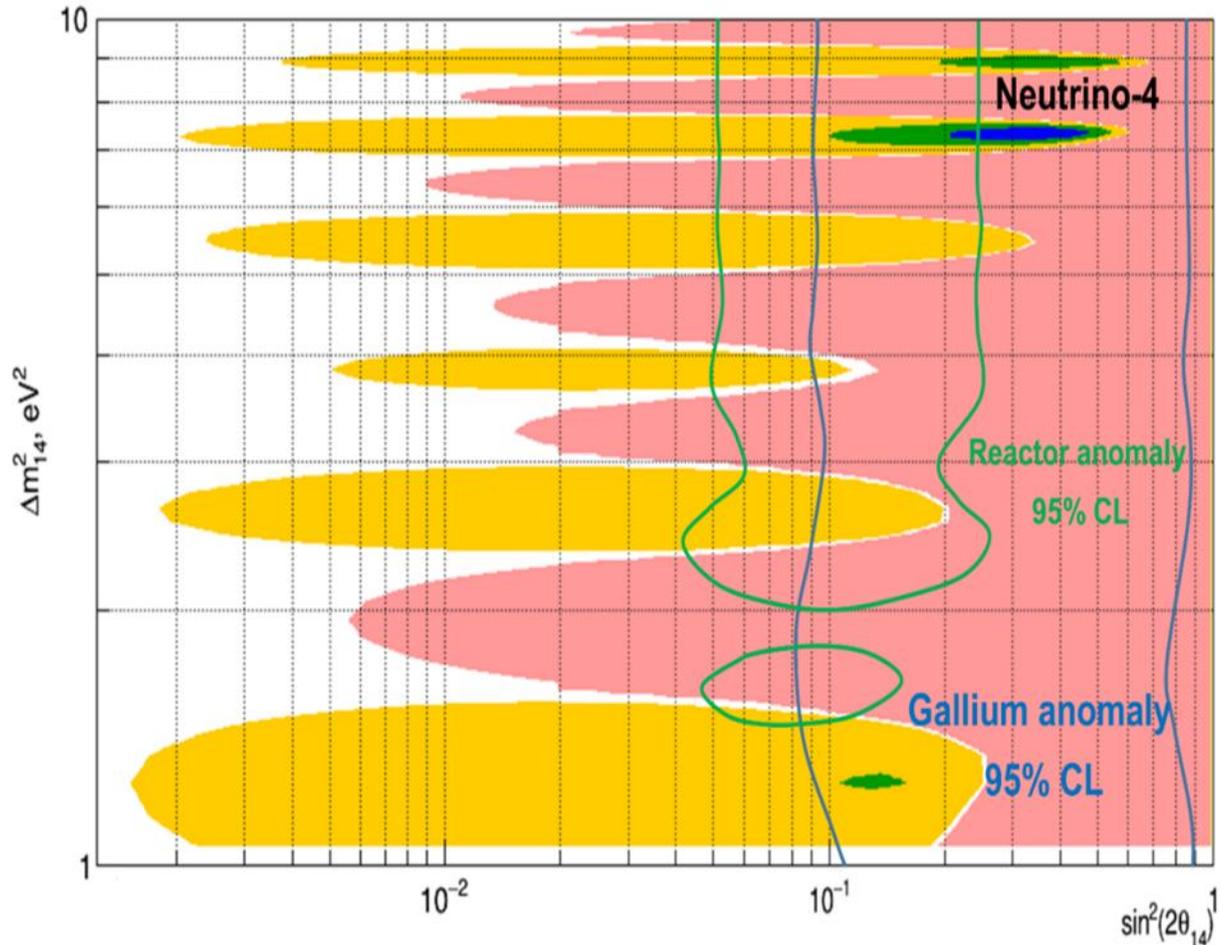
*2.2 MiniBooNE, LSND на ускорителях*

*2.3 эксперимента IceCube*

*2.4 эксперимента BEST с нейтринным источником Cr51*

*2.5 эксперимента MicroBoone*

Сравнение результатов эксперимента Нейтрино-4  
с результатами реакторной и галлиевой аномалий до 2021 года



$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.36 \pm 0.12 (2.9\sigma)$$

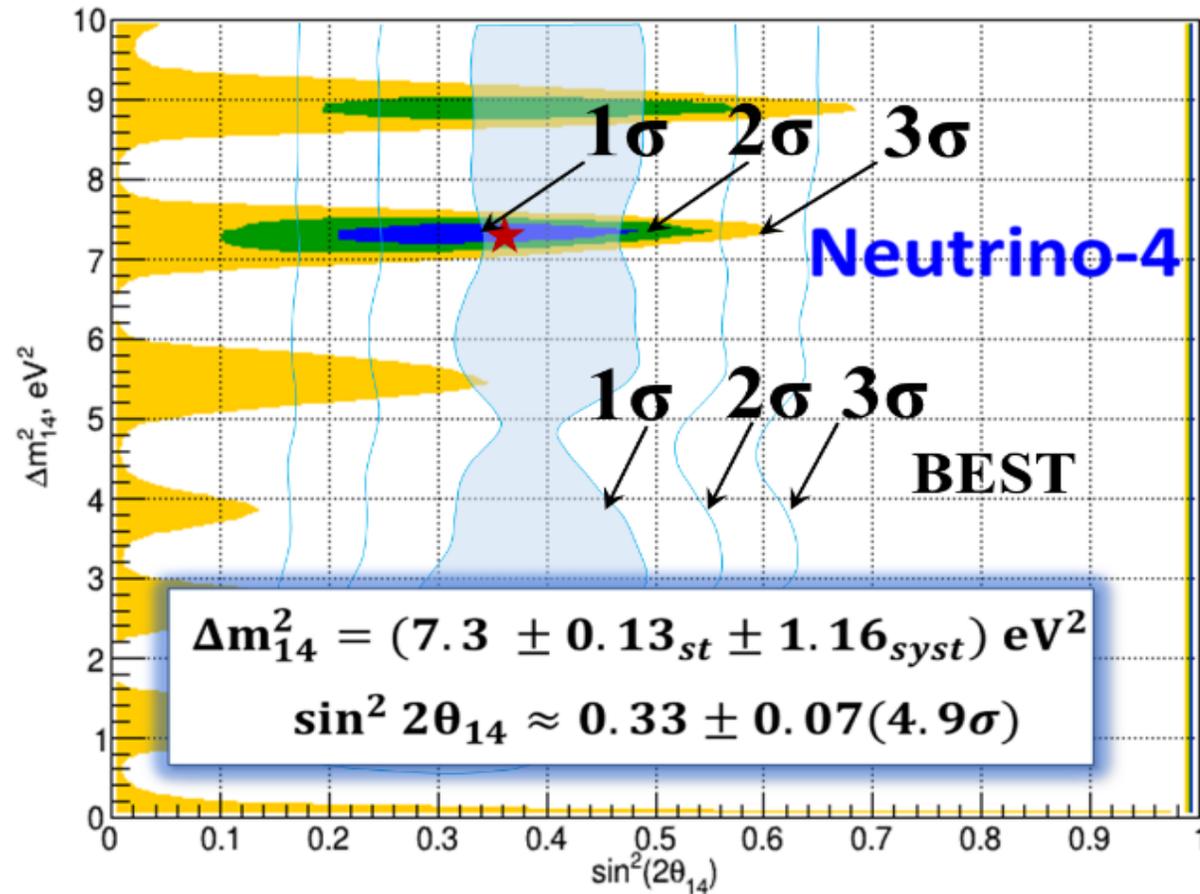
**Neutrino-4**

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

$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.32 \pm 0.10 (3.2\sigma)$$

**gallium anomaly**

# Сравнение результатов эксперимента Нейтрино-4 с результатами эксперимента BEST



1. Эксперимент «Нейтрино-4» направлен на прямое измерение параметра осцилляции  $\sin^2 2\theta_{14}$ . На больших расстояниях дефицит равен  $\frac{1}{2} \sin^2 2\theta_{14}$ , из-за усреднения по энергетическому спектру.

2. Следовательно, чтобы сравнить результаты эксперимента Neutrino-4 с RAA и GA, можно использовать значение  $\sin^2 2\theta_{14}$  для получения дефицита или наоборот.

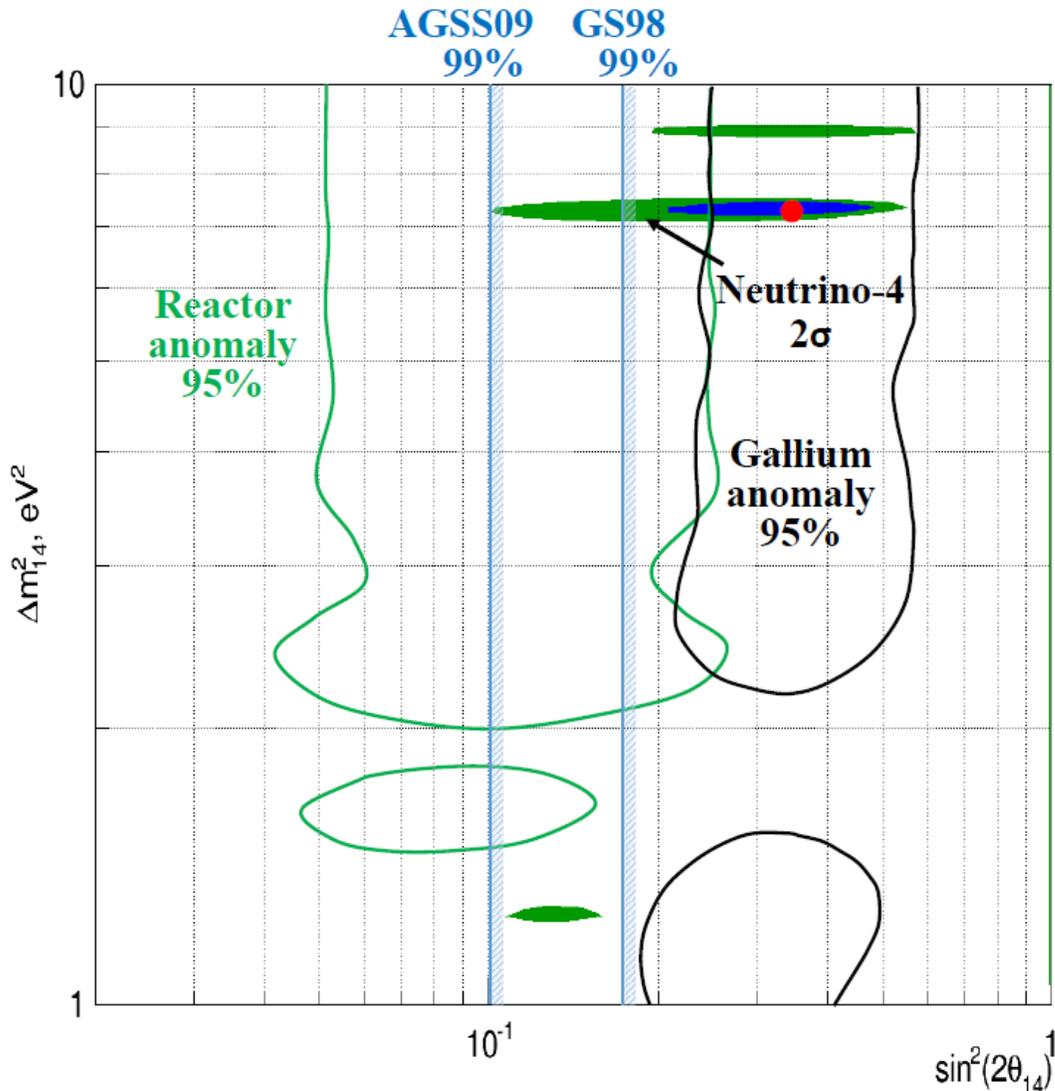
Мы предпочитаем использовать значение параметра колебаний  $\sin^2 2\theta_{14}$  в нашем сравнительном анализе.

Дефицит нейтрино в галлиевых экспериментах с учетом нового результата эксперимента BEST составляет  $0.84 \pm 0.04$  [1] и соответствует  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.32 \pm 0.08(4\sigma)$ . Этот результат подтверждает результат эксперимента Нейтрино-4  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.36 \pm 0.12(2.9\sigma)$ . Комбинированное значение Нейтрино-4 и нового значения ГА составляет  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07(4.9\sigma)$ .

[1] 2109.11482 Gavrin arXiv

After the BEST measurements the Ga anomaly looks more pronounced; the weighted average value of the neutrino capture rate relative to the expected value for all Ga experiments is 0.80 (0.05), accounting for the correlated uncertainty for . If one ignores the excited state contribution to , the value would increase to 0.84 (0.04), but still be significantly below 1.

# 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  $0.32 \pm 0.08$  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)

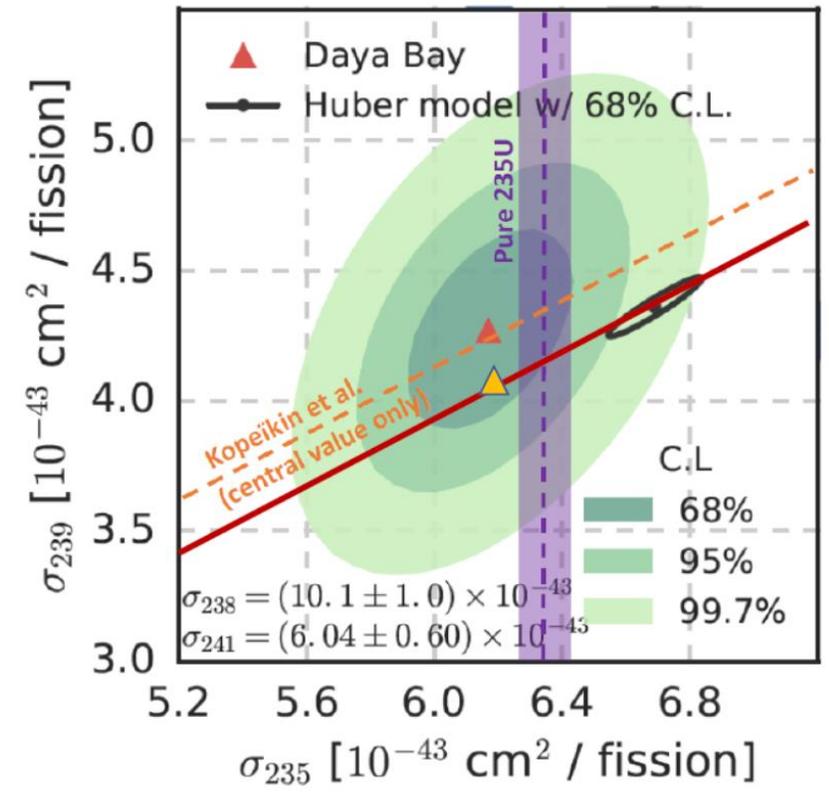
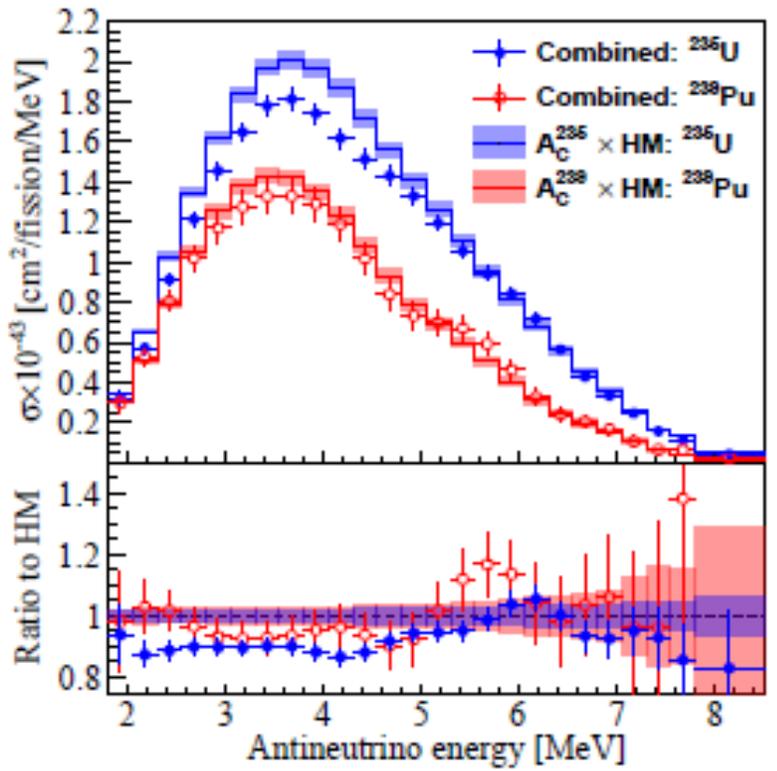
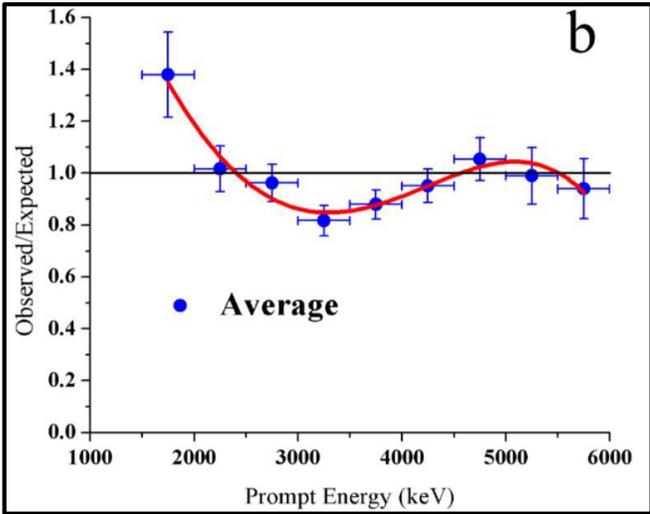
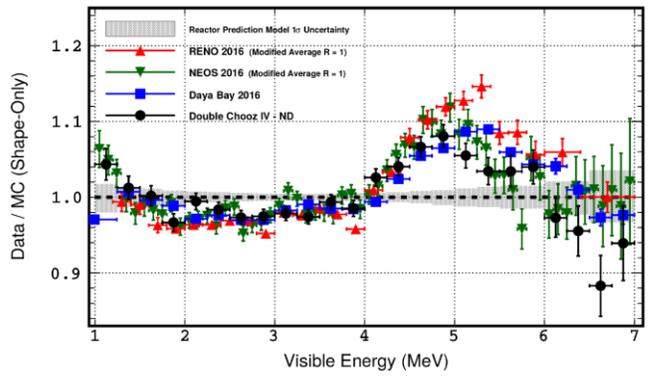
**Разница оценок между двумя моделями составляет 1.8 раза**

**Прямые эксперименты  
или побочный продукт  
на фоне сложных процессов?**

## Расхождение между областью РАА и Нейтрино4 +ГА(BEST)

1. Расхождение между областью РАА и областью эксперимента Нейтрино4 +ГА(BEST) составляет **2.3 $\sigma$**  в основном из-за большой ошибки РАА. Это требует детального рассмотрения возможных причин в первую очередь в РАА.
2. Интерпретация измерений РАА основана на рассчитанном спектре, который все еще имеет необъяснённые расхождения с измеренным спектром. Таким образом расчёты показывают, что есть расхождения по интегралам спектров и по их формам.
3. Есть так называемый «бамп». Если есть превышение в спектре в области 5 МэВ, то какие-то изотопы и распады не учтены. Но модель Хубера-Мюллера этого не предполагает. Зачем две проблемы – спектр и дефицит, хватает одной. С одной стороны дефицит, а с другой стороны профицит. Что-то не ладно в расчётах.
4. Если есть дефицит, то логичнее, что дефицит одинаковый по всему спектру из-за наличия осцилляций, а превышение в спектре в области 5 МэВ, потому что какие-то изотопы и распады не учтены. Надо искать.
5. Следует отметить, что в основе РАА лежит достаточно сложный метод абсолютных измерений, но в эксперименте Нейтрино-4 используется метод относительных измерений и не требует точного знания о спектре реакторных антинейтрино. Эксперимент BEST использует хорошо известный спектр монохроматических нейтрино и тоже является более надёжным. Он использует метод, успешно применённый ранее в Российско-Американского эксперимента SAGE.

# 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 $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07(4.9\sigma)$ .

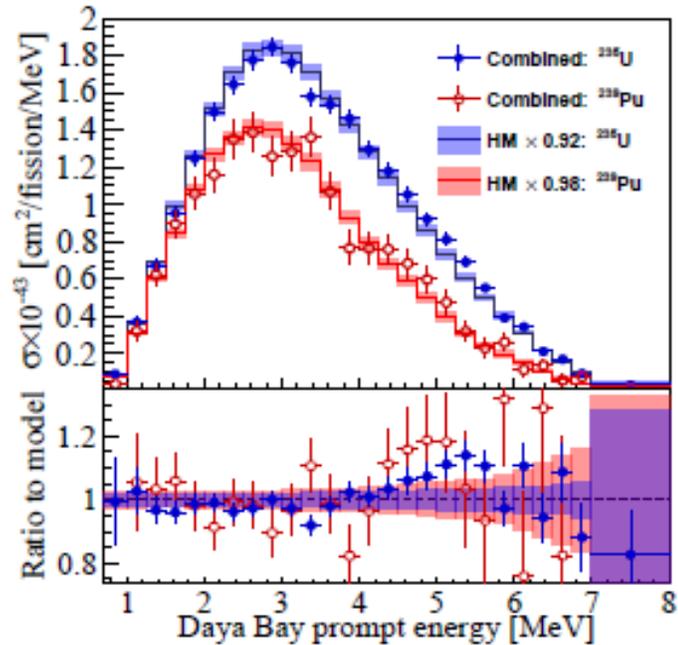


FIG. 3. (Top) The extracted  $^{235}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$  spectra in Daya Bay's prompt energy from the combined analysis of the Daya Bay and PROSPECT data. The corresponding scaled Huber-Mueller (HM) model predictions are overlaid. The error bars in the data points are the square root of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

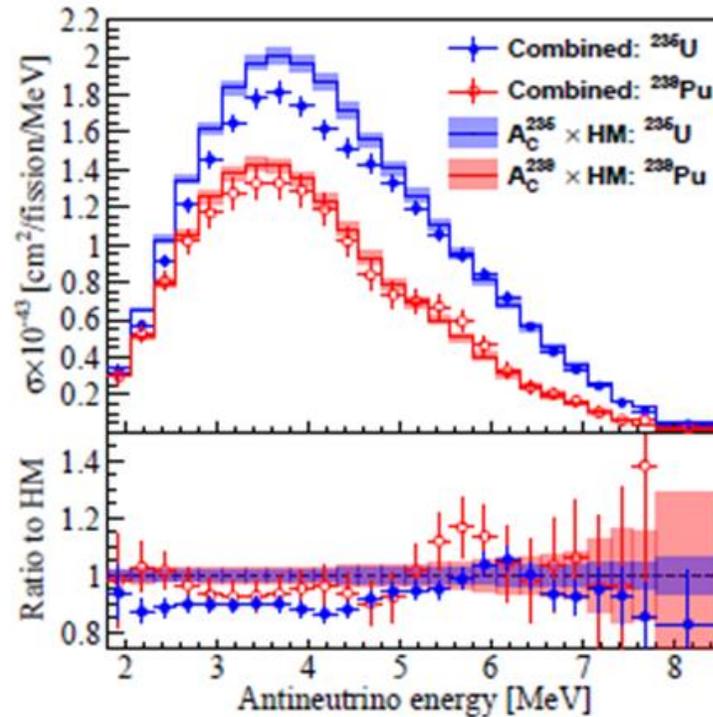
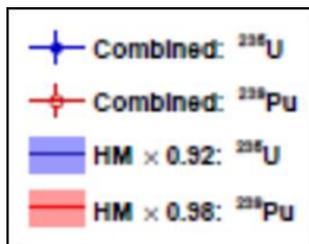
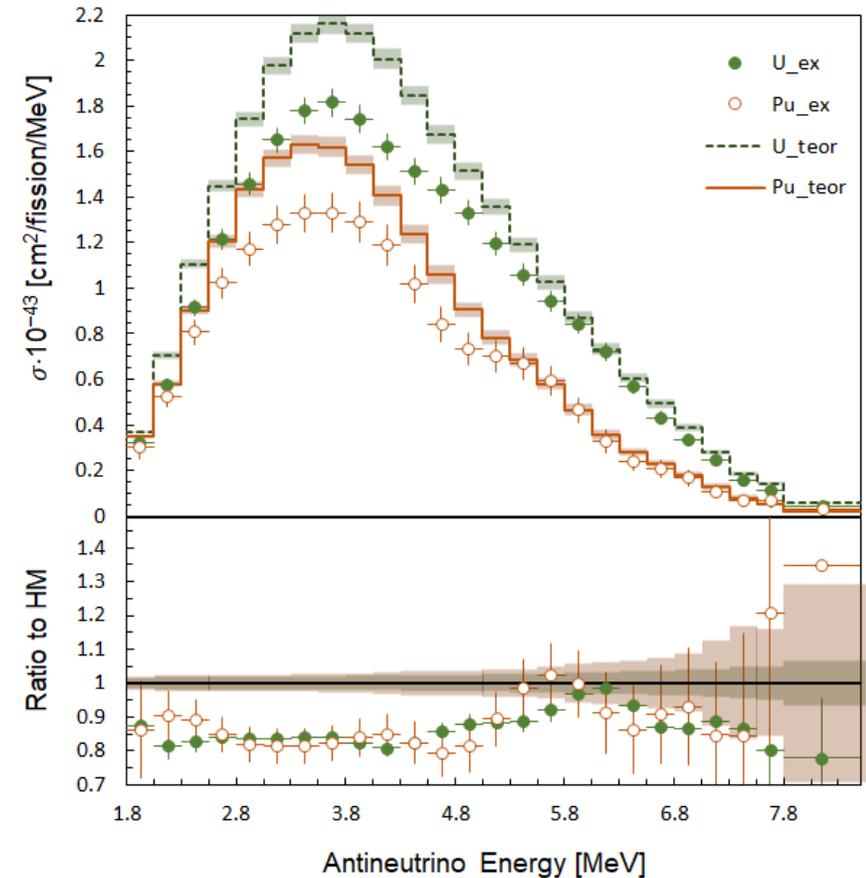
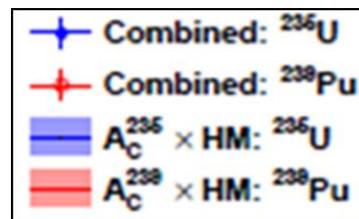


FIG. 5. (Top)  $^{235}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$  antineutrino spectra unfolded from the jointly deconvolved Daya Bay and PROSPECT measurements. (Bottom) Ratio of the measurements to their respective models, which are corrected by the smearing matrices  $A_c$  in both panels.



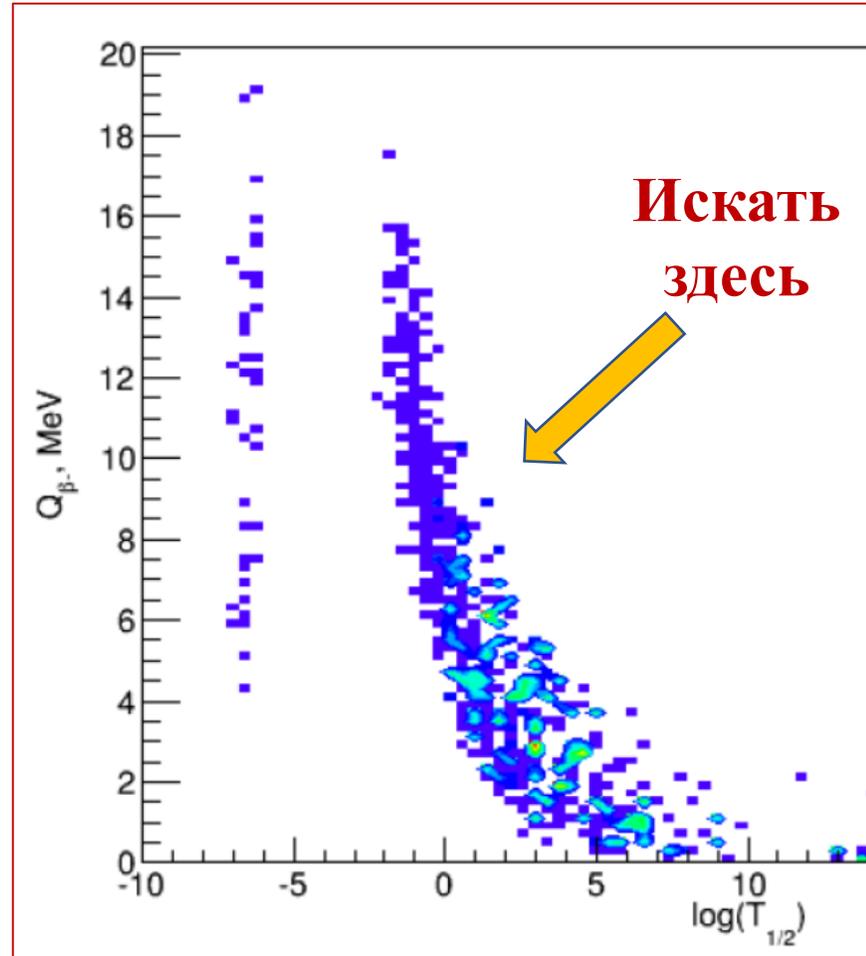
Спектры  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  после анализа с учётом формы спектра и с учётом процесса осцилляций с  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07(4.9\sigma)$ .

# 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<br>± 0.06 | 9.07 ± 0.32               | 0.35 ± 0.02       | 8.55 ± 0.22  | 209.20<br>± 0.46 |
| $U^{238}$  | 205.93<br>± 0.13 | 11.00 ± 0.80              | 0.33 ± 0.03       | 10.92 ± 0.28 | 205.52<br>± 0.96 |
| $Pu^{239}$ | 207.32<br>± 0.08 | 7.22 ± 0.27               | 0.30 ± 0.02       | 11.19 ± 0.28 | 209.99<br>± 0.60 |
| $Pu^{241}$ | 211.04<br>± 0.12 | 8.71 ± 0.30               | 0.29 ± 0.03       | 11.50 ± 0.25 | 213.60<br>± 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

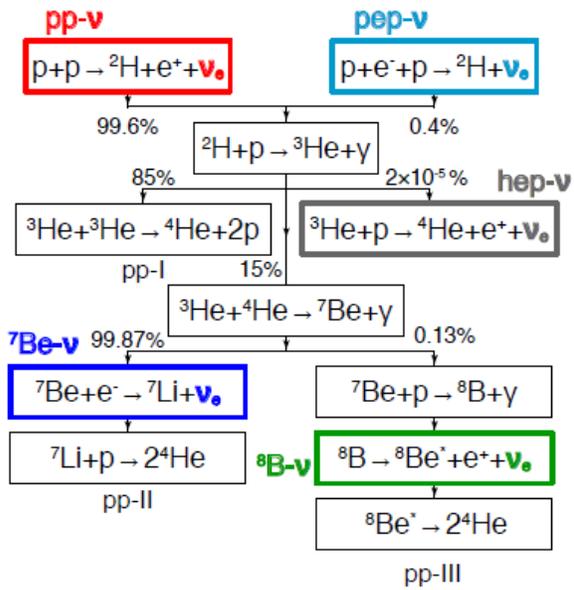
|                                       |         |
|---------------------------------------|---------|
| Кинетическая энергия осколков         | 167 МэВ |
| Мгновенные нейтроны                   | 5 МэВ   |
| Электроны $\beta^-$ -распада          | 5 МэВ   |
| Антинейтрино $\beta^-$ -распада       |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

## Противоречие между результатами экспериментов Neutrino-4 and BEST и ограничением на параметры стерильного нейтрино из анализа измерений потока солнечных нейтрино

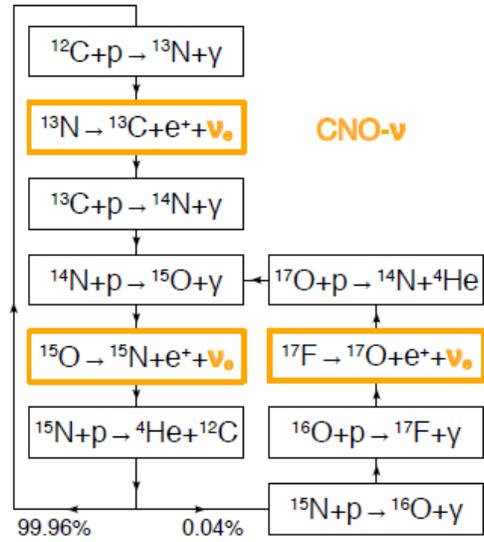
1. Интерпретация измерений потока солнечных нейтрино опирается на теоретически рассчитанное значение полного потока солнечных нейтрино. Это значение рассчитывается на основе Стандартной Солнечной Модели, а значит включает неопределённости этой модели и **нерешённую проблему металличности Солнца**.
2. Вероятность обнаружения электронного нейтрино в полном потоке солнечных нейтрино зависит **от всех углов смешивания**. Для упрощения расчётов, **часть параметров ( $\theta_{13}, \theta_{24}, \dots$ ) фиксируется** на основе результатов реакторных или ускорительных нейтринных экспериментов. Для нейтрино, рождающихся при распаде  $^8\text{B}$ , теоретический поток включает **учёт эффекта MSW**, для расчёта которого используются **распределение плотности электронов в Солнце и адиабатическое приближение**.

**Результат Нейтрино-4 получен в рамках относительных измерений и не зависит от моделей.** Для правильного совместного анализа результатов измерений потока солнечных нейтрино и результата Нейтрино-4, необходимо пересмотреть результаты измерений всех параметров матрицы смешивания в рамках модели  $3+1$ , учитывая значения параметров стерильного нейтрино полученные в рамках эксперимента Нейтрино-4 и унитарность  $U_{4 \times 4}$ .

pp chain

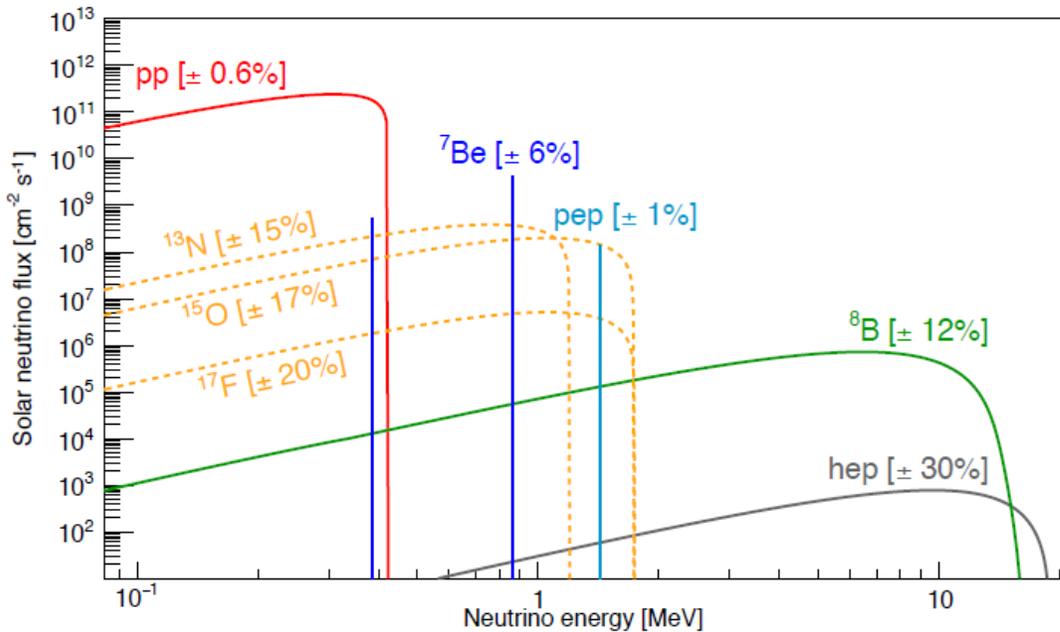


CNO cycle



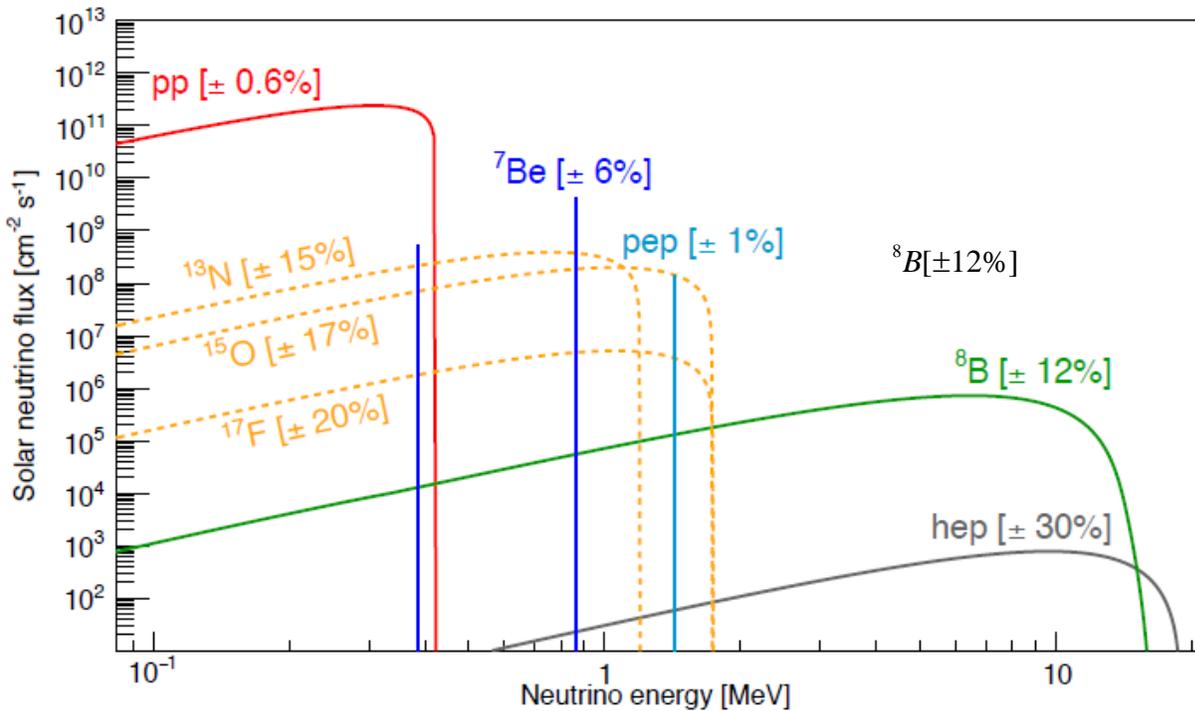
Разница нейтринных потоков для двух моделей  
металличности солнца. HZ – высокая металличность,  
LZ – низкая металличность

| 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             | $\times 10^{10}$ |
| ${}^7\text{Be}$   | 4.93(1.0 ± 0.06)  | 4.50(1.0 ± 0.06)   | 8.9              | $\times 10^9$    |
| <i>pep</i>        | 1.44(1.0 ± 0.01)  | 1.46(1.0 ± 0.009)  | -1.4             | $\times 10^8$    |
| ${}^8\text{B}$    | 5.46(1.0 ± 0.12)  | 4.50(1.0 ± 0.12)   | -17.6            | $\times 10^6$    |
| <i>hep</i>        | 7.98(1.0 ± 0.30)  | 8.25(1.0 ± 0.12)   | -3.4             | $\times 10^3$    |
| <i>CNO-cycle</i>  |                   |                    |                  |                  |
| ${}^{13}\text{N}$ | 2.78(1.0 ± 0.15)  | 2.04(1.0 ± 0.14)   | 26.6             | $\times 10^8$    |
| ${}^{15}\text{O}$ | 2.05(1.0 ± 0.17)  | 1.44(1.0 ± 0.16)   | 29.7             | $\times 10^8$    |
| ${}^{17}\text{F}$ | 5.29(1.0 ± 0.20)  | 3.26(1.0 ± 0.18)   | 38.3             | $\times 10^6$    |
| CNO               | 4.88(1.0 ± 0.11)  | 3.51(1.0 ± 0.10)   | 28.1             | $\times 10^8$    |

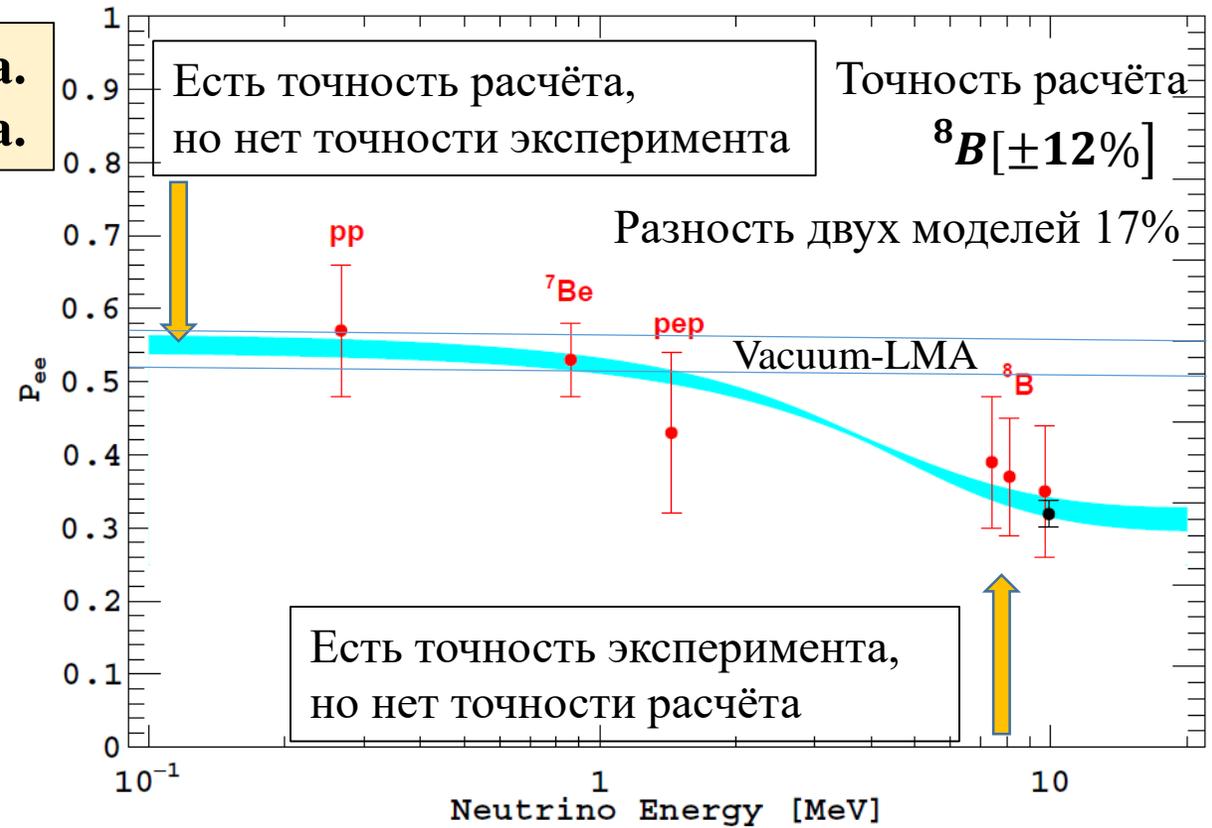


Данные взяты из статьи коллаборации Borexino  
*Universe* **2021**, 7(7), 231 [[arXiv:2105.13858v1](https://arxiv.org/abs/2105.13858v1)]

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

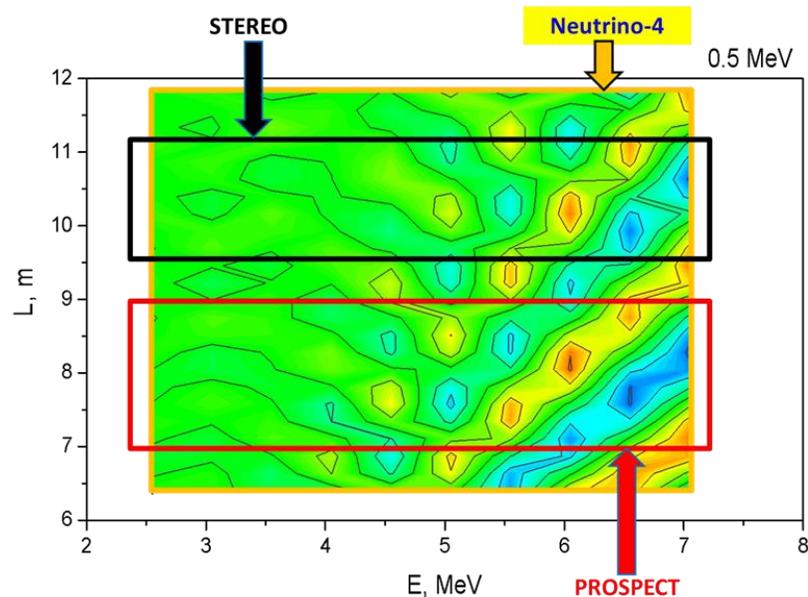
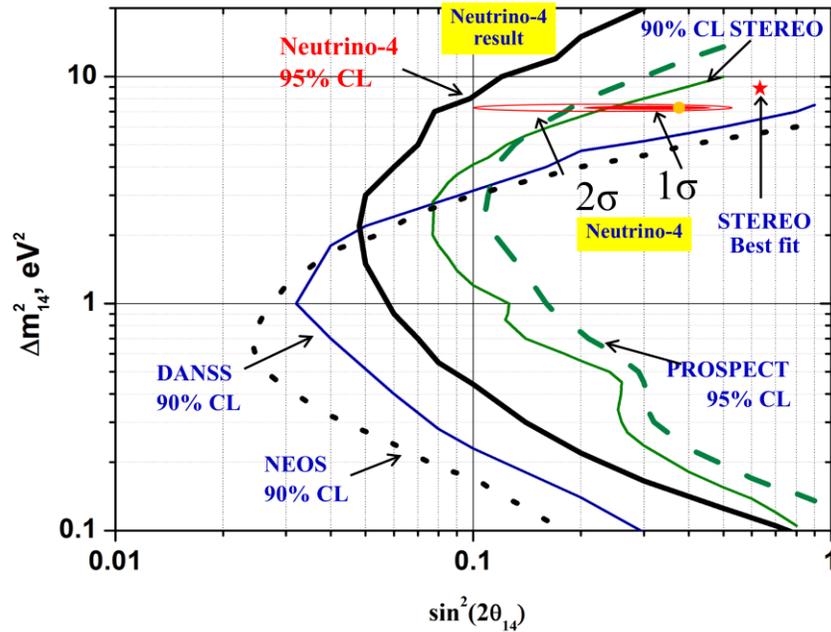


Недавняя работа описывающая ограничения на основе глобального анализа [arXiv:2109.14898v1](https://arxiv.org/abs/2109.14898v1)  
Из **303** точек взятых в рассмотрение больше половины относятся к измерениям нейтрино от распада <sup>8</sup>B, так как эксперименты SK и SNO чувствительны только к нейтрино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



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

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



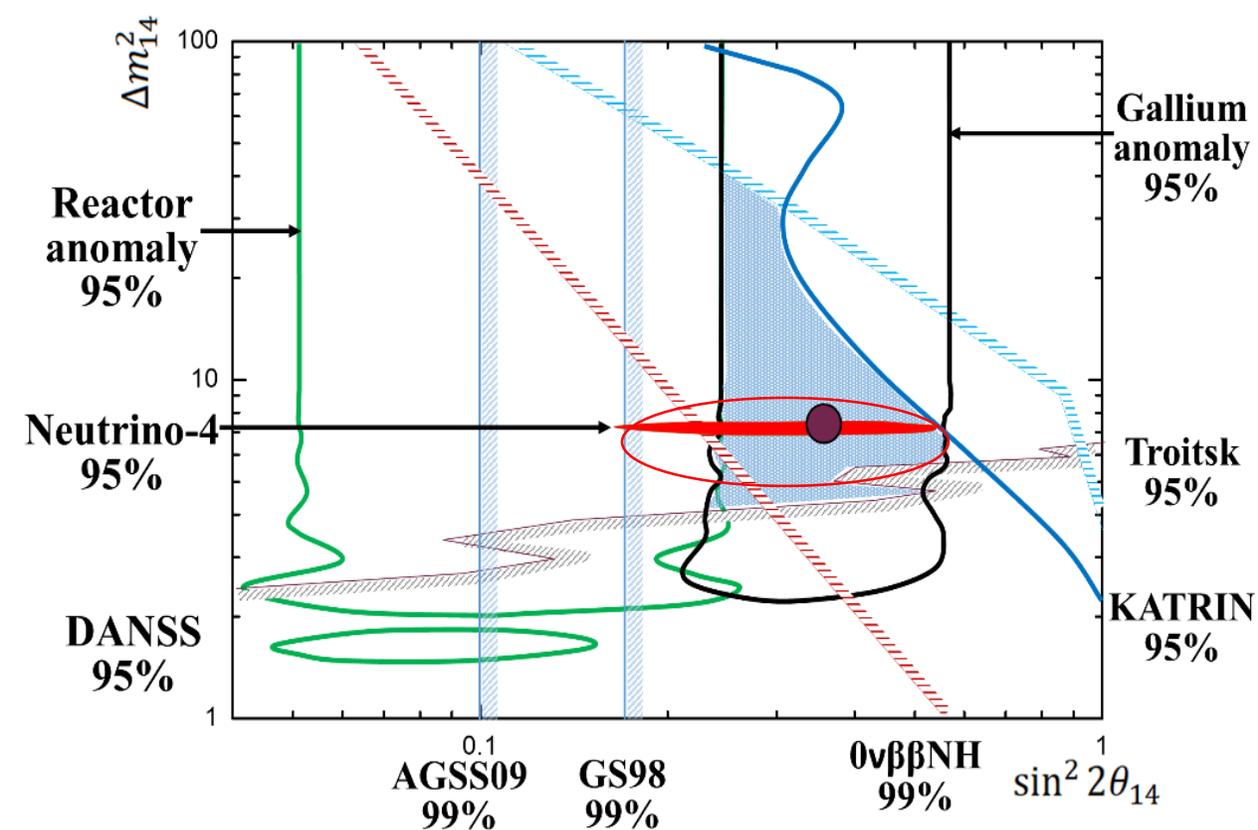
1. Эксперименты **DANSS** и **NEOS** на АЭС имеют существенно меньшую чувствительность к большим значениям параметра  $\Delta m_{14}^2$  из-за больших размеров активной зоны реактора 3-4 метра. Для осцилляций с периодом 1,4 м для энергии нейтрино 4 МэВ происходит усреднение эффекта уже в пределах зоны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

# СТРУКТУРА МОДЕЛИ НЕЙТРИНО $3 + 1$

## СТРУКТУРА МОДЕЛИ НЕЙТРИНО 3 + 1 И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & U_{e4} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} & U_{\mu4} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} & U_{\tau4} \\ U_{s1} & U_{s2} & U_{s3} & U_{s4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} |U_{e4}|^2 &= \sin^2(\theta_{14}) \\ |U_{\mu4}|^2 &= \sin^2(\theta_{24}) \cdot \cos^2(\theta_{14}) \\ |U_{\tau4}|^2 &= \sin^2(\theta_{34}) \cdot \cos^2(\theta_{24}) \cdot \cos^2(\theta_{14}) \end{aligned}$$

$$P_{\nu_e \nu_e} = 1 - 4|U_{e4}|^2(1 - |U_{e4}|^2) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right) = 1 - \sin^2 2\theta_{ee} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right)$$

$$P_{\nu_\mu \nu_\mu} = 1 - 4|U_{\mu4}|^2(1 - |U_{\mu4}|^2) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E_{\nu_\mu}}\right) = 1 - \sin^2 2\theta_{\mu\mu} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E_{\nu_\mu}}\right)$$

$$P_{\nu_\mu \nu_e} = 4|U_{e4}|^2|U_{\mu4}|^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right) = \sin^2 2\theta_{\mu e} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right)$$

**Соотношения параметров осцилляций, необходимые для сравнительного анализа результатов экспериментов:**

$$\begin{aligned}\sin^2 2\theta_{ee} &\equiv \sin^2 2\theta_{14} \\ \sin^2 2\theta_{\mu\mu} &= 4 \sin^2 \theta_{24} \cos^2 \theta_{14} (1 - \sin^2 \theta_{24} \cos^2 \theta_{14}) \approx \sin^2 2\theta_{24} \\ \sin^2 2\theta_{\mu e} &= 4 \sin^2 \theta_{14} \sin^2 \theta_{24} \cos^2 \theta_{14} \approx \frac{1}{4} \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 2\theta_{24}\end{aligned}$$

**Первый важный вывод модели 3 + 1 - частота осцилляций во всех процессах должна быть одинаковой, т.е. определяется величиной  $\Delta m_{14}^2$**

**Второе важное соотношение для экспериментальной проверки модели 3 + 1**

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

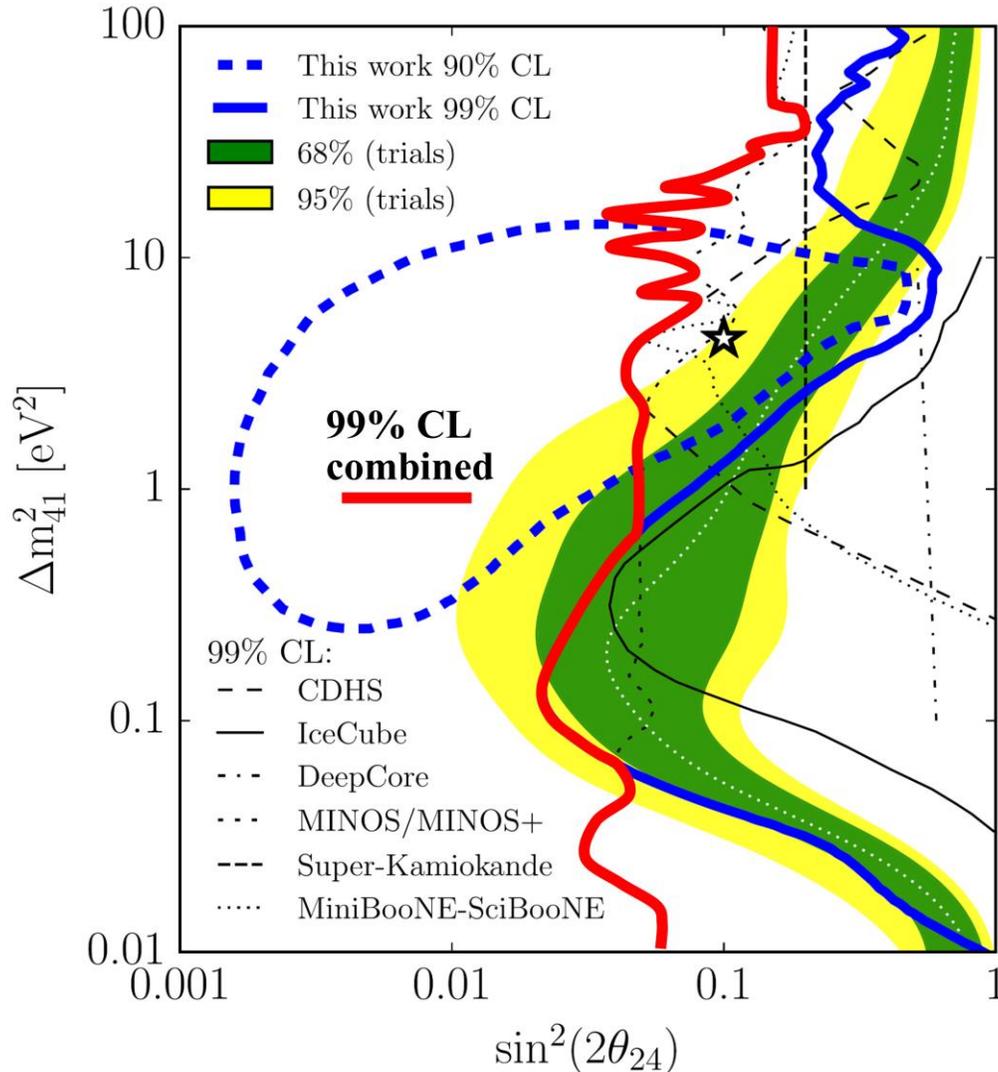
Эту связь можно интерпретировать довольно просто. Появление электронных нейтрино в пучке мюонных нейтрино это процесс второго порядка, т.е. переход мюонного нейтрино в стерильное нейтрино, а затем переход стерильного нейтрино в электронное нейтрино.

**3. 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**

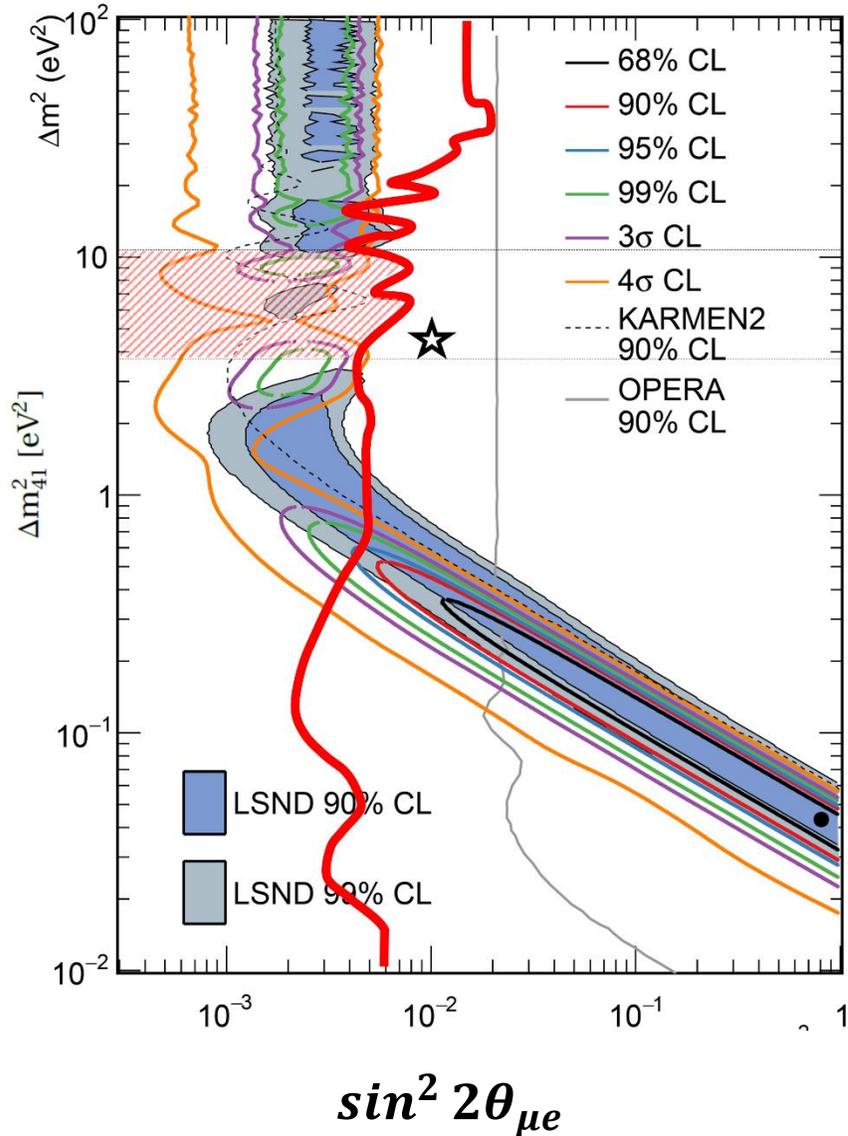
$$\sin^2 2\theta_{\mu e} \approx \frac{1}{4} \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 2\theta_{24}$$

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

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

$$\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07$$

# Проверка соотношения $\sin^2 2\theta_{\mu e} \approx \frac{1}{4} \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 2\theta_{24}$ нейтриной модели 3 + 1



Предел на  $\sin^2 2\theta_{24}$  99% CL (красная линия на плоскости  $\sin^2 2\theta_{24}$ ) переносится на плоскость  $\sin^2 2\theta_{\mu e}$  при значении  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07$  с учётом ошибки. Это даёт предел на плоскости  $\sin^2 2\theta_{\mu e}$  (тоже красная линия).

Красная линия исключает значения  $\sin^2 2\theta_{\mu e} > 5 \cdot 10^{-3}$  и соответственно экспериментальную область **appearance** при  $\sin^2 2\theta_{\mu e} > 5 \cdot 10^{-3}$  и  $\Delta m_{14}^2 < \sim 1 eV^2$ .

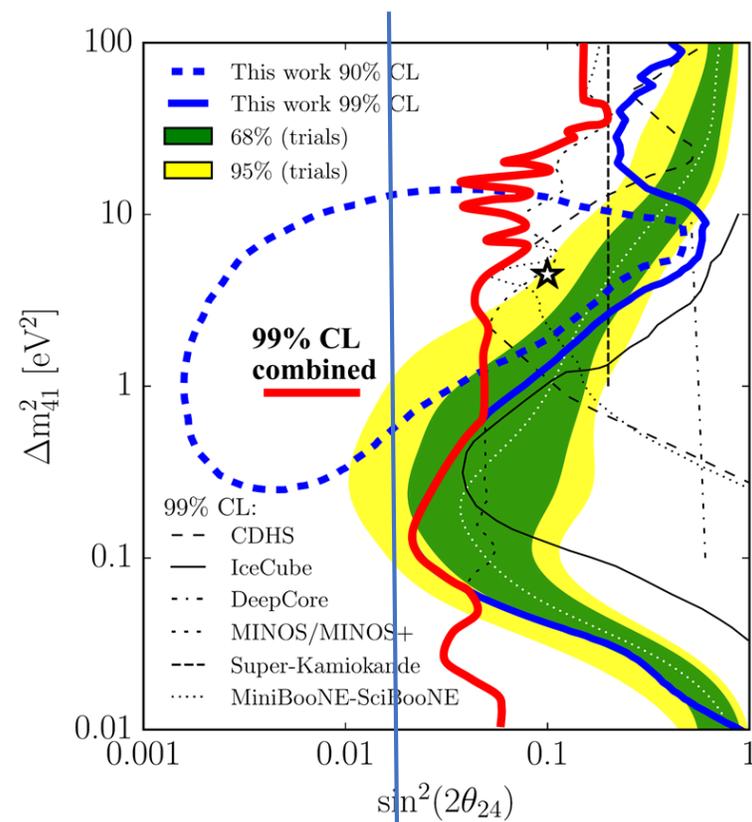
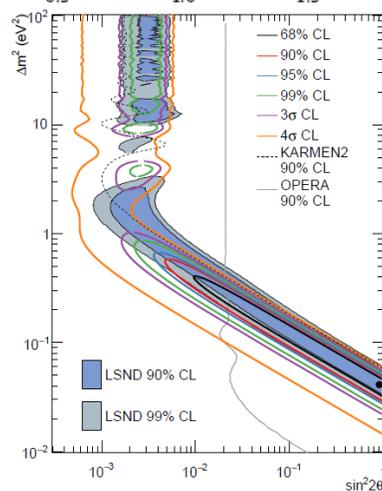
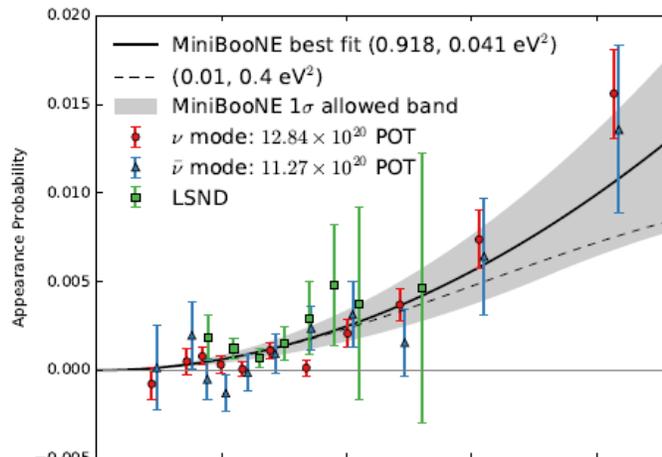
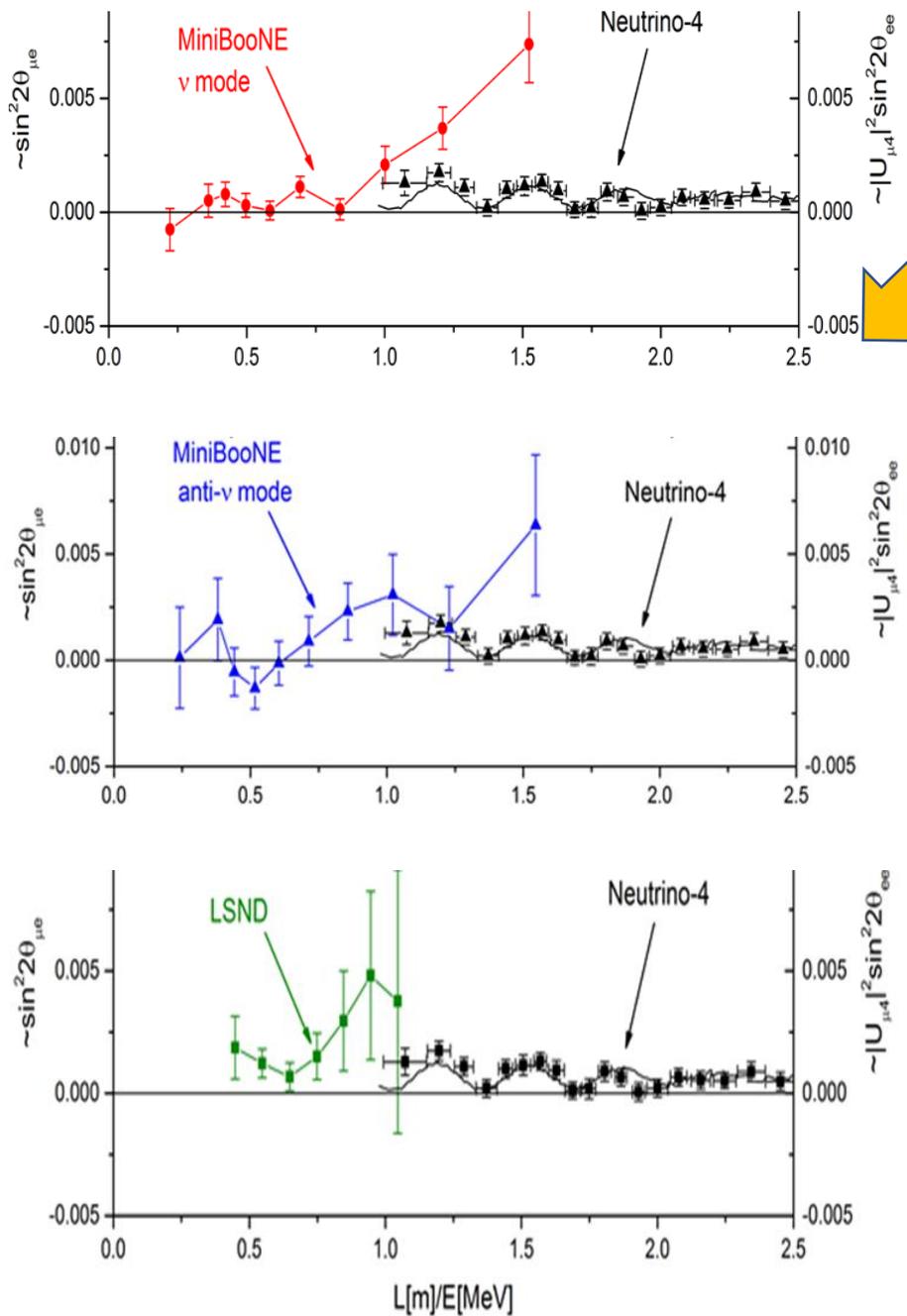
Заштрихованная область ограничена красной линией и горизонтальными линиями, которые соответствуют 99% ограничениям на  $\Delta m_{14}^2$  из эксперимента Нейтрино-4.

**1. Возможность согласования экспериментальных результатов экспериментов: Нейтрино-4, BEST, MiniBooNE, LSND, IceCube в рамках нейтриной модели 3+1 не закрыта.**

**2. Область значений экспериментов на **appearance****

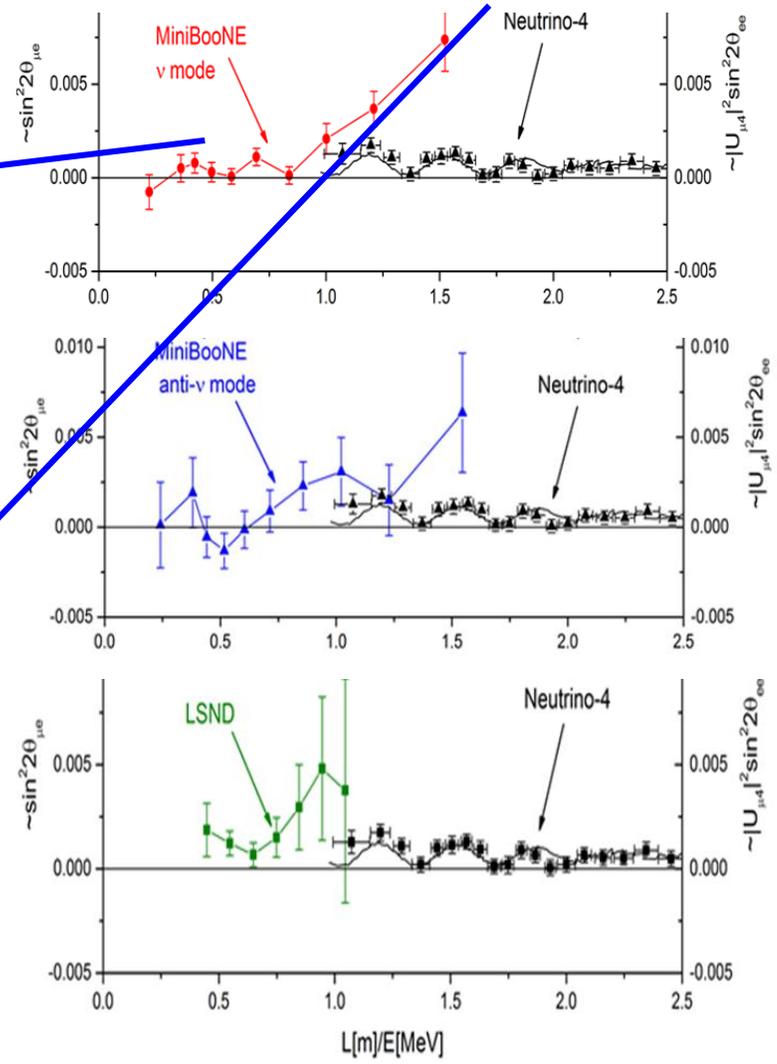
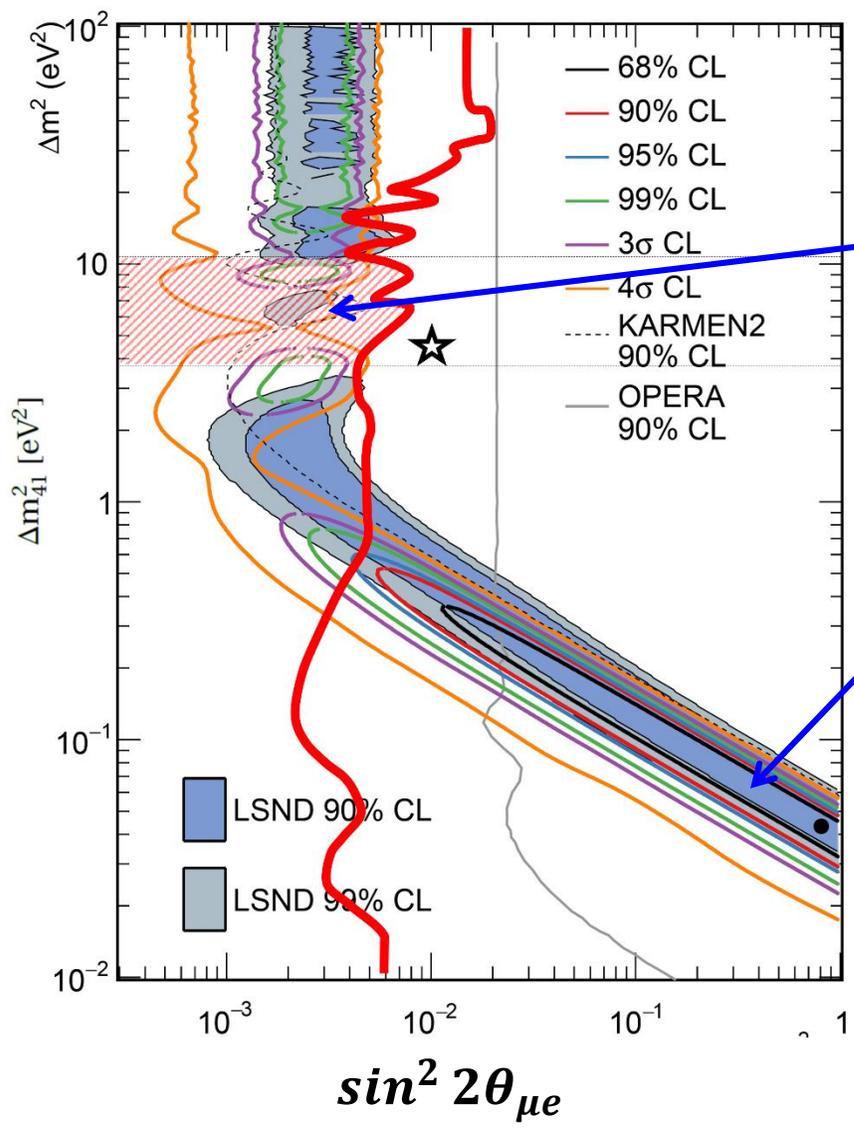
**не исключена, но ограничена данными на **disappearance** мюонных нейтрино при использовании  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07$  из экспериментов Нейтрино-4 + ГА(BEST) и данными на  $\Delta m_{14}^2 = 7.30 \pm 0.13_{st} \pm 1.16_{syst}$  и эксперимента Нейтрино-4.**

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  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07$

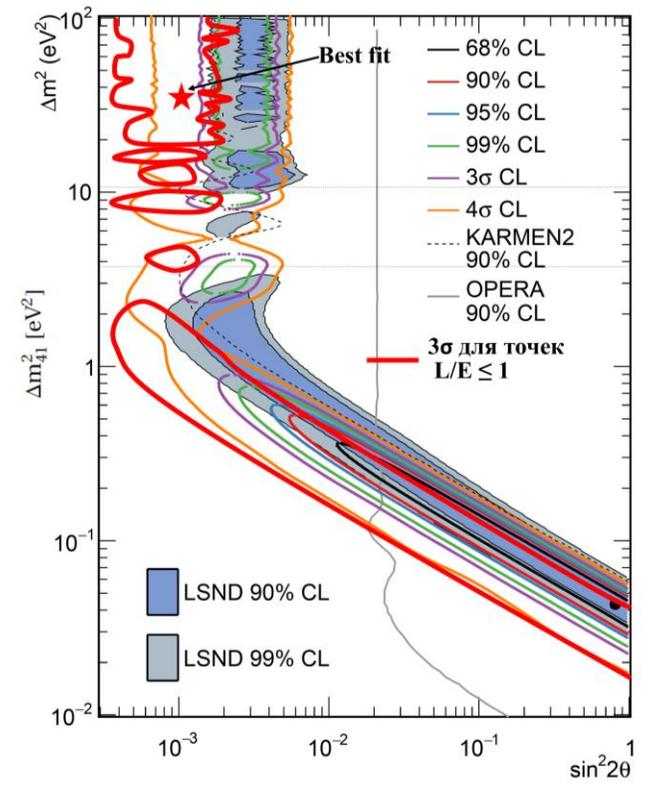


$\sin^2 2\theta_{24} = 2 \cdot 10^{-2}$

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  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07$



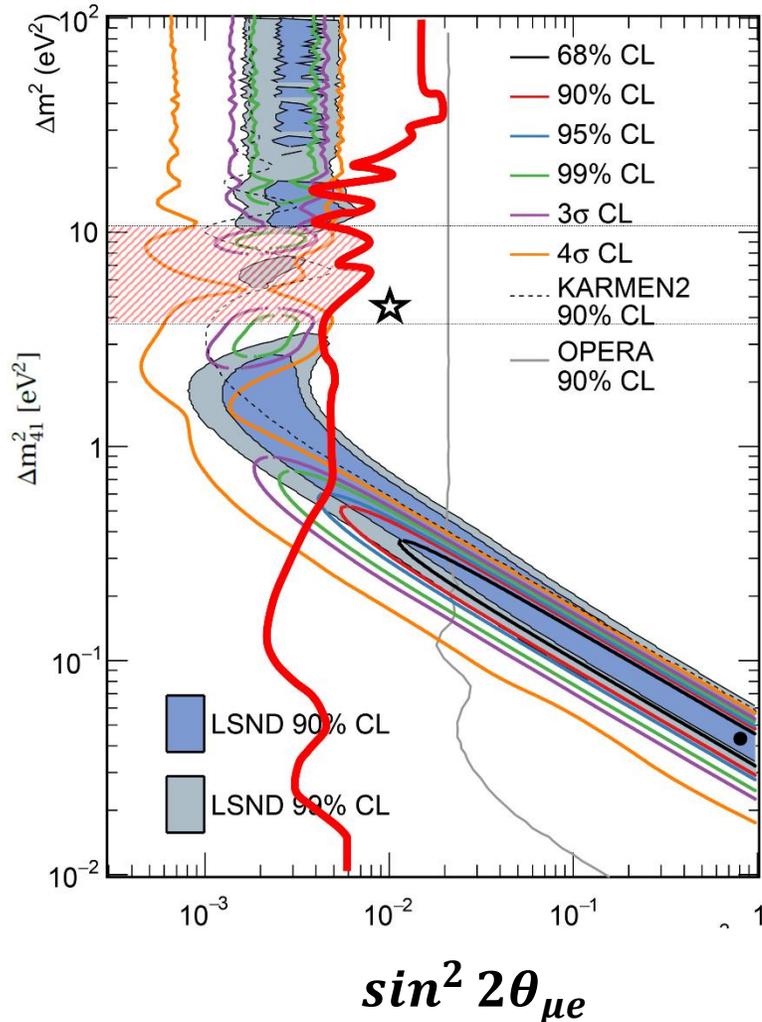
Анализ ограничений на плоскости  $\Delta m^2_{14}$ ,  $\sin^2 2\theta_{24}$  после обрезания точек при  $L/E > 1$ .



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

# Сравнение результатов данного анализа с ограничениями из эксперимента MicroBoone

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



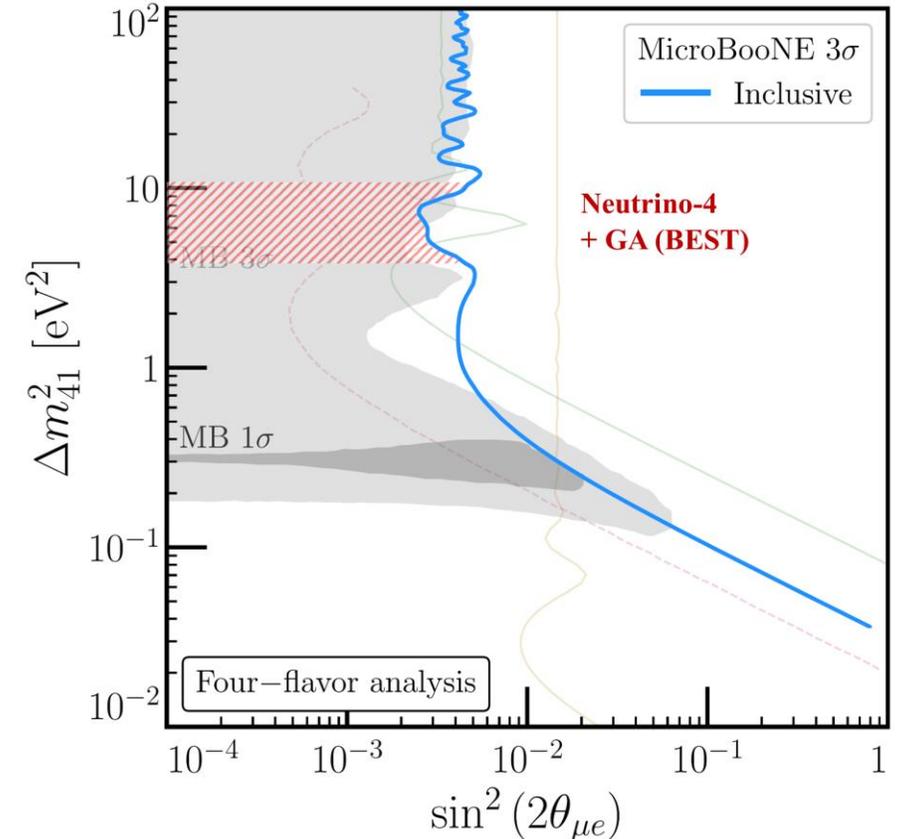
Эксперимент MicroBoone не закрыл область предсказаний из экспериментов Нейтрино-4 + ГА (BEST)



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.

### **3. Возможность экспериментальной проверки модели нейтрино $3 + 1$**

*3.1 Предсказание эффективной массы электронного  
нейтрино из эксперимента Нейтрино-4*

*3.2 Сравнение с экспериментами по измерению массы  
нейтрино в эксперименте KATRIN*

*3.3 Сравнение с ограничениями массы нейтрино из  
эксперимента GERDA*

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

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

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

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

$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.33 \pm 0.07 (4.9\sigma)$$

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

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

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

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; padding: 5px; background-color: #f0e68c; 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»  $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.33 \pm 0.07(4.9\sigma)$  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

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

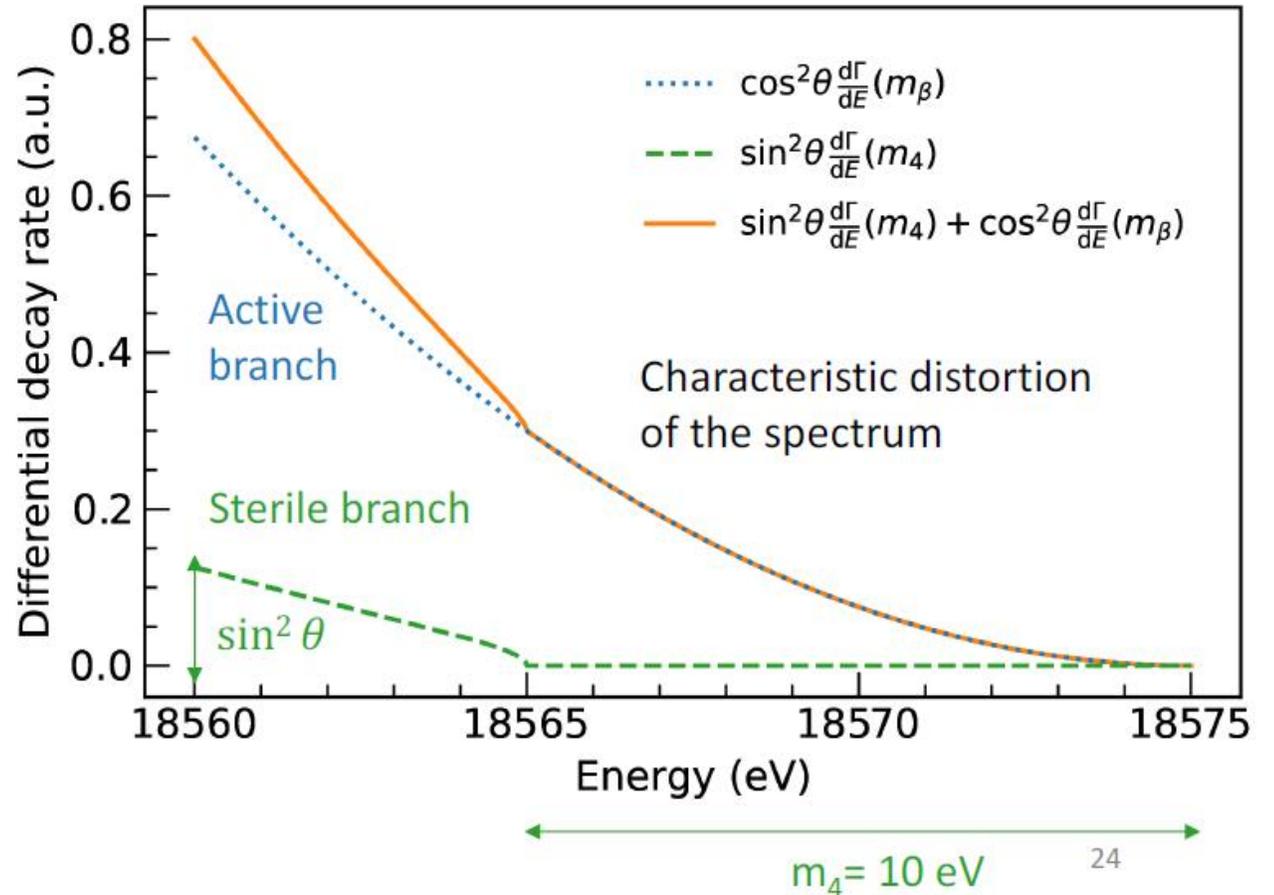
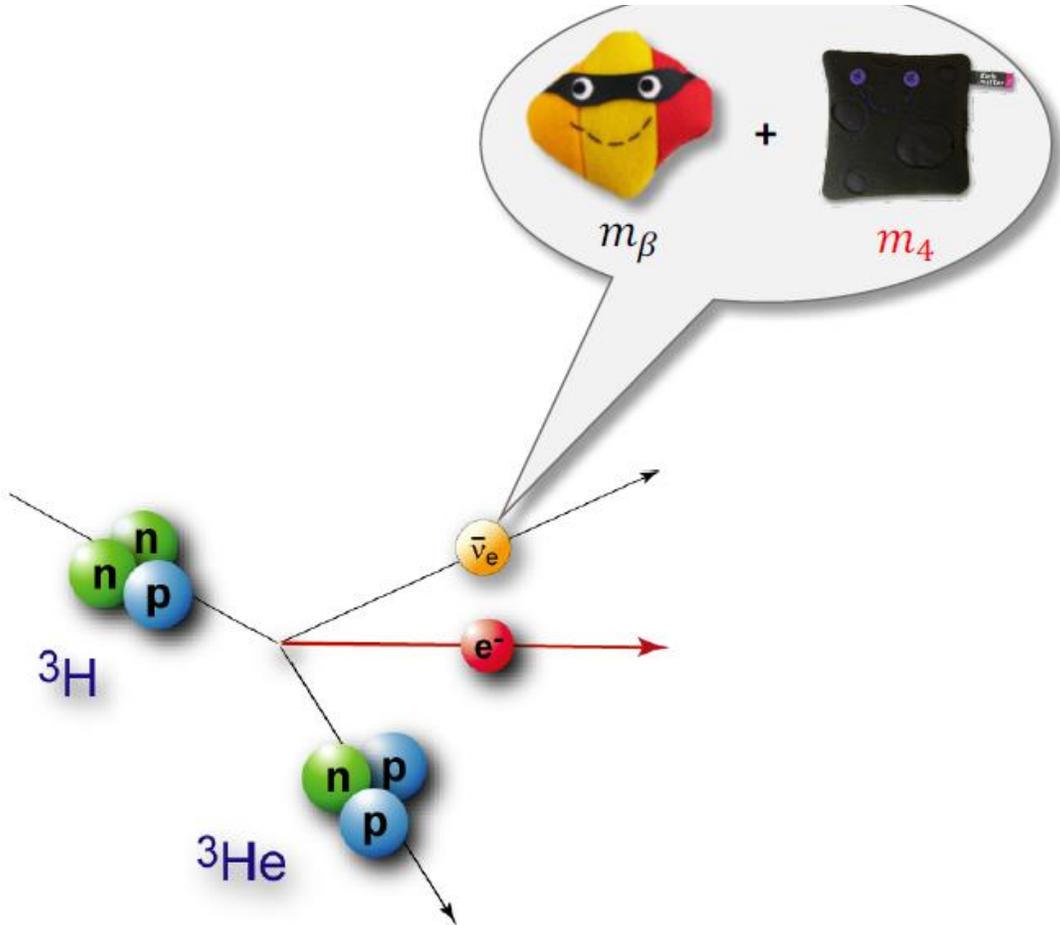
$$(m_{3\nu_e}^{\text{eff}})^2 = 0.26 \pm 0.34$$

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

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

*Neutrino4*

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



$$R_\beta(E, m_\nu) = \frac{G_F^2 \cos^2 \theta_C}{2\pi^3} |\mathcal{M}|^2 F(E, Z + 1)$$

$$\times (E + m_e) \sqrt{(E + m_e)^2 - m_e^2}$$

$$\times \sum_i \zeta_f \sqrt{(E_0 - E - V_i)^2 - m_\nu^2} \Theta(E_0 - E - V_i - m_\nu)$$

$$R_\beta^S(E, m'_\nu, m_4) = (1 - |U_{e4}|^2) R_\beta(E, m'_\nu) + |U_{e4}|^2 R_\beta(E, m_4)$$

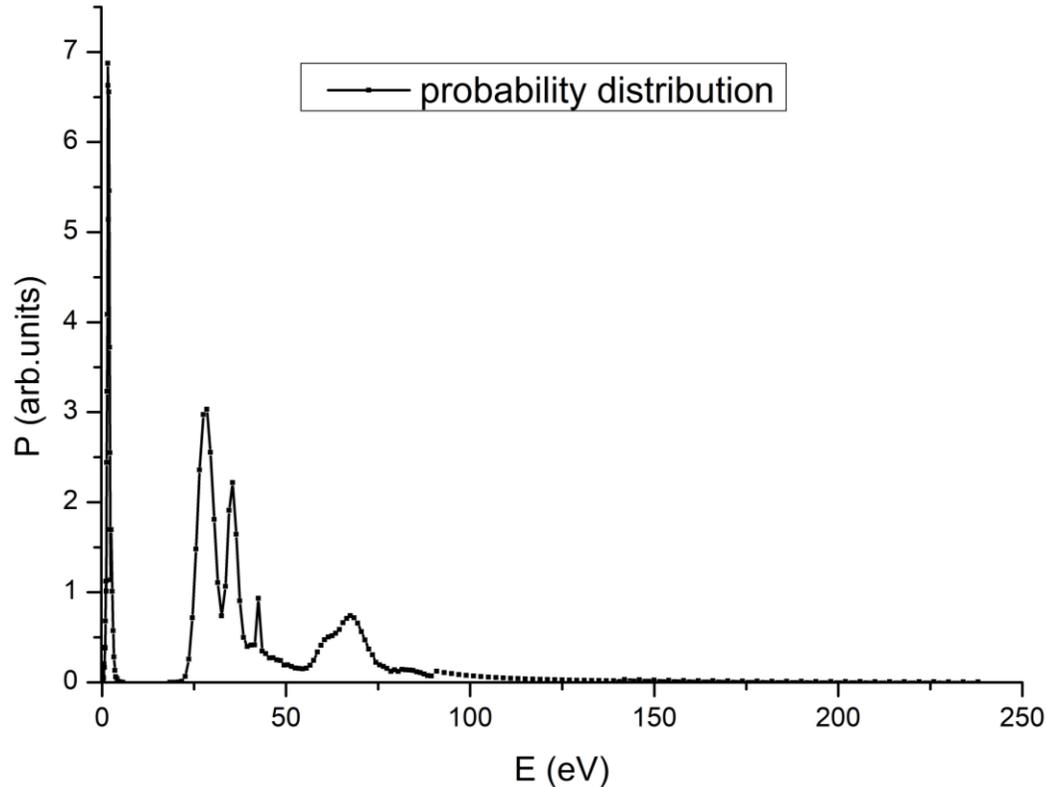


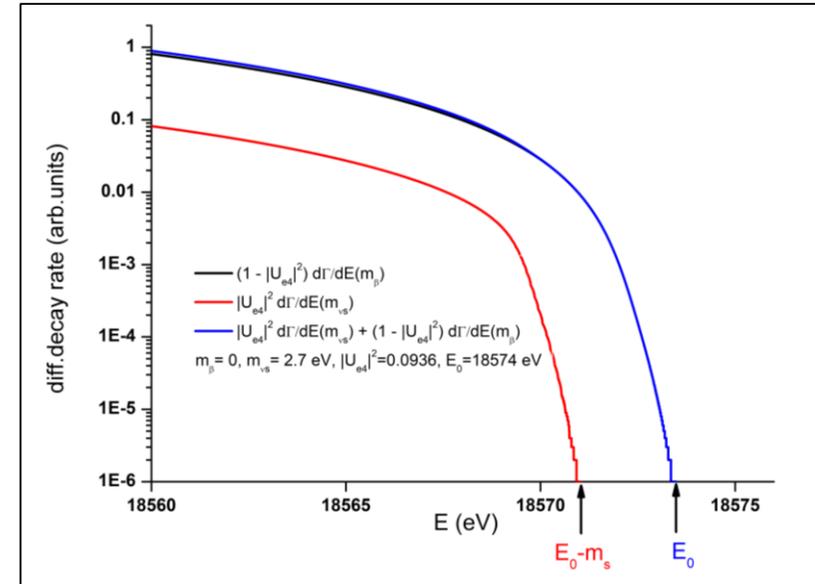
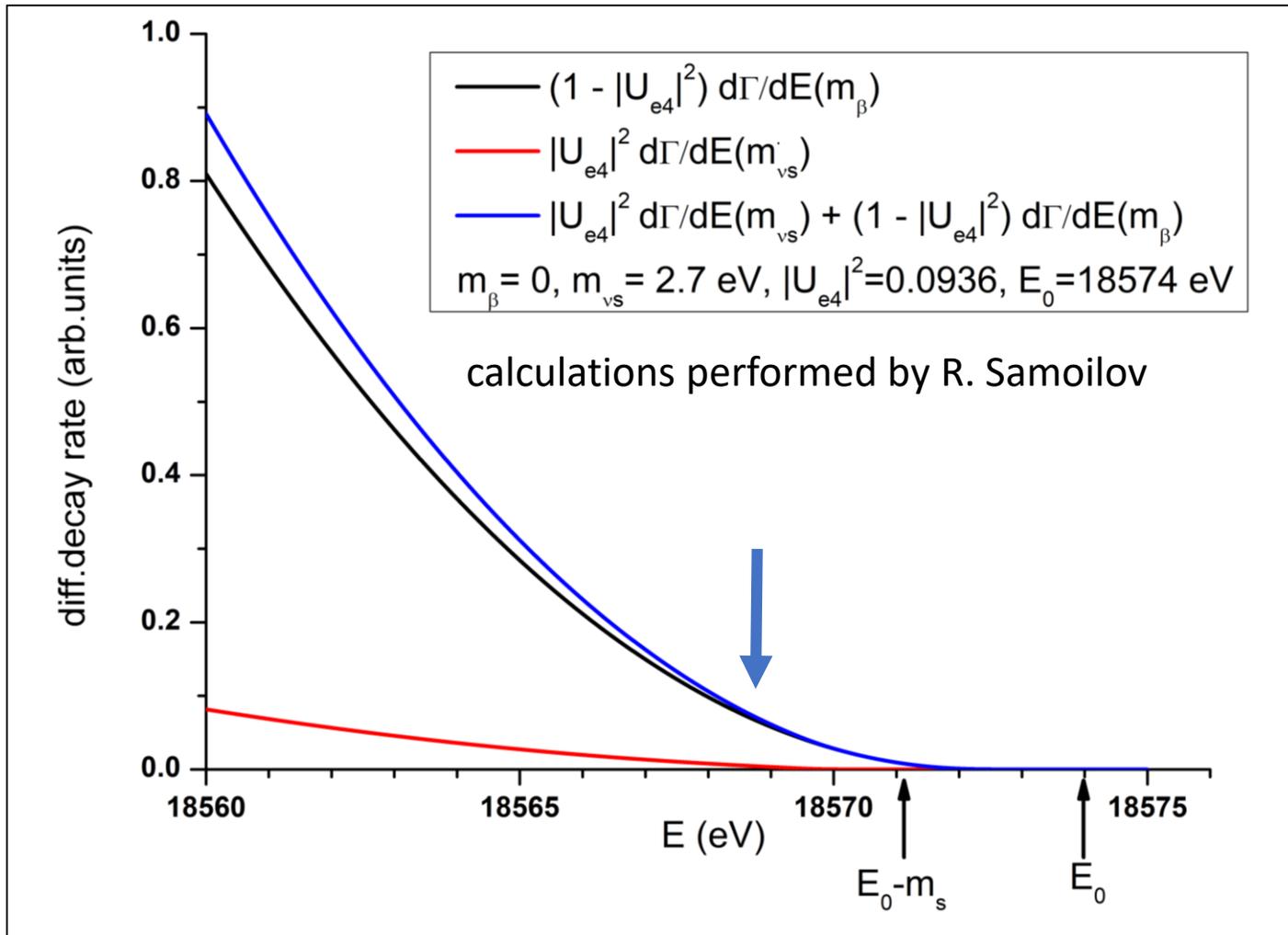
TABLE I. Discretized final-state probability distribution  $P(E_i)$  for  ${}^3\text{HeT}^+$  ( ${}^3\text{HeH}^+$ ) following the  $\beta$  decay of a free  $\text{T}_2$  (HT) molecule within the sudden approximation. The mean excitation energies  $E_i$  for both isotopes are given relative to the rovibronic ground state of  ${}^3\text{HeT}^+$  and the recoil energy for  ${}^3\text{HeT}^+$ . The spectrum extends to 240 eV after which an atomic distribution may be used (see text for details).

| $E_i$ (eV)      | $P(E_i)$ (%)   | $E_i$ (eV)      | $P(E_i)$ (%)   | $E_i$ (eV)       | $P(E_i)$ (%)   |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|
| 0.053( 0.049)   | 0.0069(0.0000) | 36.459( 36.467) | 1.6434(1.5166) | 88.498( 88.493)  | 0.0757(0.0806) |
| 0.124( 0.147)   | 0.0046(0.0000) | 37.445( 37.457) | 0.9037(0.9546) | 89.495( 89.498)  | 0.0696(0.0715) |
| 0.247( 0.247)   | 0.0233(0.0000) | 38.463( 38.467) | 0.4989(0.5951) | 90.967( 90.962)  | 0.1236(0.1276) |
| 0.351( 0.347)   | 0.0553(0.0000) | 39.499( 39.485) | 0.3978(0.4492) | 92.983( 92.979)  | 0.1080(0.1102) |
| 0.442( 0.447)   | 0.0457(0.0000) | 40.506( 40.504) | 0.4124(0.4280) | 94.982( 94.981)  | 0.0966(0.0973) |
| 0.556( 0.547)   | 0.2033(0.0000) | 41.498( 41.502) | 0.4152(0.3905) | 96.982( 96.981)  | 0.0864(0.0867) |
| 0.665( 0.647)   | 0.1649(0.0000) | 42.498( 42.494) | 0.3925(0.3795) | 98.981( 98.979)  | 0.0776(0.0779) |
| 0.759( 0.747)   | 0.3877(0.0000) | 43.504( 43.486) | 0.3457(0.3308) | 100.981(100.980) | 0.0703(0.0707) |
| 0.850( 0.876)   | 0.3808(0.2252) | 44.511( 44.474) | 0.3186(0.3122) | 102.983(102.982) | 0.0636(0.0638) |
| 0.937( 0.955)   | 0.6809(0.5814) | 45.494( 45.495) | 0.2701(0.2906) | 104.984(104.984) | 0.0578(0.0580) |
| 1.048( 1.087)   | 1.1214(1.2129) | 46.481( 46.494) | 0.2713(0.2538) | 106.985(106.985) | 0.0528(0.0529) |
| 1.143( 1.162)   | 1.0112(0.6216) | 47.483( 47.472) | 0.2481(0.2438) | 108.986(108.986) | 0.0483(0.0484) |
| 1.249( 1.260)   | 2.4406(0.6313) | 48.513( 48.452) | 0.2412(0.2236) | 110.986(110.986) | 0.0444(0.0445) |
| 1.359( 1.344)   | 3.2337(3.0441) | 49.498( 49.445) | 0.1907(0.2201) | 112.987(112.986) | 0.0409(0.0410) |
| 1.451( 1.452)   | 4.0864(9.5173) | 50.462( 50.472) | 0.1938(0.1989) | 114.987(114.987) | 0.0378(0.0378) |
| 1.552( 1.585)   | 6.8745(5.7372) | 51.501( 51.513) | 0.1760(0.1808) | 116.987(116.987) | 0.0350(0.0350) |
| 1.657( 1.663)   | 6.6279(6.9898) | 52.496( 52.491) | 0.1575(0.1609) | 118.988(118.988) | 0.0325(0.0324) |
| 1.745( 1.739)   | 5.1412(5.7803) | 53.491( 53.494) | 0.1541(0.1627) | 120.988(120.988) | 0.0302(0.0302) |
| 1.834( 1.847)   | 6.5561(7.1064) | 54.502( 54.507) | 0.1485(0.1632) | 122.988(122.988) | 0.0282(0.0281) |
| 1.940( 1.942)   | 5.4588(4.1076) | 55.508( 55.512) | 0.1557(0.1963) | 124.989(124.989) | 0.0263(0.0262) |
| 2.044( 2.044)   | 3.7231(3.3984) | 56.526( 56.531) | 0.1895(0.2533) | 126.989(126.989) | 0.0246(0.0245) |
| 2.144( 2.150)   | 2.5473(2.7572) | 57.518( 57.520) | 0.2427(0.3266) | 128.989(128.989) | 0.0230(0.0229) |
| 2.244( 2.270)   | 1.6959(1.2274) | 58.529( 58.535) | 0.3357(0.3956) | 130.989(130.989) | 0.0216(0.0215) |
| 2.344( 2.346)   | 1.1369(1.0046) | 59.518( 59.507) | 0.4095(0.4490) | 132.990(132.990) | 0.0203(0.0202) |
| 2.510( 2.509)   | 1.6947(1.4798) | 60.505( 60.501) | 0.4714(0.4895) | 134.990(134.990) | 0.0191(0.0190) |
| 2.762( 2.756)   | 1.0094(0.8381) | 61.505( 61.506) | 0.5034(0.5065) | 136.990(136.990) | 0.0180(0.0179) |
| 3.009( 3.009)   | 0.5732(0.4292) | 62.501( 62.504) | 0.5152(0.5320) | 138.990(138.990) | 0.0169(0.0168) |
| 3.257( 3.257)   | 0.2806(0.2117) | 63.503( 63.500) | 0.5442(0.5690) | 141.962(141.962) | 0.0311(0.0309) |
| 3.507( 3.506)   | 0.1316(0.0985) | 64.512( 64.496) | 0.5859(0.6180) | 145.964(145.964) | 0.0278(0.0277) |
| 3.757( 3.756)   | 0.0623(0.0446) | 65.504( 65.496) | 0.6617(0.7003) | 149.965(149.965) | 0.0250(0.0249) |
| 4.083( 4.082)   | 0.0420(0.0288) | 66.510( 66.507) | 0.7094(0.6969) | 153.966(153.967) | 0.0225(0.0225) |
| 4.579( 4.579)   | 0.0080(0.0054) | 67.501( 67.497) | 0.7404(0.6898) | 157.967(157.968) | 0.0204(0.0203) |
| 5.132( 5.076)   | 0.0015(0.0009) | 68.492( 68.488) | 0.7164(0.6457) | 161.969(161.969) | 0.0185(0.0185) |
| 5.647( 5.658)   | 0.0000(0.0002) | 69.489( 69.488) | 0.6563(0.5835) | 165.970(165.970) | 0.0169(0.0169) |
| 18.500( 18.773) | 0.0000(0.0001) | 70.486( 70.487) | 0.5620(0.5037) | 169.971(169.971) | 0.0154(0.0154) |
| 19.500( 19.680) | 0.0000(0.0016) | 71.473( 71.475) | 0.4691(0.4318) | 173.972(173.972) | 0.0141(0.0142) |
| 20.696( 20.645) | 0.0012(0.0125) | 72.478( 72.485) | 0.3680(0.3547) | 177.973(177.973) | 0.0130(0.0130) |
| 21.658( 21.615) | 0.0113(0.0618) | 73.486( 73.487) | 0.3049(0.3003) | 181.973(181.973) | 0.0120(0.0120) |
| 22.627( 22.590) | 0.0656(0.2137) | 74.443( 74.447) | 0.2210(0.2437) | 185.974(185.974) | 0.0111(0.0111) |
| 23.598( 23.568) | 0.2567(0.5507) | 75.446( 75.469) | 0.1928(0.2029) | 189.975(189.975) | 0.0103(0.0103) |
| 24.573( 24.549) | 0.7149(1.1046) | 76.465( 76.465) | 0.1761(0.1862) | 193.976(193.975) | 0.0095(0.0095) |
| 25.550( 25.532) | 1.4804(1.7838) | 77.430( 77.428) | 0.1530(0.1723) | 197.976(197.976) | 0.0089(0.0089) |
| 26.529( 26.517) | 2.3583(2.3800) | 78.512( 78.518) | 0.1215(0.1236) | 201.977(201.977) | 0.0083(0.0083) |
| 27.510( 27.503) | 2.9715(2.6793) | 79.464( 79.474) | 0.1390(0.1597) | 205.977(205.977) | 0.0077(0.0077) |
| 28.493( 28.491) | 3.0307(2.5894) | 80.504( 80.522) | 0.1216(0.1238) | 209.978(209.978) | 0.0072(0.0072) |
| 29.478( 29.480) | 2.5527(2.1803) | 81.510( 81.515) | 0.1422(0.1459) | 213.979(213.978) | 0.0068(0.0067) |
| 30.464( 30.471) | 1.8080(1.6225) | 82.523( 82.504) | 0.1384(0.1356) | 217.979(217.979) | 0.0064(0.0063) |
| 31.455( 31.470) | 1.1070(1.1150) | 83.505( 83.503) | 0.1368(0.1325) | 221.979(221.979) | 0.0060(0.0059) |
| 32.490( 32.507) | 0.7377(0.9290) | 84.499( 84.497) | 0.1316(0.1266) | 225.980(225.980) | 0.0056(0.0056) |
| 33.557( 33.539) | 1.0637(1.2964) | 85.490( 85.493) | 0.1153(0.1082) | 229.980(229.980) | 0.0053(0.0053) |
| 34.534( 34.519) | 1.9095(1.8714) | 86.491( 86.499) | 0.1076(0.1036) | 233.981(233.980) | 0.0050(0.0050) |
| 35.492( 35.490) | 2.2178(1.9702) | 87.498( 87.480) | 0.0921(0.0912) | 237.981(237.981) | 0.0047(0.0047) |

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

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

$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.33 \pm 0.07 (4.9\sigma)$$



## 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:

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

Численный результат в показан ниже.

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

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

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

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 три раза превышает предел, заявленный экспериментом GERDA. 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.**

**Нейтринная модель с одним  
стерильным нейтрино**

**Параметры стерильного нейтрино**

# ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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

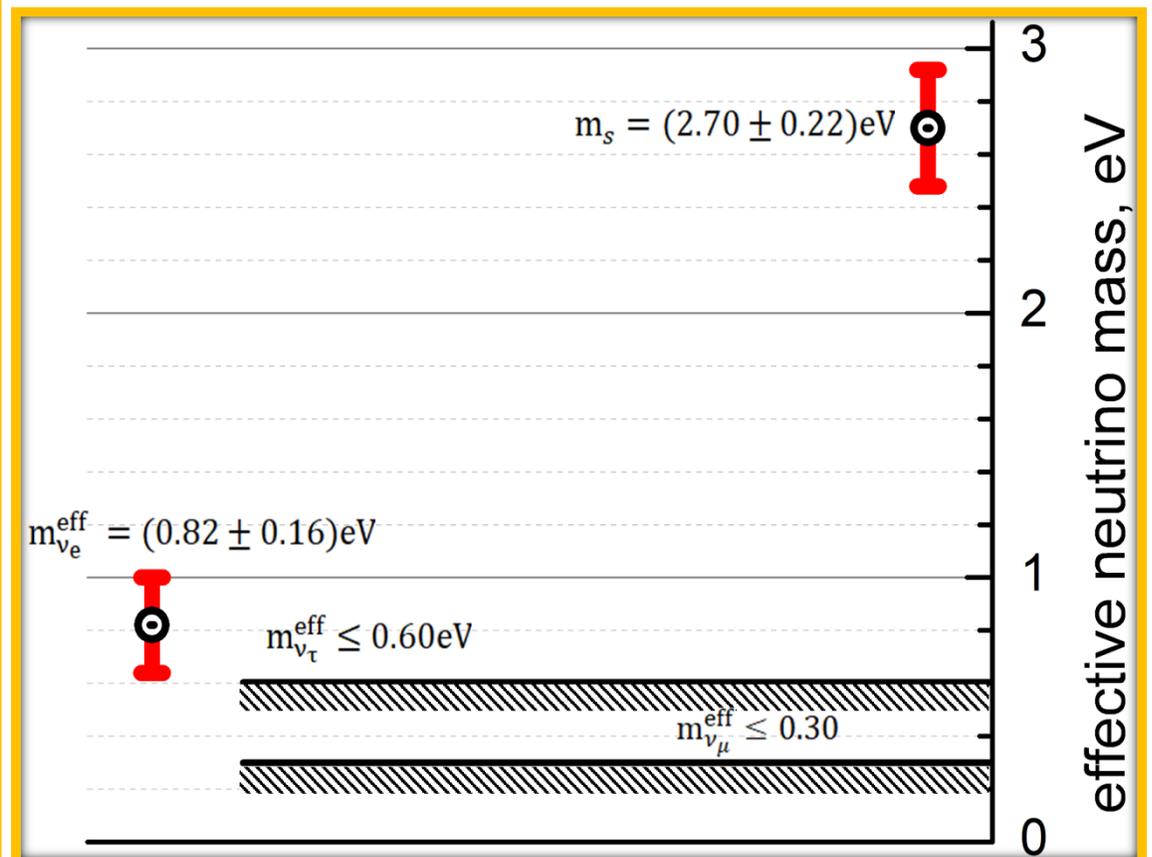
$$m_4 = (2.70 \pm 0.22)\text{eV}$$

$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.33 \pm 0.07 (4.9\sigma)$$

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

$$m_{4\nu_\mu}^{\text{eff}} \leq 0.30\text{eV}$$

$$m_{4\nu_\tau}^{\text{eff}} \leq 0.60\text{eV}$$

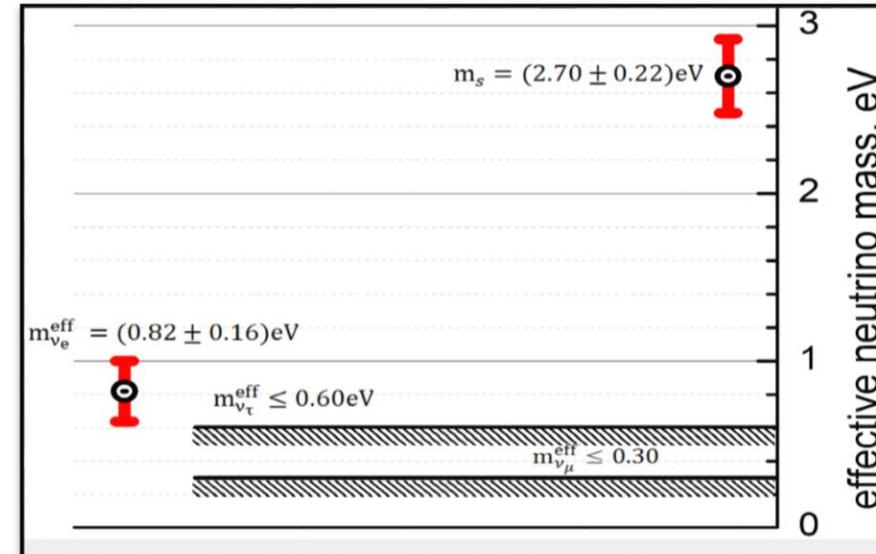
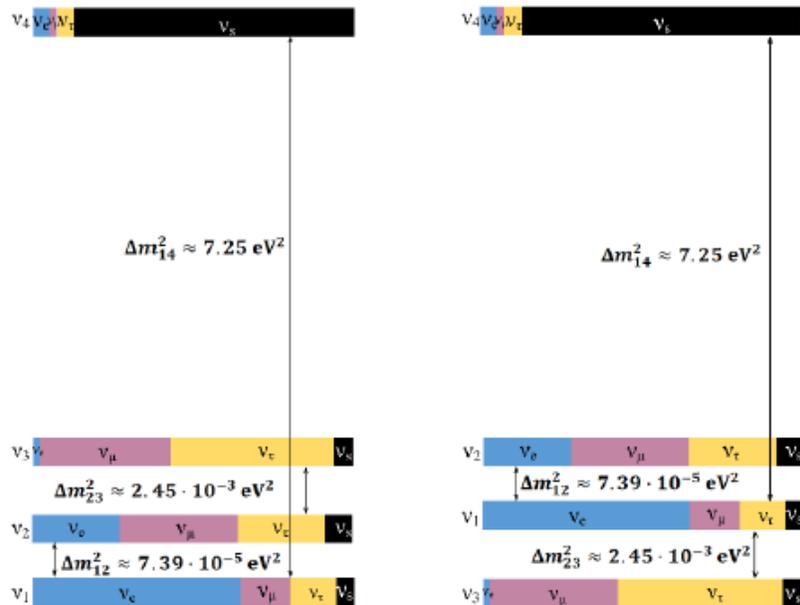


# Схема смешивания ароматов нейтрино, включая стерильное нейтрино и иерархия эффективных масс

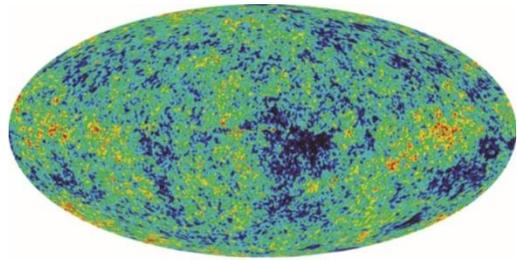
## PMNS matrix for 3 + 1 model

$$U_{PMNS}^{(3+1)} = \begin{pmatrix} 0.824^{+0.007}_{-0.008} & 0.547^{+0.011}_{-0.011} & 0.147^{+0.003}_{-0.003} & 0.306^{+0.041}_{-0.041} \\ 0.409^{+0.036}_{-0.060} & 0.634^{+0.022}_{-0.065} & 0.657^{+0.044}_{-0.014} & < 0.111 \\ 0.392^{+0.025}_{-0.048} & 0.547^{+0.056}_{-0.028} & 0.740^{+0.012}_{-0.048} & < 0.222 \\ < 0.24 & < 0.30 & < 0.26 & > 0.91 \end{pmatrix}$$

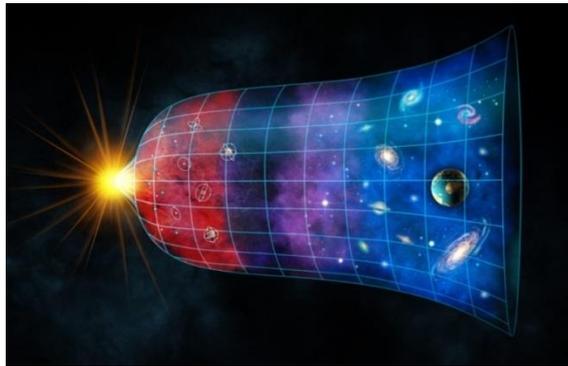
A.P. Serebrov \*,  
R.M. Samoilov JETP  
Letters, Volume  
112, 2020  
Issue 4, pp 211–225  
[arxiv:2003.03199](https://arxiv.org/abs/2003.03199)



# Космология - роль стерильных нейтрино во время формирования Вселенной

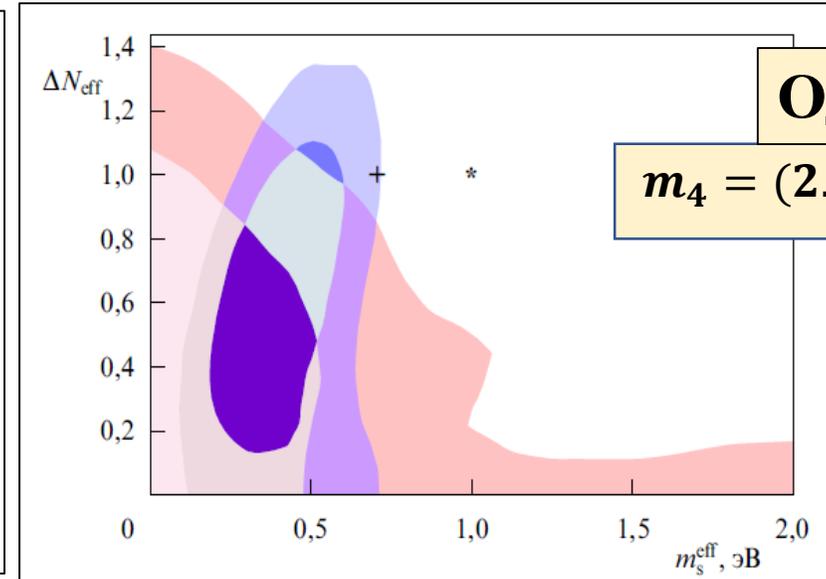
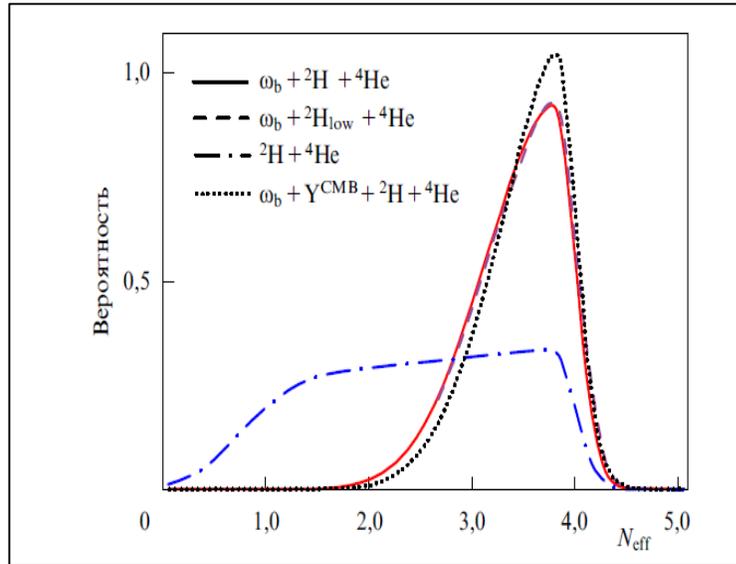


-200 -100 0 +100 +200  
Temperature difference from average ( $\mu\text{K}$ )



«Нейтрино разной массы могут влиять на раннюю Вселенную или быть ответственными за барионную асимметрию Вселенной и Темную материю. Однако стерильное нейтрино с малой массой и малым углом смешивания может существовать без какого-либо существенного влияния на формирование структуры Вселенной».

**Д. Горбунов** **УФН**



**Однако,**

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

**Рис. 9.** Область наиболее вероятных значений эффективного числа нейтрино  $N_{\text{eff}}$  по данным космологических наблюдений [37].

**Рис. 10.** (В цвете онлайн.) Область наиболее вероятных значений в пространстве параметров (масса стерильного нейтрино  $m_s^{\text{eff}}$ , превышение числа эффективных нейтринных специй над ожидаемым в СМ  $\Delta N_{\text{eff}} \equiv N_{\text{eff}} - 3$ ) [40] по данным анализа результатов эксперимента Planck (красная и розовая области отвечают 68 и 95 % CL соответственно) и анализа совокупности космологических данных (синяя и голубая области отвечают 68 и 95 % CL соответственно), вк

## Выводы из представленного анализа:

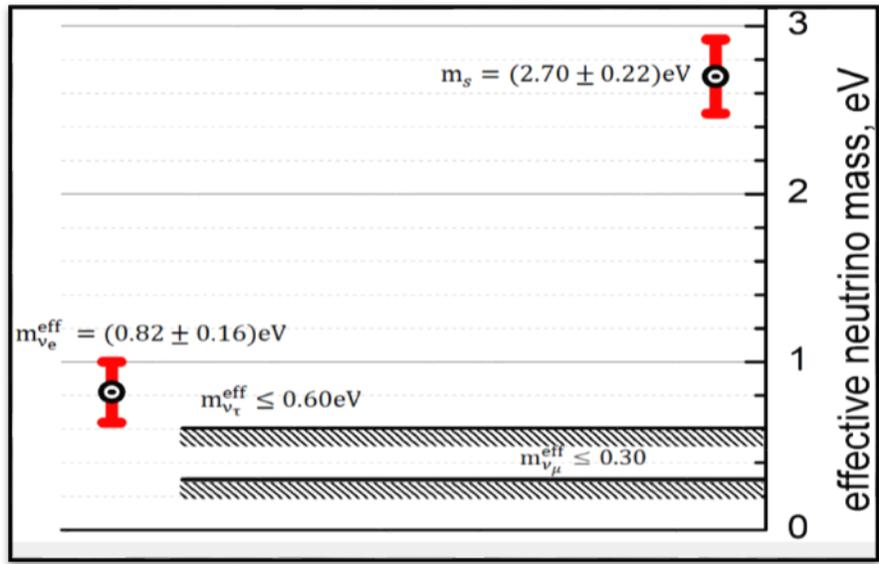
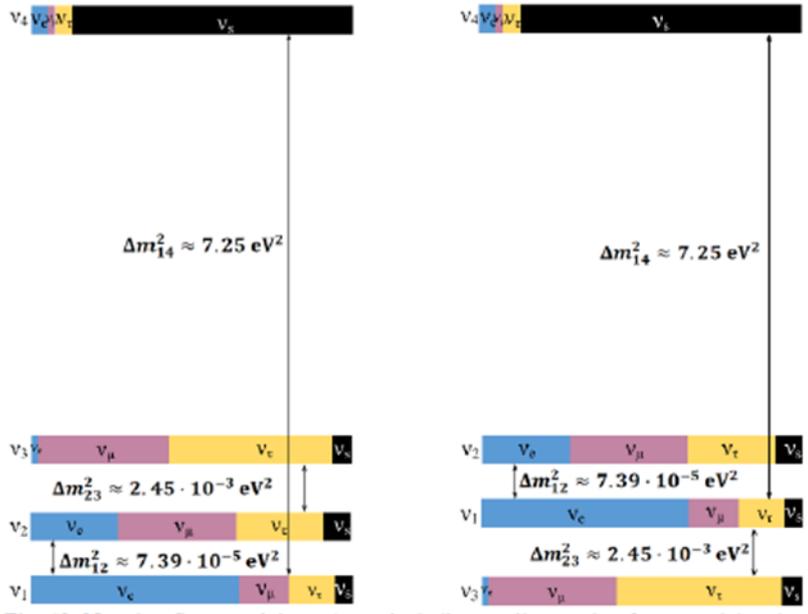
1. Результаты ПРЯМЫХ экспериментов по поиску стерильного нейтрино – Нейтрино-4 и BEST указывают на существование стерильного нейтрино с параметрами осцилляций:  $\Delta m_{14}^2 = 7.30 \pm 0.13_{st} \pm 1.16_{syst}$   $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07 (4.9\sigma)$ .
2. Поиск стерильного нейтрино используя Реакторную Модель, Солнечную Модель и Космологическую Модель, сталкивается со значительными трудностями извлечения параметров стерильного нейтрино на фоне сложных процессов, происходящих в этих объектах.
3. Анализ ПРЯМЫХ экспериментальных данных по поиску стерильного нейтрино в экспериментах на ускорителях указывает на возможность согласования результатов экспериментов: Нейтрино-4, BEST, MiniBooNE, LSND, IceCube в рамках нейтринной модели 3+1 и пределах экспериментальной точности.
4. Область значений эффекта на appearance в экспериментах MiniBooNE, LSND не исключена, но ограничена данными на disappearance мюонных нейтрино при использовании  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07$  из экспериментов Нейтрино-4 + ГА(BEST) и данными на  $\Delta m_{14}^2 = 7.30 \pm 0.13_{st} \pm 1.16_{syst}$  и эксперимента Нейтрино-4.
5. Эксперимент MicroBooNE не закрыл область предсказаний из экспериментов MiniBooNE, LSND.

# Предсказания нейтринной модели 3+1

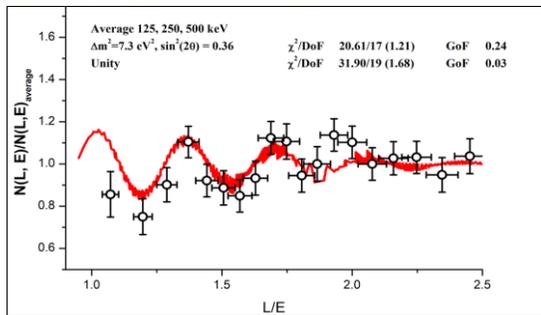
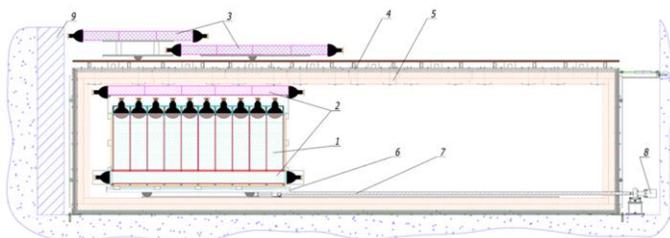
1. Параметры стерильного нейтрино  $m_4 = (2.70 \pm 0.22) \text{ eV}$  и  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07 (4.9\sigma)$  позволяют с делать оценку эффективной массы электронного нейтрино:  $m_{4\nu_e}^{eff} = (0.82 \pm 0.18) \text{ eV}$ . Эксперимент KATRIN не видит стерильного нейтрино и делает ограничение на массу нейтрино в модели 3х нейтрино  $m_{3\nu_e}^{eff} < 0.8 \text{ eV} (90\%)$  поэтому прямое сравнение результатов не корректно.
2. Параметры четвертого нейтрино, полученные в эксперименте «Нейтрино-4» должны быть использованы в эксперименте KATRIN в качестве дополнительных параметров для определение  $m_1^2, m_2^2, m_3^2$ .
3. Значение майорановской массы, рассчитанное с параметрами осцилляций Нейтрино-4, составляет  $m(0\nu\beta\beta) = (0.25 \pm 0.09) \text{ eV}$ , что в три раза превышает предел, заявленный экспериментом GERDA. 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.

# Параметры нейтринной модели 3+1 и схема смешивания

$$U_{PMNS}^{(3+1)} = \begin{pmatrix} 0.824^{+0.007}_{-0.008} & 0.547^{+0.011}_{-0.011} & 0.147^{+0.003}_{-0.003} & 0.306^{+0.041}_{-0.041} \\ 0.409^{+0.036}_{-0.060} & 0.634^{+0.022}_{-0.065} & 0.657^{+0.044}_{-0.014} & < 0.111 \\ 0.392^{+0.025}_{-0.048} & 0.547^{+0.056}_{-0.028} & 0.740^{+0.012}_{-0.048} & < 0.222 \\ < 0.24 & < 0.30 & < 0.26 & > 0.91 \end{pmatrix}$$

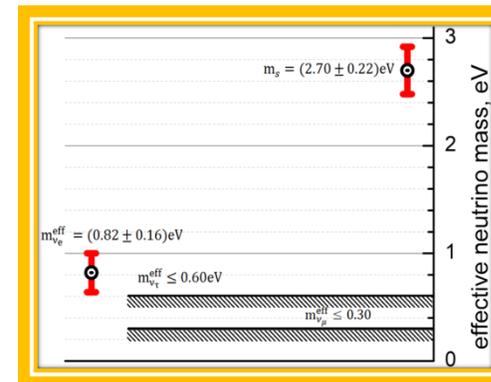


# ЗАКЛЮЧЕНИЕ в картинках



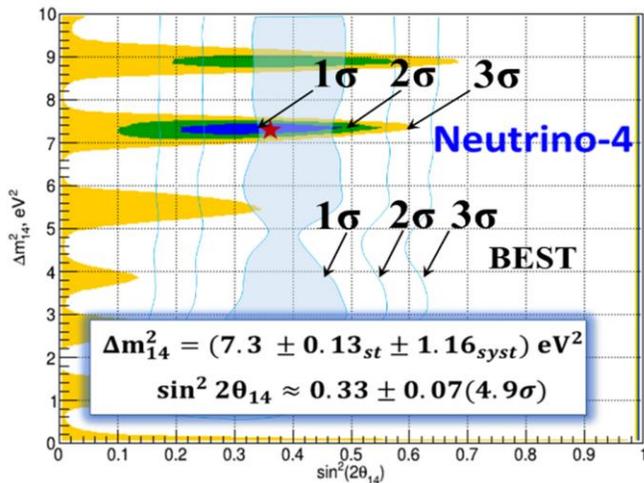
$$\Delta m_{14}^2 = 7.30 \pm 0.13_{st} \pm 1.16_{syst}$$

$$\sin^2 2\theta_{14} = 0.33 \pm 0.07 (4.9\sigma)$$

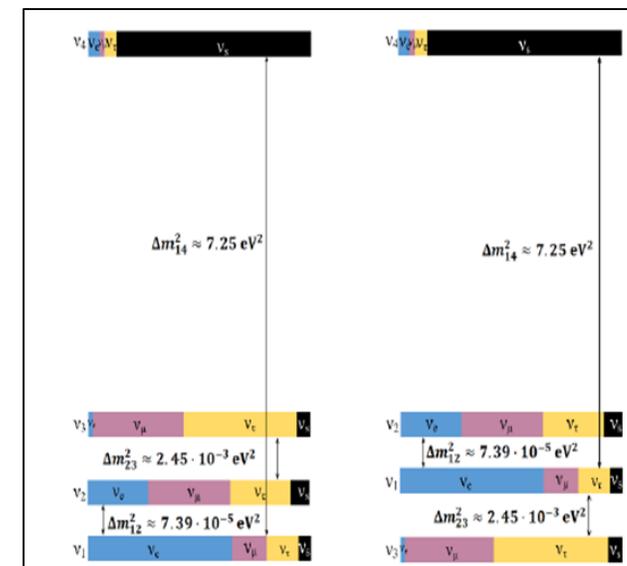


$$\Delta m_{14}^2 = 7.30 \pm 0.13_{st} \pm 1.16_{syst}$$

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



$$U_{PMNS}^{(3+1)} = \begin{pmatrix} 0.824^{+0.007}_{-0.008} & 0.547^{+0.011}_{-0.011} & 0.147^{+0.003}_{-0.003} & 0.306^{+0.041}_{-0.041} \\ 0.409^{+0.036}_{-0.060} & 0.634^{+0.022}_{-0.065} & 0.657^{+0.044}_{-0.014} & < 0.111 \\ 0.392^{+0.025}_{-0.048} & 0.547^{+0.056}_{-0.028} & 0.740^{+0.012}_{-0.048} & < 0.222 \\ < 0.24 & < 0.30 & < 0.26 & > 0.91 \end{pmatrix}$$



**Перспективы развития экспериментов  
и эксперимента Нейтрино-4  
по измерению параметров стерильного нейтрино**

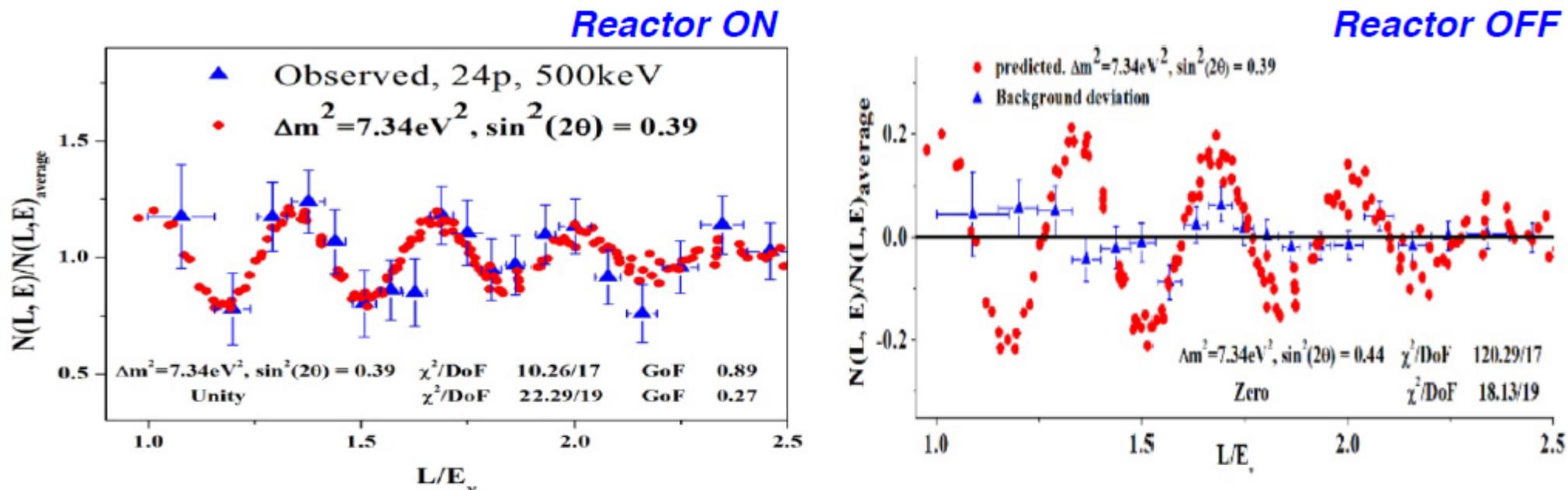
Доклад Карло Руббиа  
про проект проверки результата эксперимента Нейтрино-4

# 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:)

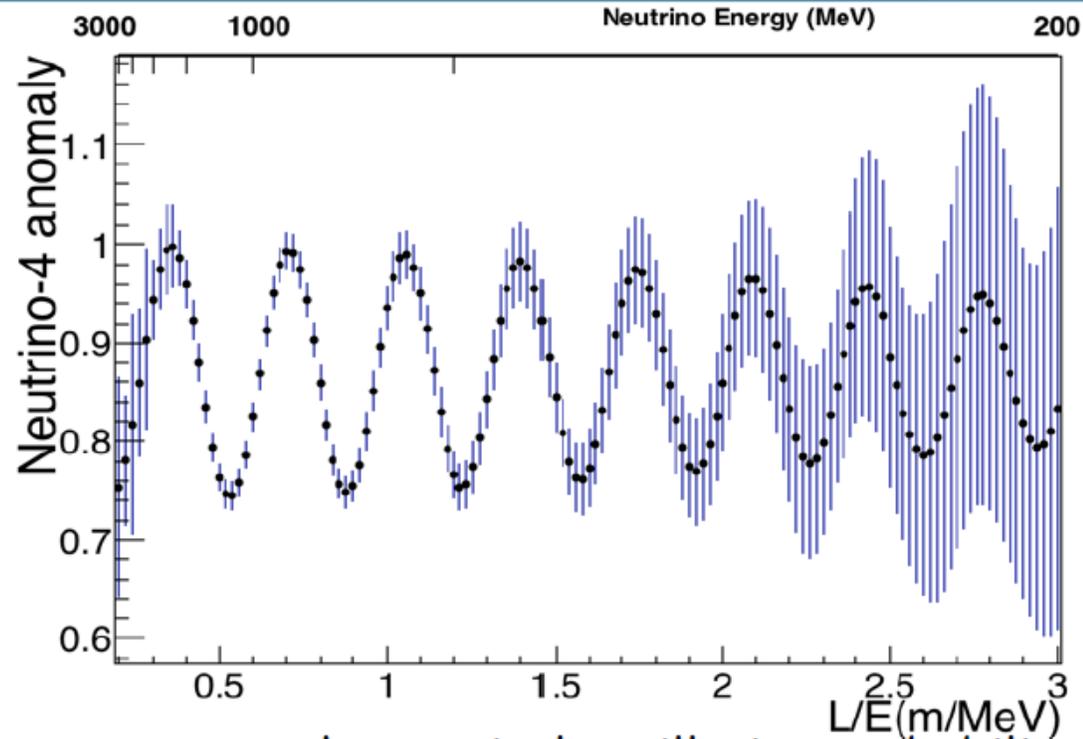
## Similarities between NEUTRINO-4 and ICARUS

- ICARUS at the Booster (1) and at the NUMI (2) have remarkable similarities to NEUTRINO-4. We should be able to settle the NEUTRINO-4 prediction both in the  $\nu-\mu$  with the Booster and  $\nu-e$  with NUMI.
- The Booster at about 600 m from the target can be directly compared to NEUTRINO-4 with a target of 42 cm followed by the detector between 6 and 12 m. with the  $\nu-\mu$  collected with  $\sim 100$  times the energy. The number of Booster events with 1.6  $\mu$ s spill,  $5 \cdot 10^{12}$  pot/spill, 5 Hz repetition rate are 12'800 ev/day of which  $\sim 7'800$  ev/day are due to cosmic rays.
- The NUMI off-axis proton beam is located at  $\sim 700$  m of distance from ICARUS and at an off-axis angle of 6 degrees. For 1 year with 0.75 Hz NUMI repetition rate and spills of  $6 \times 10^{13}$  ppp we expect for positive (negative) focussing  $4.64 \times 10^5$  CC events/y ( $3.78 \times 10^5$  CC events/y).

# General expectations for the future SBN data taking

- The data taking is based on a future and definitive demonstration of the  $2.8\sigma$  L/E decay pattern observed by the NEUTRINO-4 experiment.
- The experiment will be primarily dedicated to the following *four main observations*:
  - 1.- Detection of the  *$\nu$ -mu disappearance* in the Booster beam with the ICARUS detector
  - 2.- Similar detection of the  *$\nu$ -e disappearance* in the NUMI off-axis k beam
  - 3.- Comparison between the ICARUS at 590 m and SBND at 110 m from the target in the Booster beam to test validity of the 3-1 model and *appearance of the  $\nu$ -e signal*.
  - 4.- Confirmation of a sterile mass for the *effective masses of the light active neutrino*. The  $m_{\nu_e}^{\text{eff}} \sim \text{sqrt}[m_4^2 |U_{e4}|^2]$  and  $m_{\nu_\mu}^{\text{eff}}$  and  $m_{\nu_\tau}^{\text{eff}}$  may be compared with future direct experiments, f.i. with next KATRIN.

# 1.- Booster beam

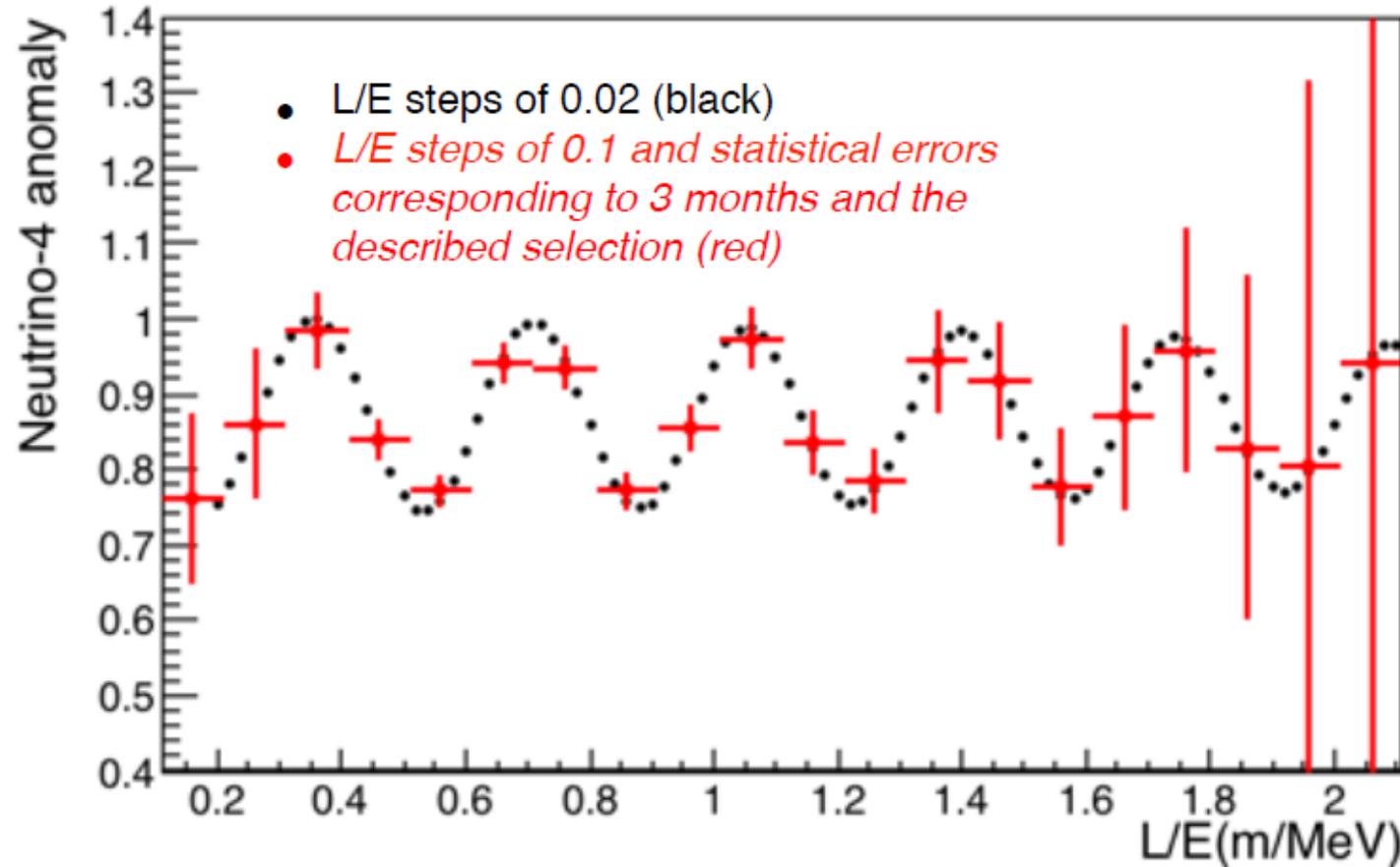


- The figure represents the survival oscillation probability in the presence of the Neutrino-4 anomaly.
- The calculation has been performed considering a 3 years long run (~117k  $\nu_{\mu}CC$  QE contained events) for steps of  $\delta(L/E) = 0.02$  and considering the best fit of NEUTRINO-4 parameters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

Venice NeuTel 2021

Slide: 18

## Results already after 3 month, with $L_\mu > 50$ cm



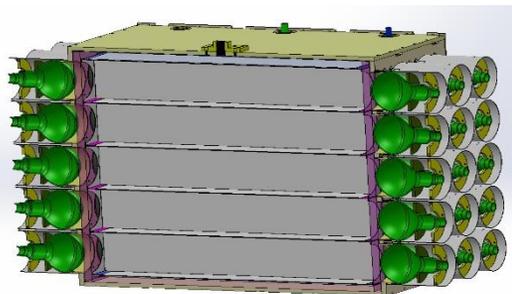
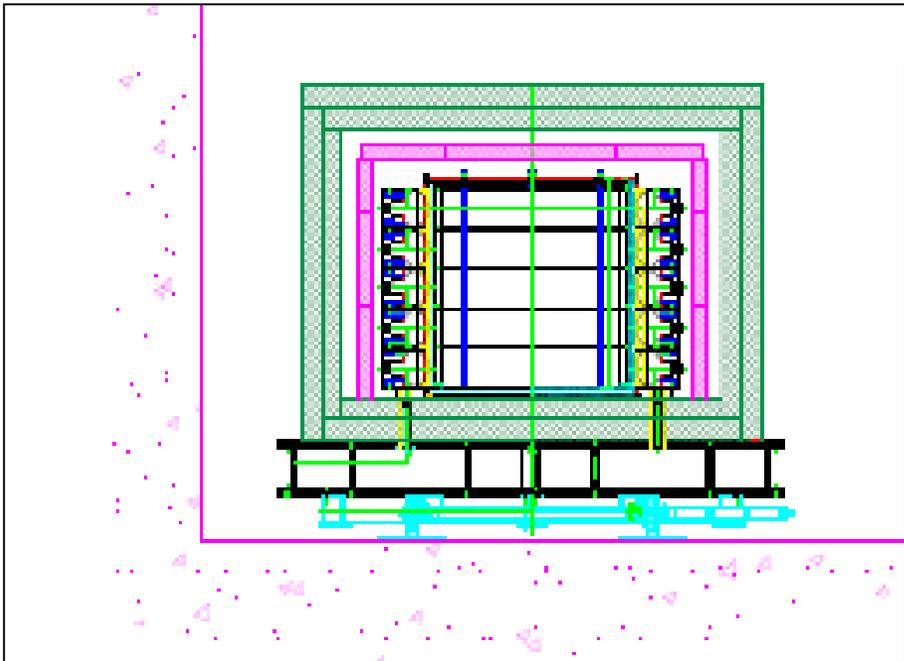
- The additional request on the muon length  $L_\mu > 50$  cm for a better  $\mu$  identification has been also included ( $\sim 8600$  events expected in 3 months)
- It removes all the neutrino events with  $E_\nu < 300$  MeV and reduces the statistics at low  $\nu$  energy, increasing the statistical errors at high L/E

# Conclusions

- The problem of neutrino anomalies has been with us for about  $\frac{1}{4}$  of the century.
- The recent NEUTRINO-4 experiment is a major step forward, however still statistically weak, representing only a  $2.8 \sigma$  signal. Further analysis is needed.
- The re-activation of the Fermilab Booster and NUMI beams is expected by the end of 2020, followed by the initial operation of ICARUS in both locations. Definitive and eventually confirming **evidences 1.- and 2** with  $\nu$ -mu and  $\nu$ -e are foreseen after a few months.
- After approximately the first year of operation, the SBND L-Ar TPC detector will be added at a shorter distance of the Booster beam to perform a definitive  $5 \sigma$  analysis of sterile neutrinos **in evidence 3.**
- Values of effective light neutrino masses will be calculated as **evidence 4.**

# **Перспективы развития эксперимента Нейтрино-4**

# Схема новой установки на реакторе СМ-3



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

Подвижная платформа



Аквариум для  
сцинтиллятора



10 тонн

140 штук

Активная и  
пассивная  
защита



ФЭУ



Световоды



# Ожидается улучшение статистической точности эксперимента Нейтрино-4

| 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>                      |

**Спасибо!**