

**Анализ результатов эксперимента Нейтрино-4
по поиску стерильного нейтрино и сравнение
с результатами других экспериментов**

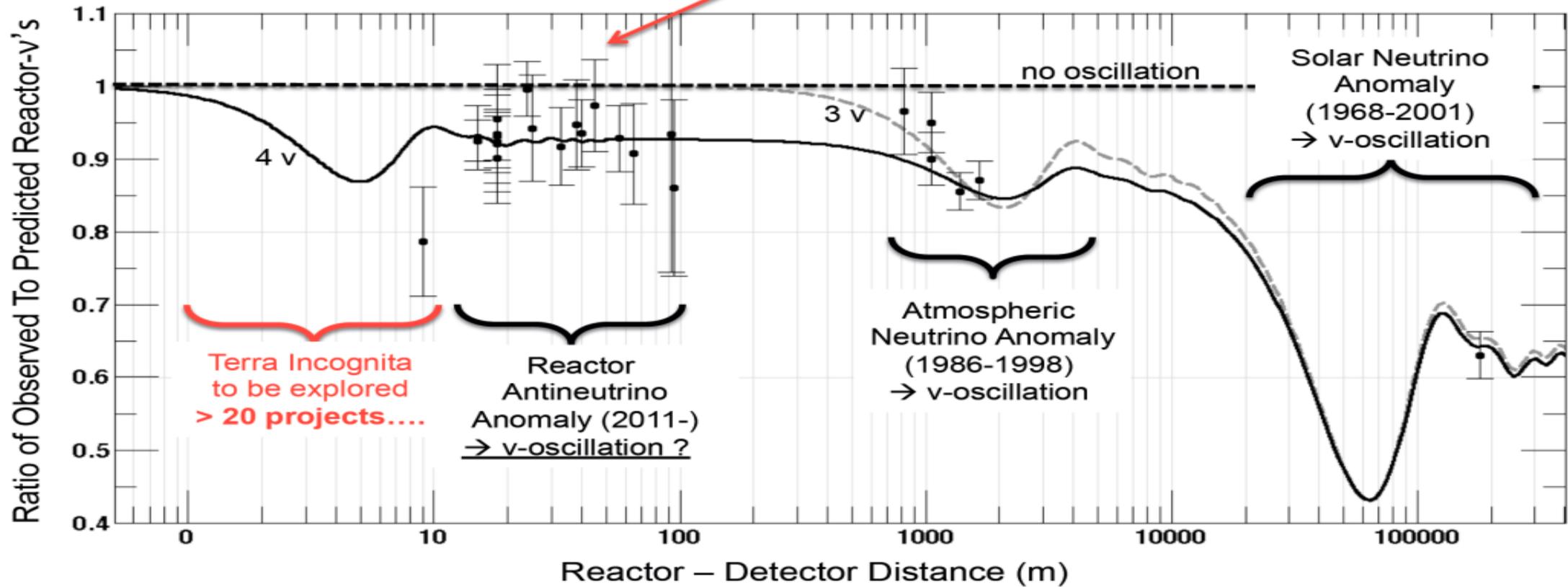
А.П. Серебров

ПИЯФ НИЦ КИ, Гатчина, Россия

***Сессия ОЯФ РАН 10-12 марта
Новосибирск, НГУ***

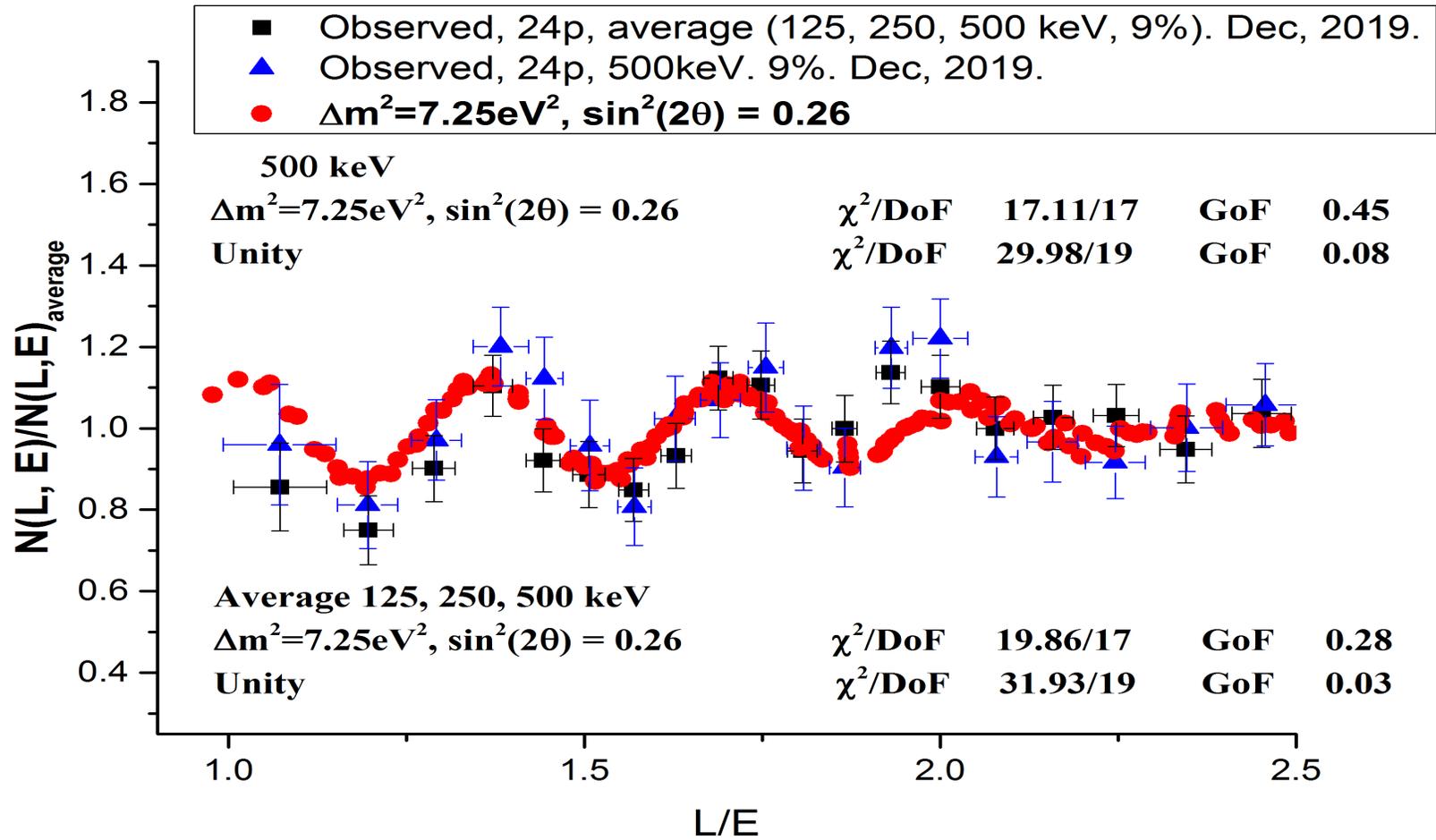
Реакторная антинейтринная аномалия

- Observed/predicted averaged event ratio: $R=0.927\pm0.023$ (3.0σ)

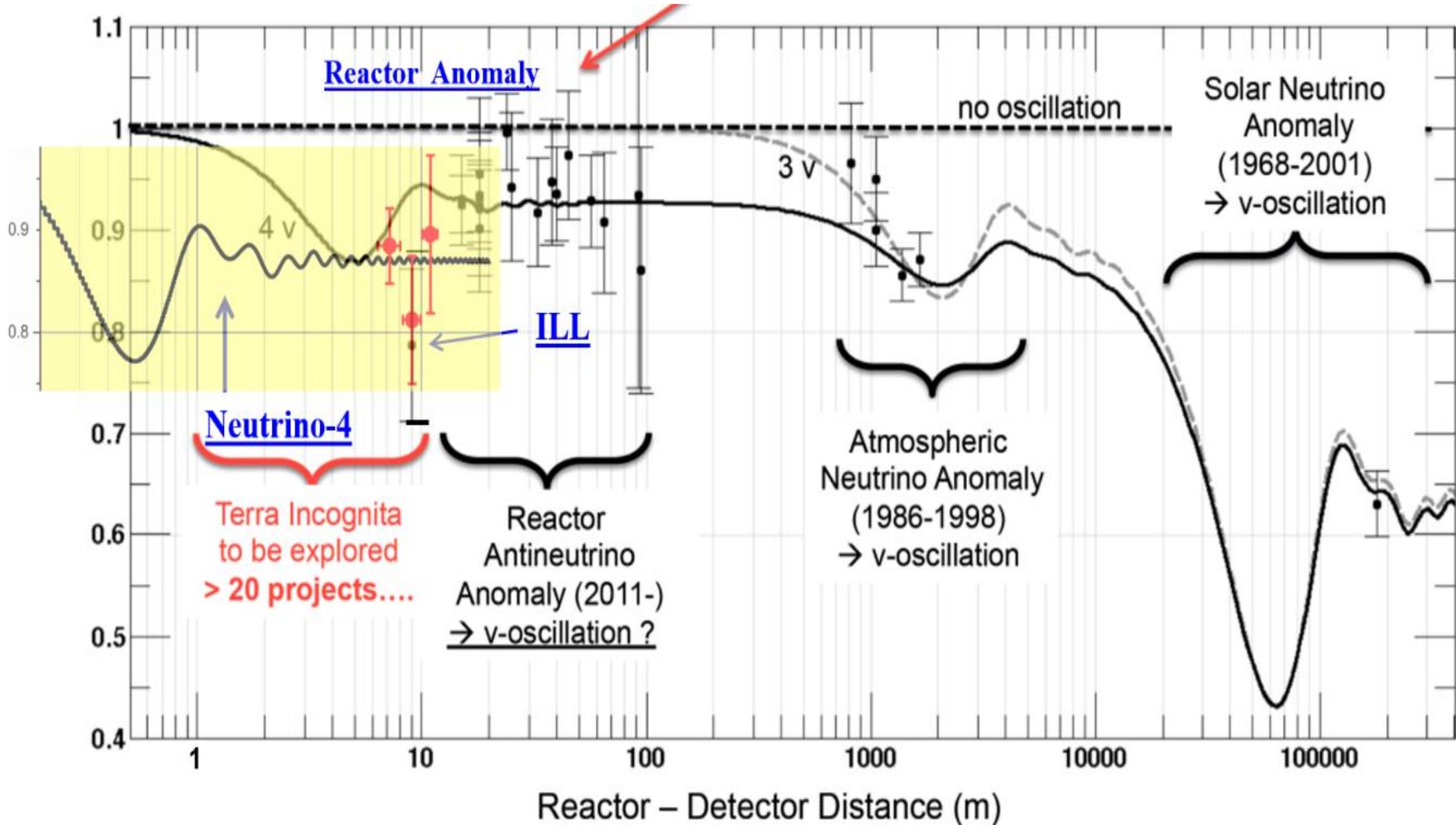


$$P(\tilde{\nu}_e \rightarrow \tilde{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_{\tilde{\nu}} [\text{MeV}]}\right)$$

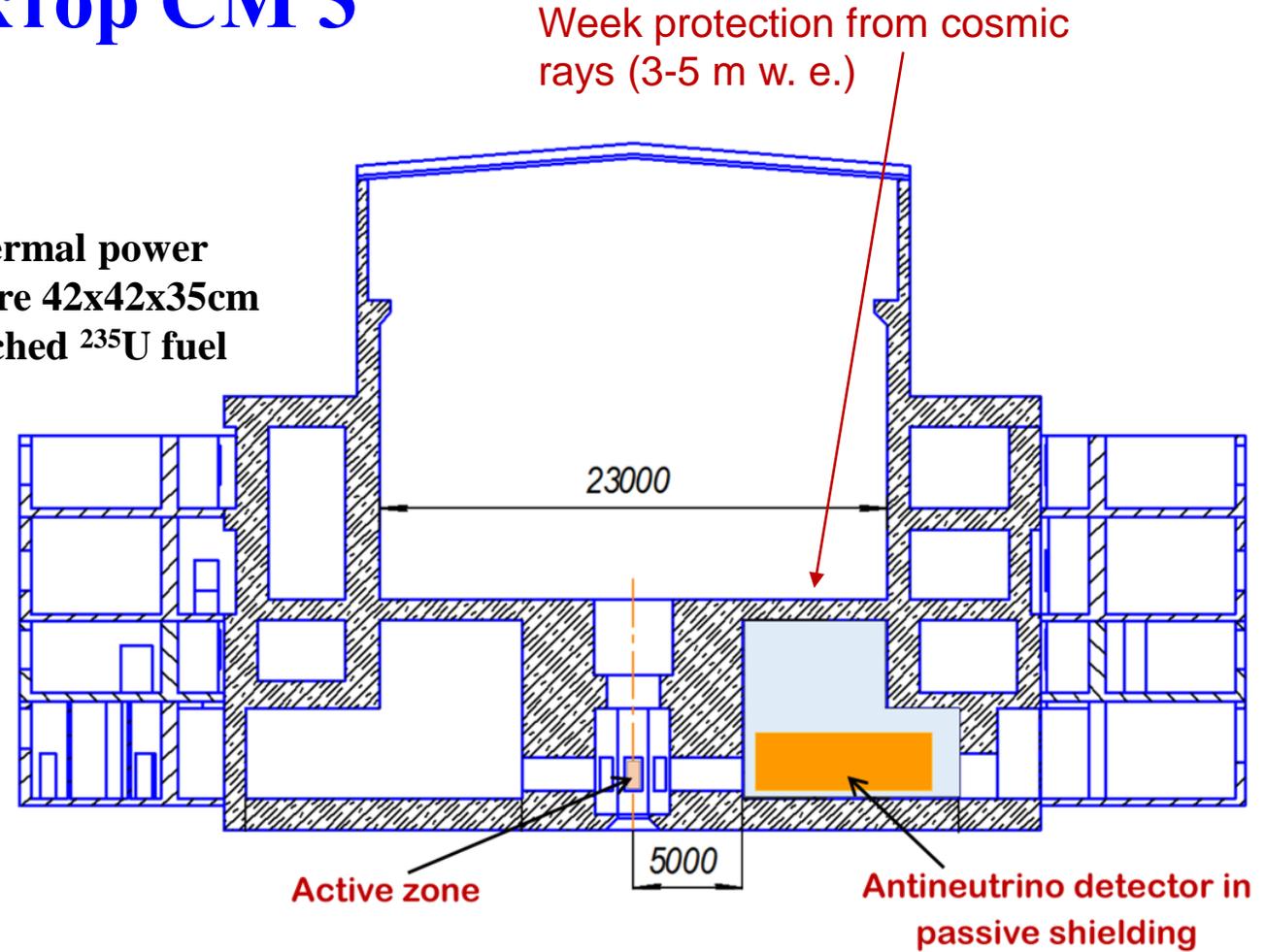
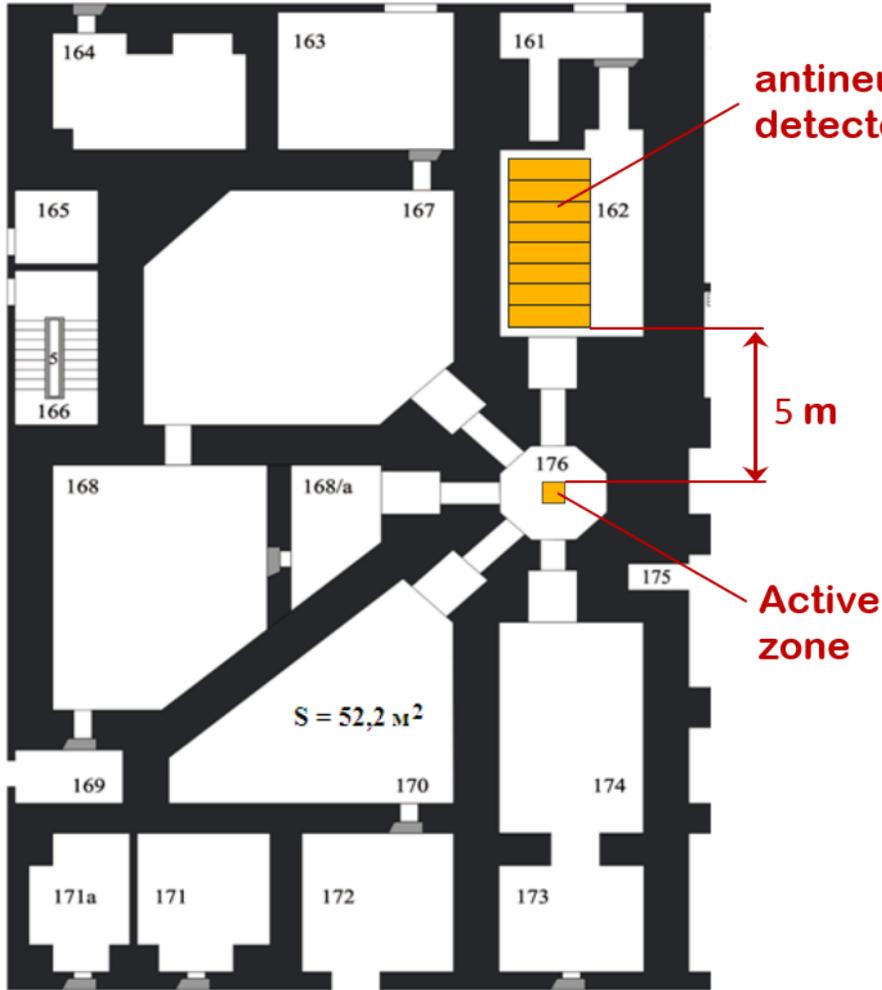
Период осцилляций для энергии антинейтрино 4 МэВ составляет 1,4 м



$$P(\tilde{\nu}_e \rightarrow \tilde{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_{\tilde{\nu}} [\text{MeV}]_3}\right)$$

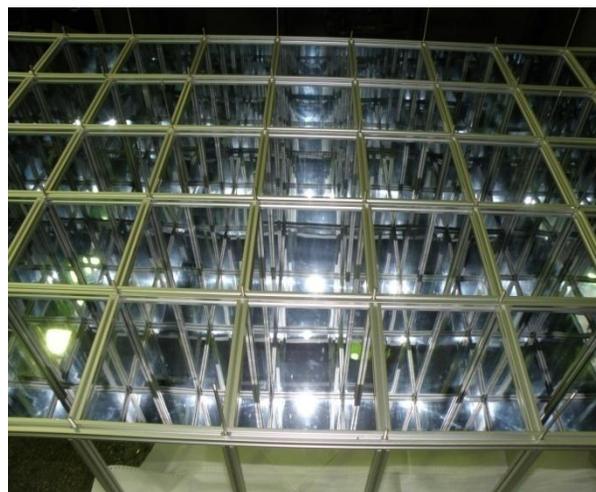
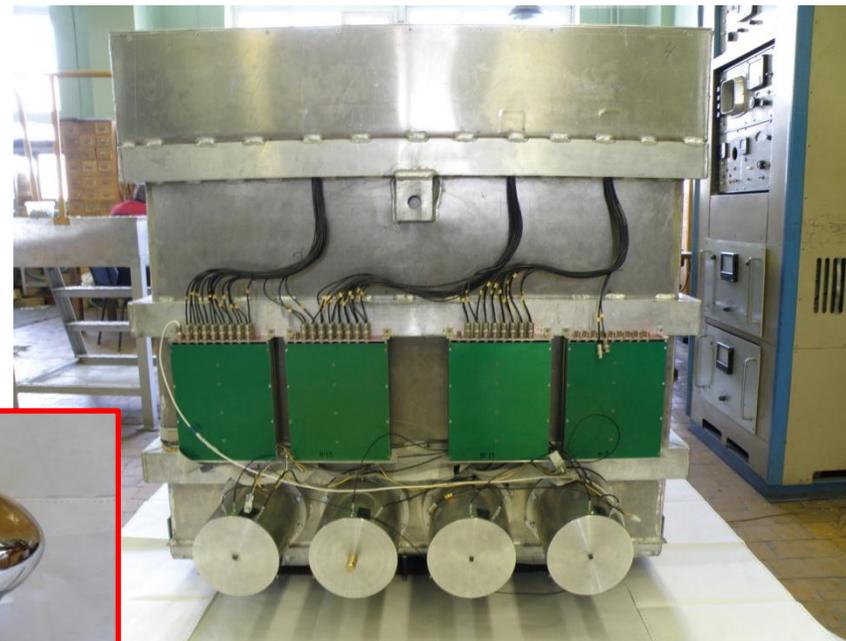


Реактор CM 3

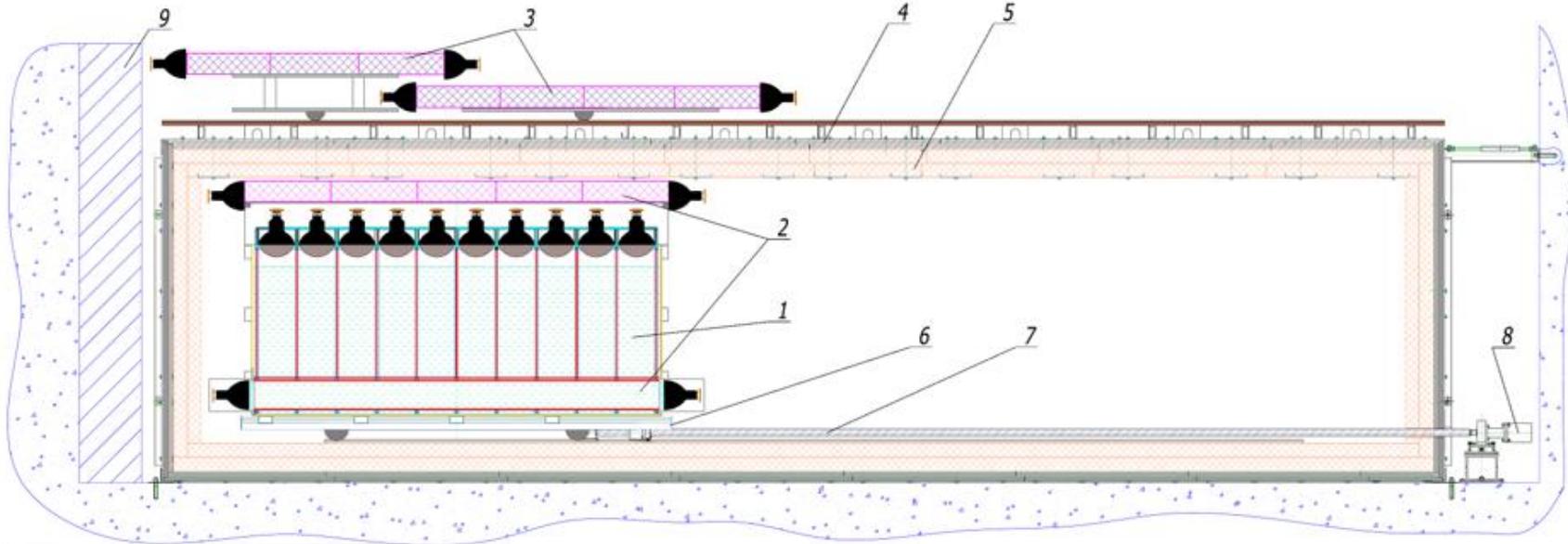
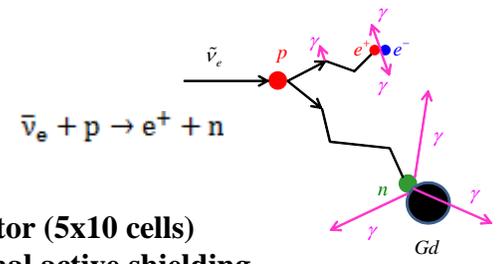


Due to some peculiar characteristics of its construction, reactor SM-3 provides the most favorable conditions to search for neutrino oscillations at short distances. However, SM-3 reactor, as well as other research reactors, is located on the Earth's surface, hence, cosmic background is the major difficulty in considered experiment.

**Полномасштабный детектор с жидким сцинтиллятором объемом 3 м3 (5x10 секций)
изготовлен в НИЦ "КИ" ПИЯФ, Гатчина, Россия**



Подвижный и спектрально чувствительный детектор антинейтрино



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



Passive shielding - 60 tons

Neutrino channel outside and inside



Detector prototype

Full-scale detector



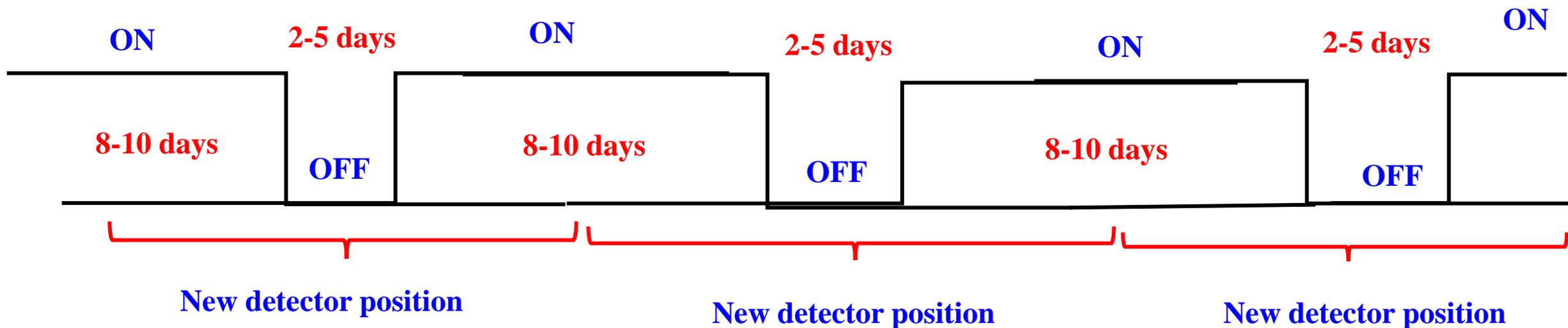
Liquid scintillator detector
50 sections 0.235x0.235x0.85m³

Range of measurements is 6 - 12 meters

ON
90 MW

Измерения начались в июне 2016 года. Измерения с реактором ON проводили в течение **720 дней**, а с реактором OFF - в течение **417 дней**.
Всего реактор включался и выключался **87 раз**.

$$\frac{(\text{ON} - \text{OFF})}{\text{OFF}} = 50\%$$

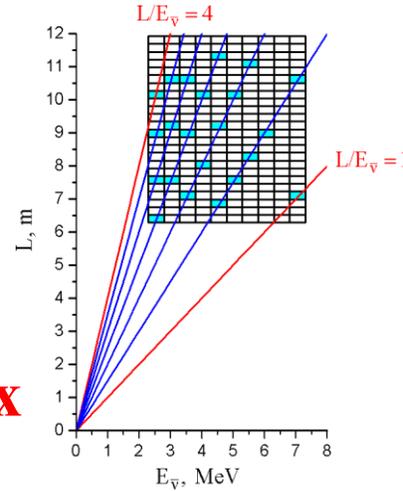


Вероятность исчезновения антинейтрино

$$N(E_i, L_k)$$

Количество
антинейтрино
события

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



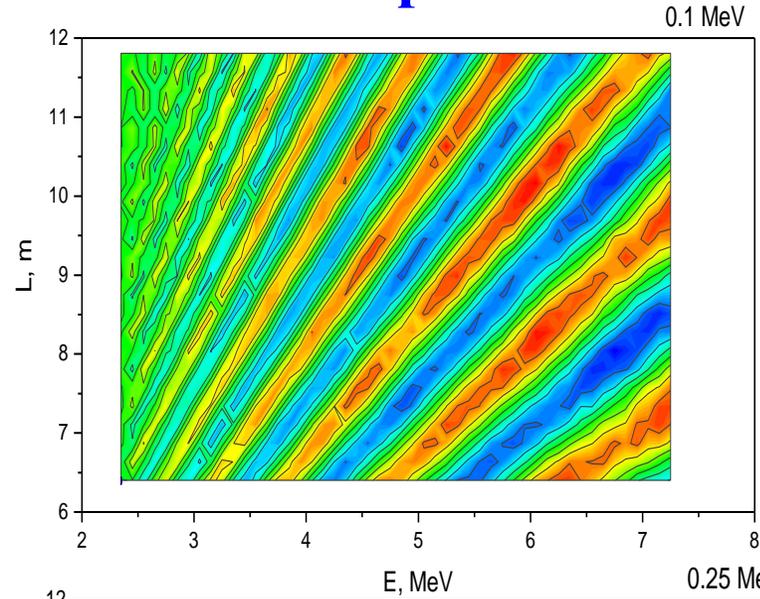
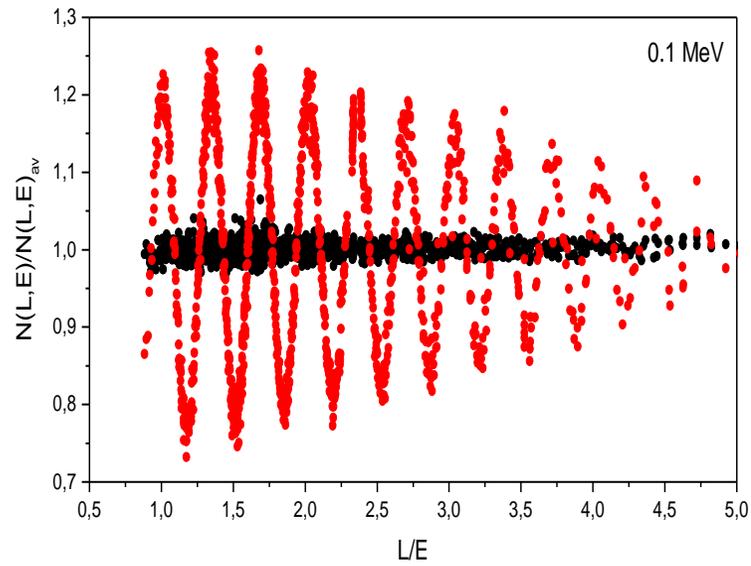
Спектрально-независимый метод анализа экспериментальных данных

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

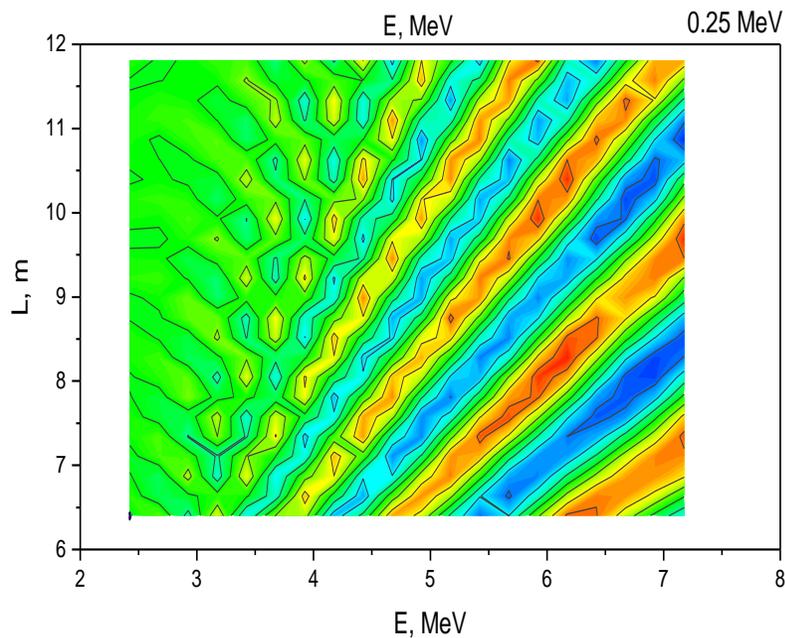
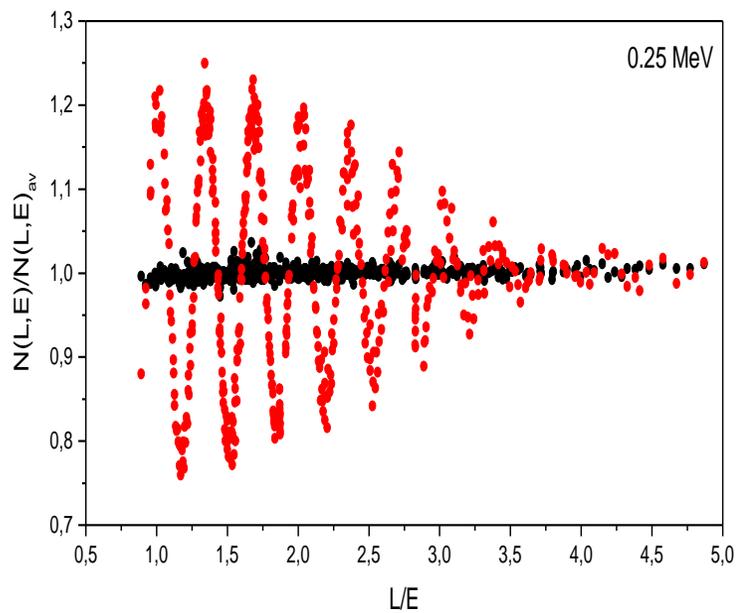
Метод анализа экспериментальных данных не должен опираться на точное знание спектра. Можно провести модельный независимый анализ с использованием уравнения (2), где числитель - скорость событий антинейтрино с поправкой на геометрический коэффициент $1/L^2$ а знаменатель - его значение, усредненное по всем расстояниям.

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

Ожидаемый эффект для различных энергетических разрешений детектора в МС расчете

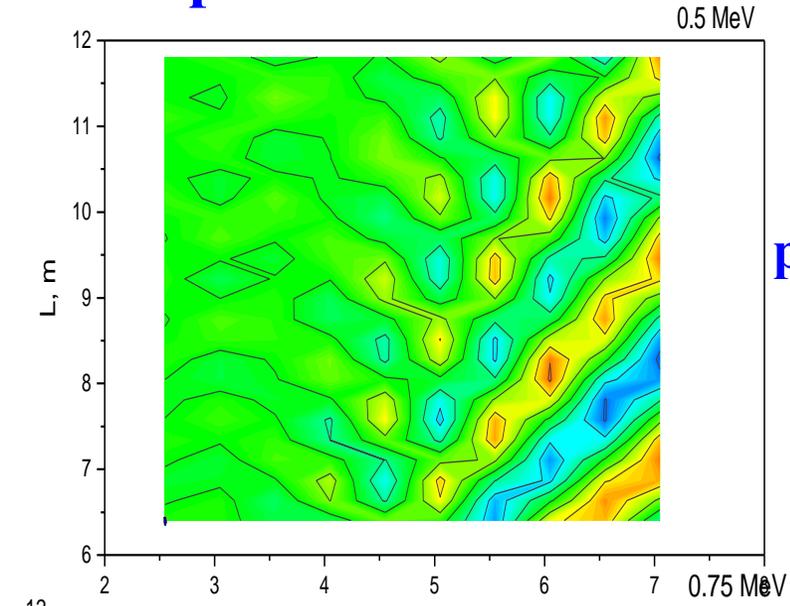
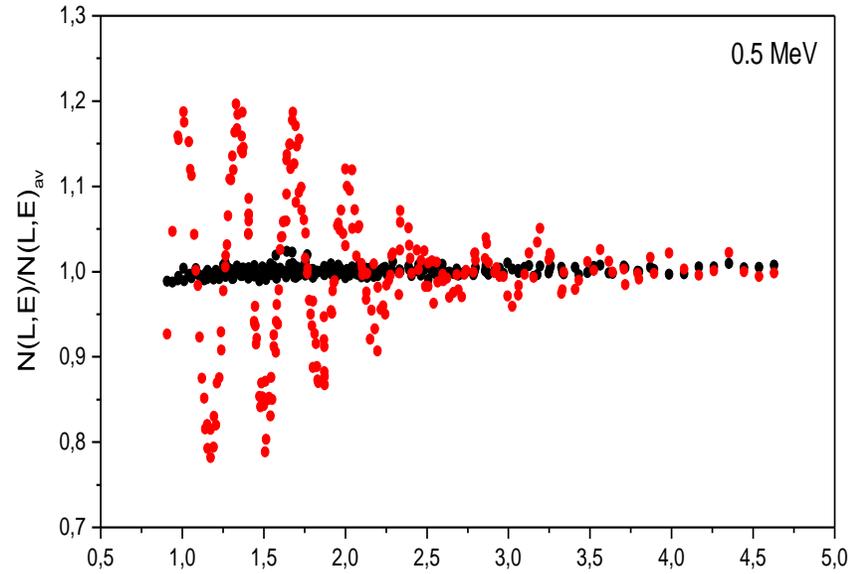


разрешающая способность
по энергии **0.1 MeV**

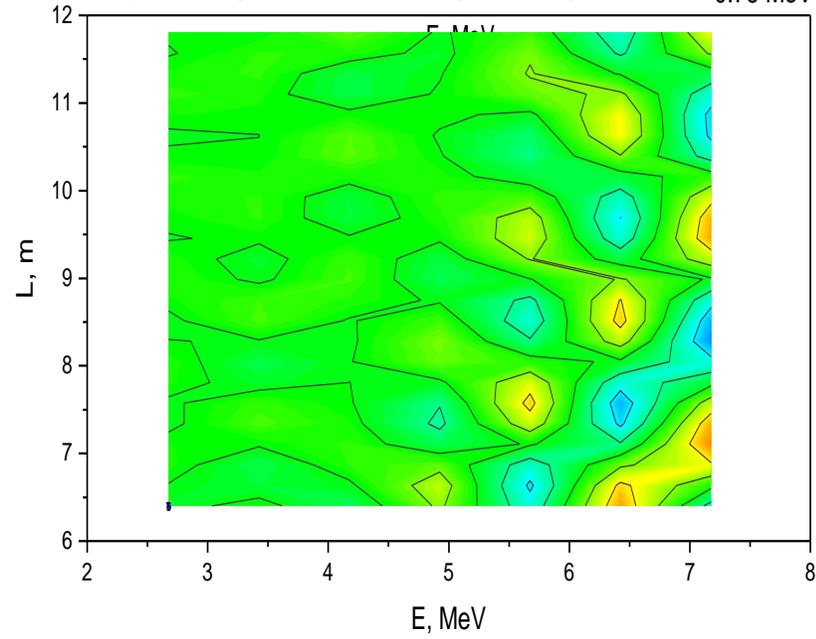
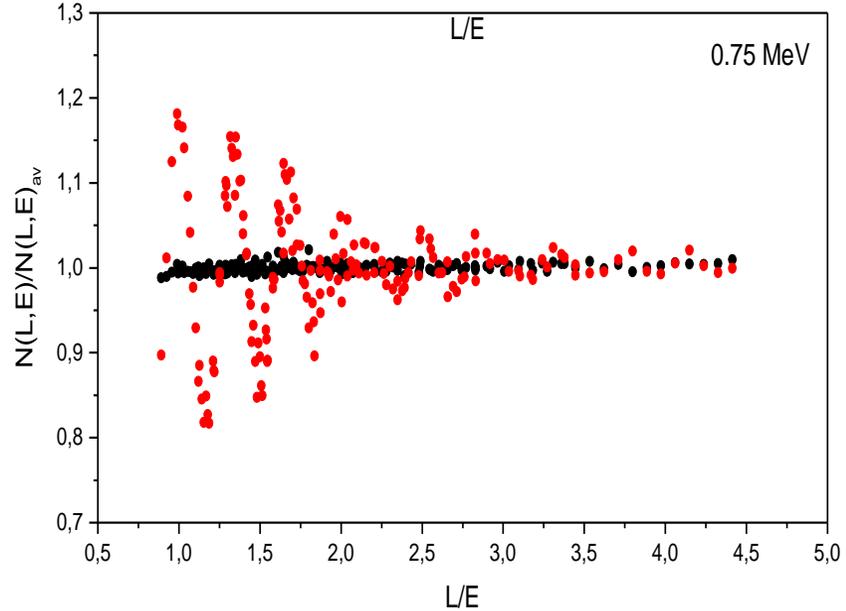


разрешающая способность
по энергии **0.25 MeV**

Ожидаемый эффект для различных энергетических разрешений детектора в МС расчете



разрешающая способность
по энергии
0.5 MeV
(наш случай)



разрешающая способность
по энергии **0.75 MeV**

Обработка экспериментальных данных

Матрица измерений включает в себя данные потока антинейтрино от расстояния и энергии $N_{i,k}$. Она представлена элементами, обозначающими разностный сигнал в i -том интервале энергий и k -том интервале расстояний от центра реактора. Эта матрица должна сравниваться расчетной матрицей, пример которой представлен ранее. Сравнение экспериментальных результатов с полученной МС расчётами матрицей может быть проведено используя метод $\Delta\chi^2$

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

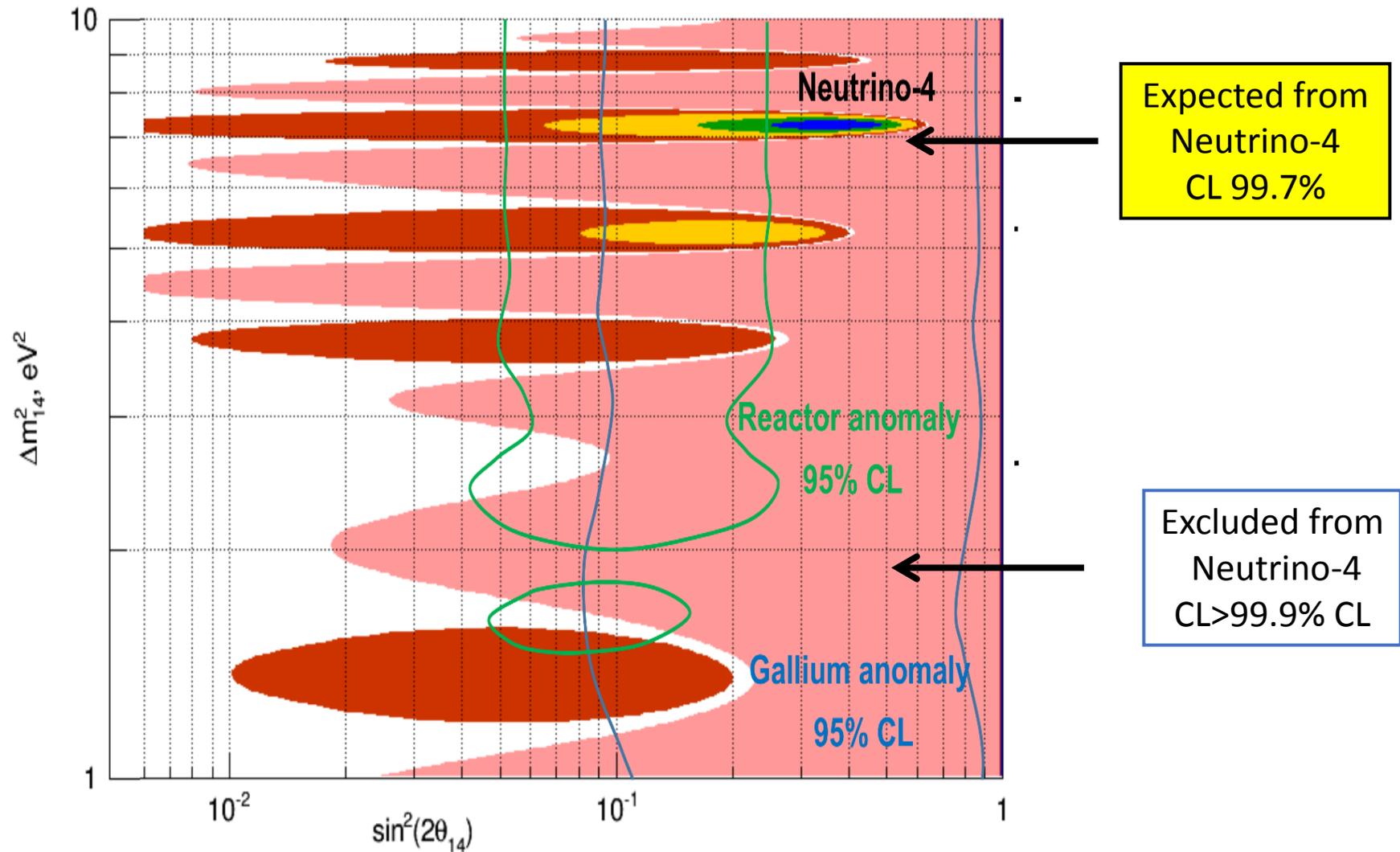
Результаты анализа параметров Δm_{14}^2 и $\sin^2 2\theta_{14}$ используя χ^2 метод

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

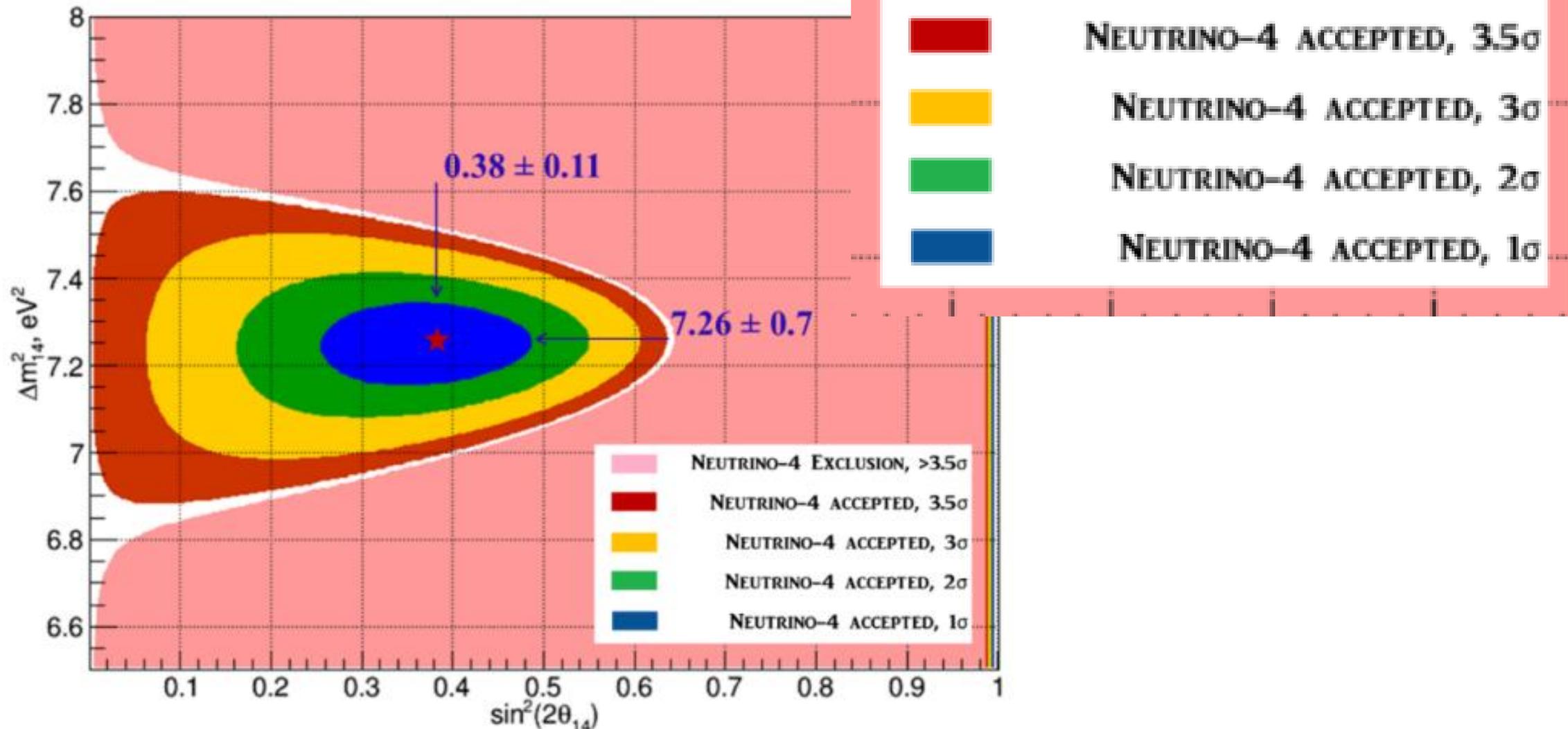
Мы наблюдаем эффект осцилляций при С.Л. 99,7% ($3,5\sigma$) вблизи:

$$\Delta m_{14}^2 \approx 7\text{eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.38$$

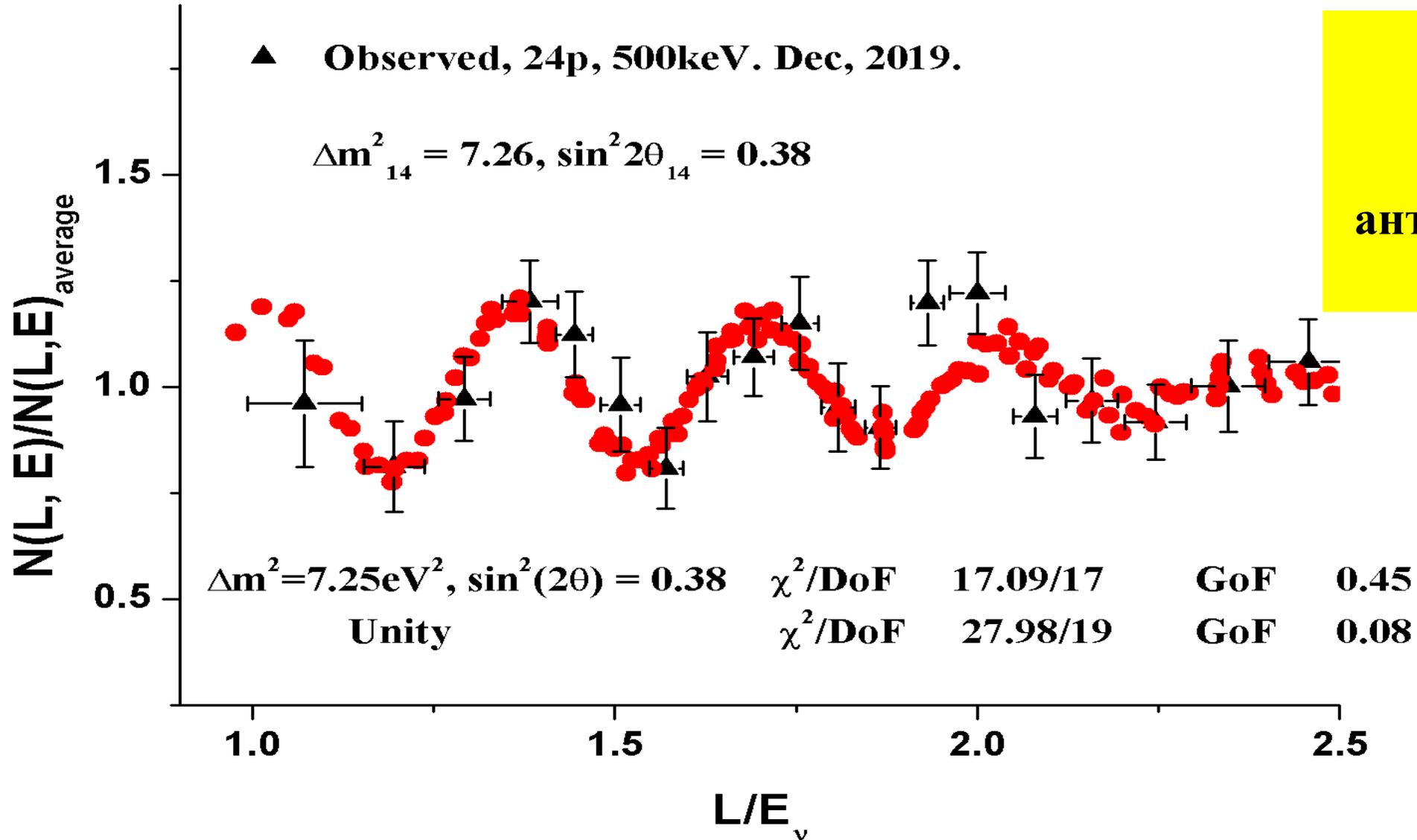


Центральная область эффекта



Area of acceptable with 99.73% CL values of the parameters (yellow), area of acceptable with 95.45% CL values of the parameters (green), area of acceptable with 68.30% CL values of the parameters (blue).

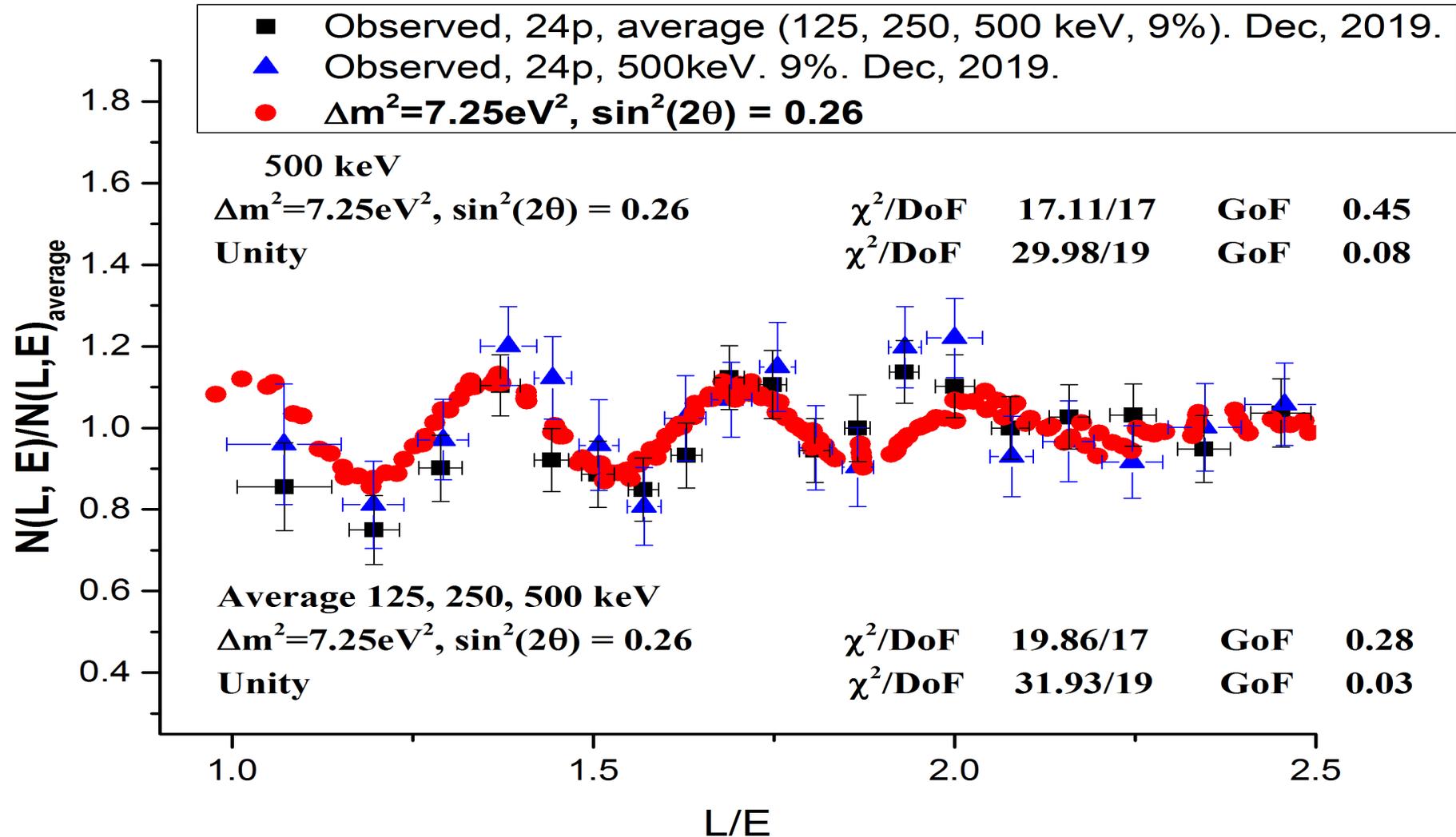
Все данные 2016 -2019 + фон 20119



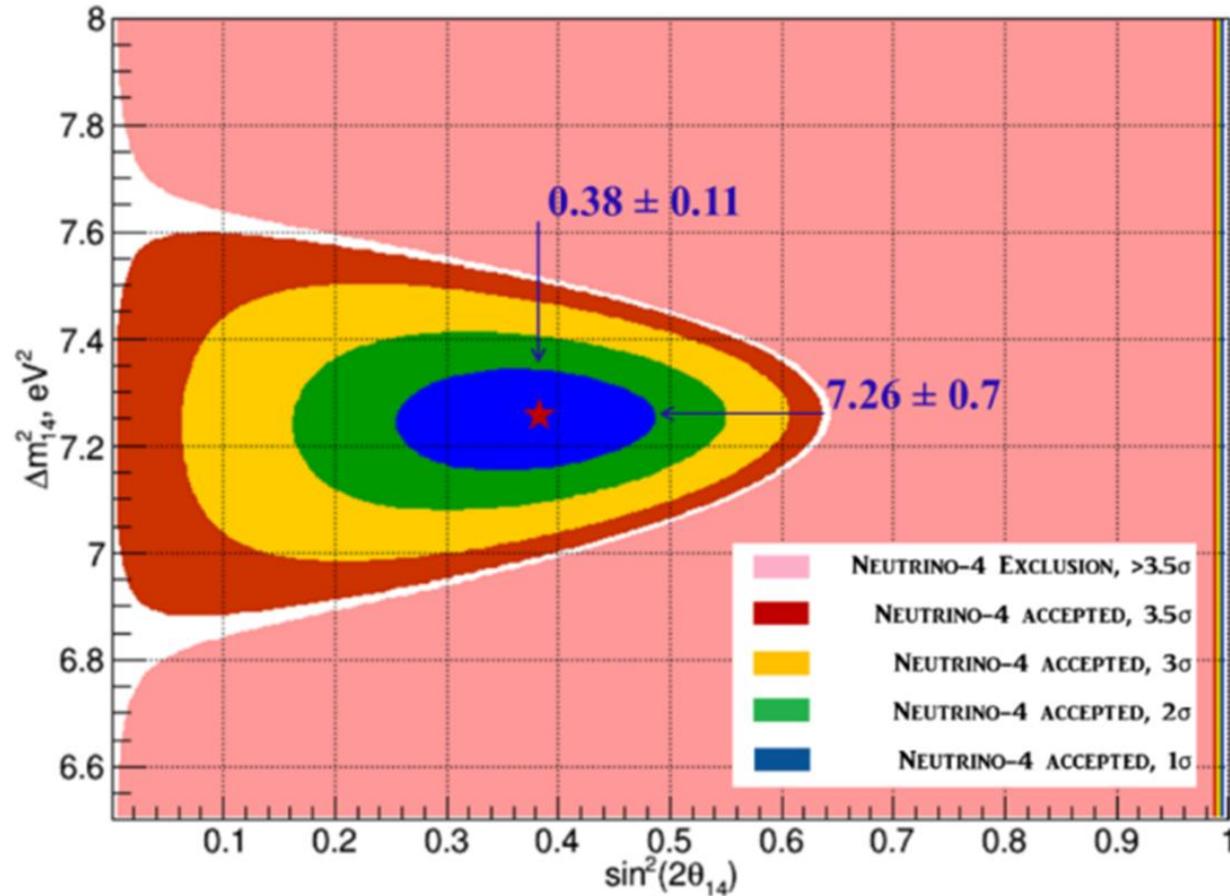
**Период
из осцилляций
для энергии
антинейтрино 4 МэВ
1,4 м**

A.P.Serebrov, et al.
JETP Letters,
Volume 109,
Issue 4, pp 213–221.
[arxiv:1809.10561](https://arxiv.org/abs/1809.10561)

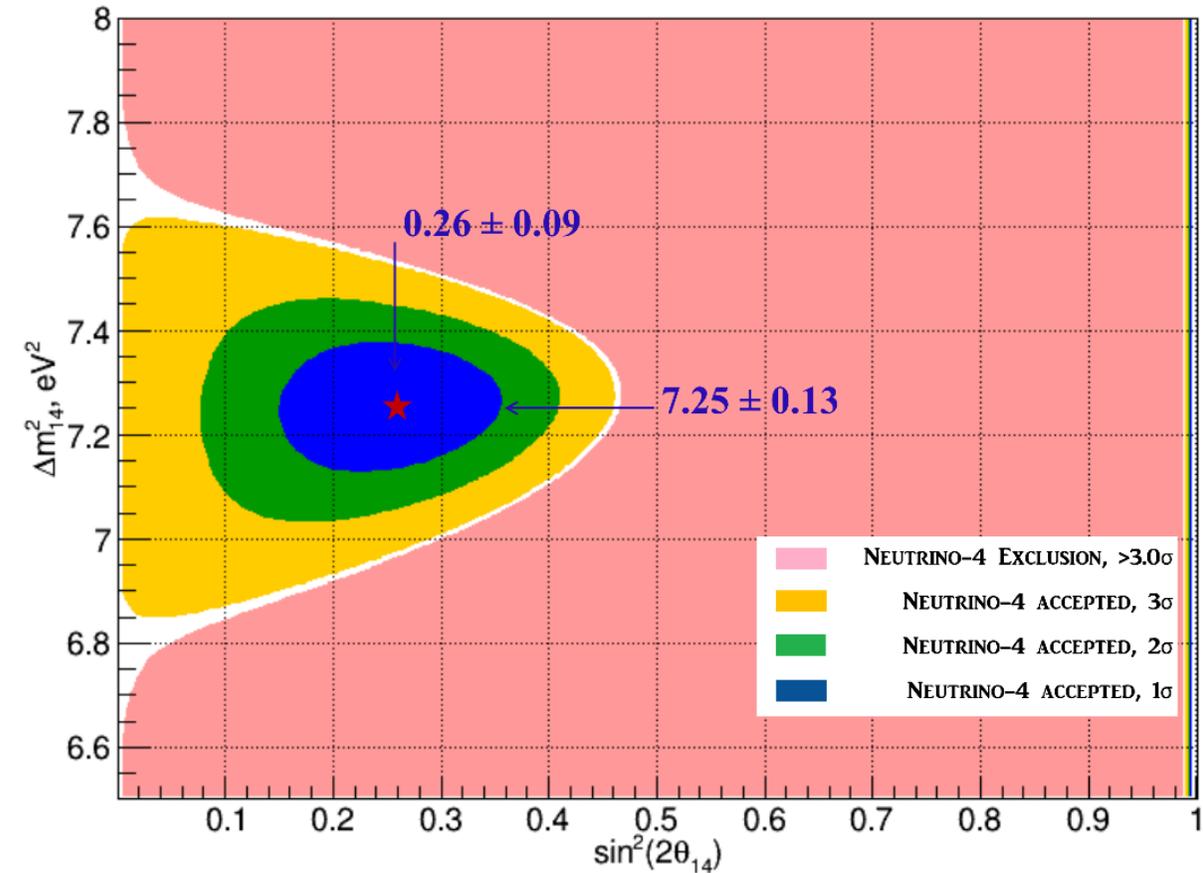
Результаты анализа данных с энергетическим интервалом 500 кэВ, что соответствует энергетическому разрешению детектора (синие треугольники). Результаты анализа данных с усреднением по энергетическим интервалам 125кэВ, 250кэВ и 500кэВ (синие треугольники)



Результаты анализа данных с энергетическим интервалом 500keV



Результаты анализа данных с усреднением по энергетическим интервалам 125keV, 250keV и 500keV



Из соображений надёжности окончательного результата мы выбираем случай обработки данных с усреднением

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

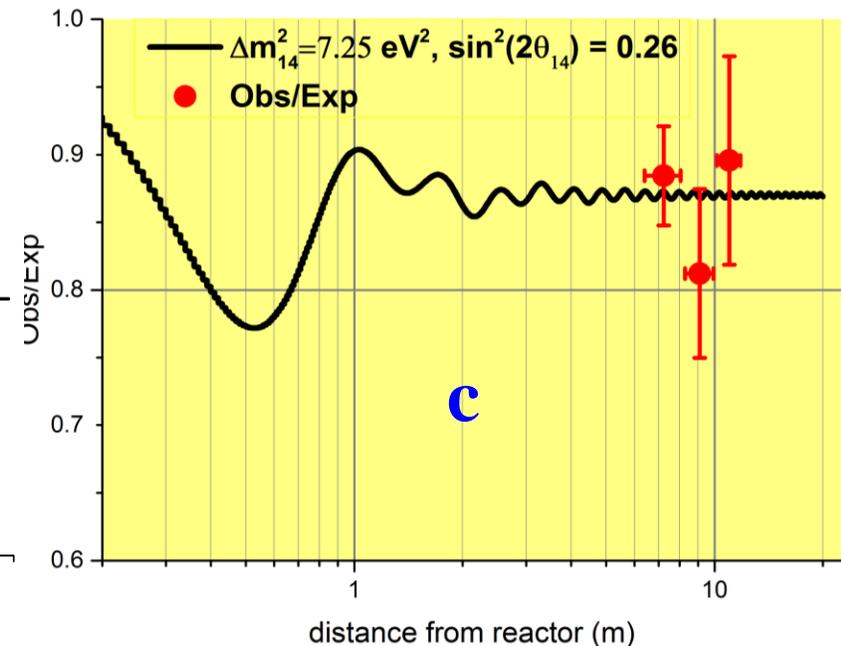
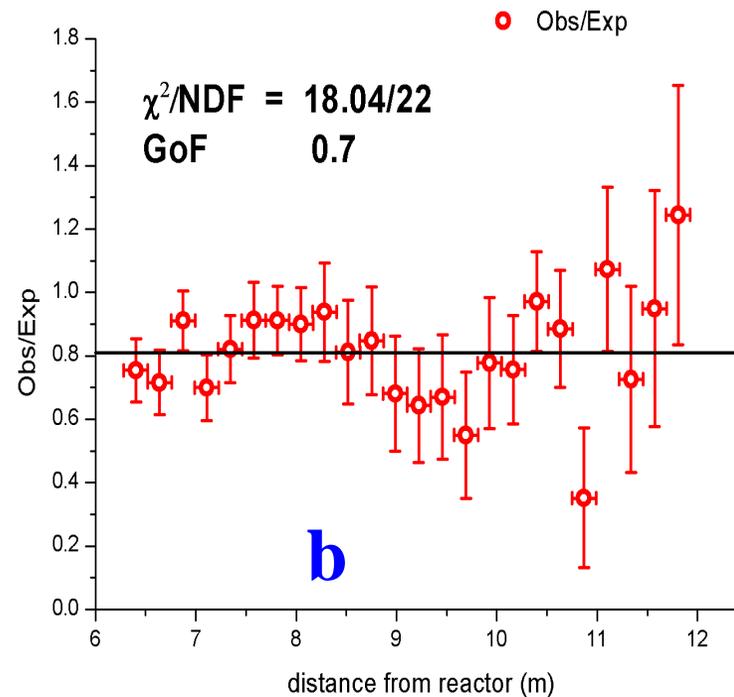
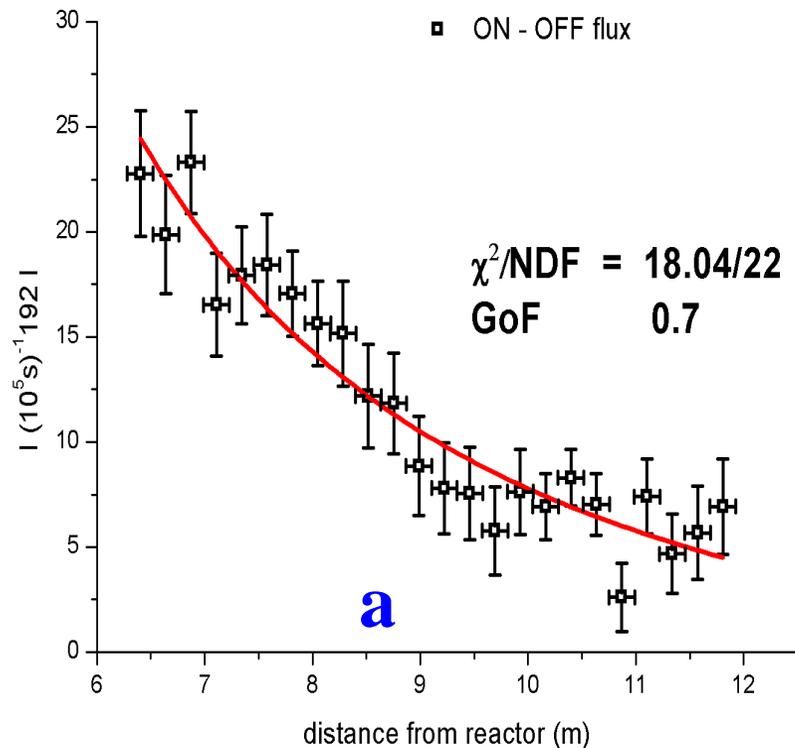
$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.26 \pm 0.08(3.0)\sigma$$

Зависимость антинейтринного потока от расстояния до активной зоны

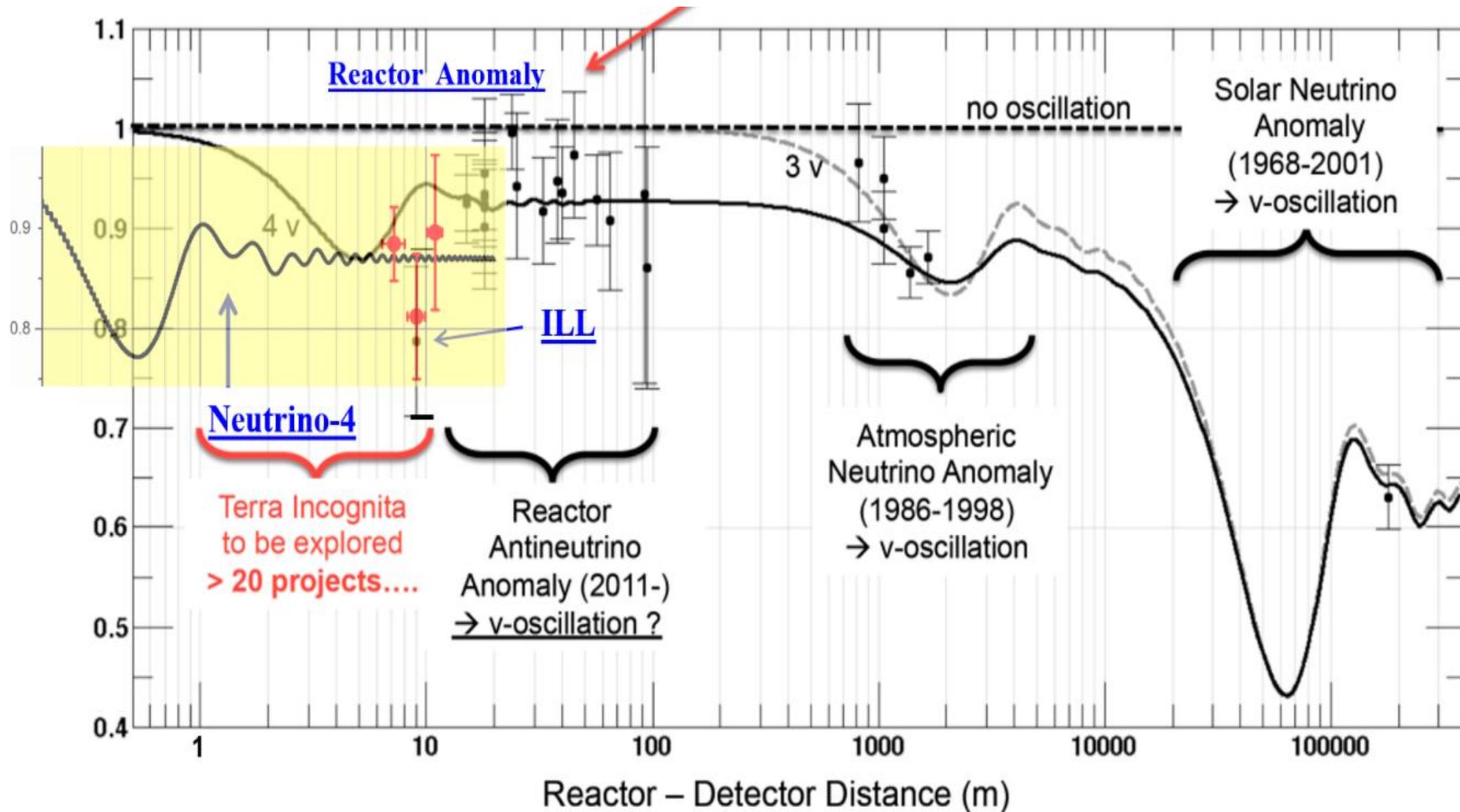
а - прямая экспериментальная зависимость,

б - нормализованная экспериментальная зависимость,

с - кривая колебаний с экспериментальными результатами в диапазоне 6-12 м.

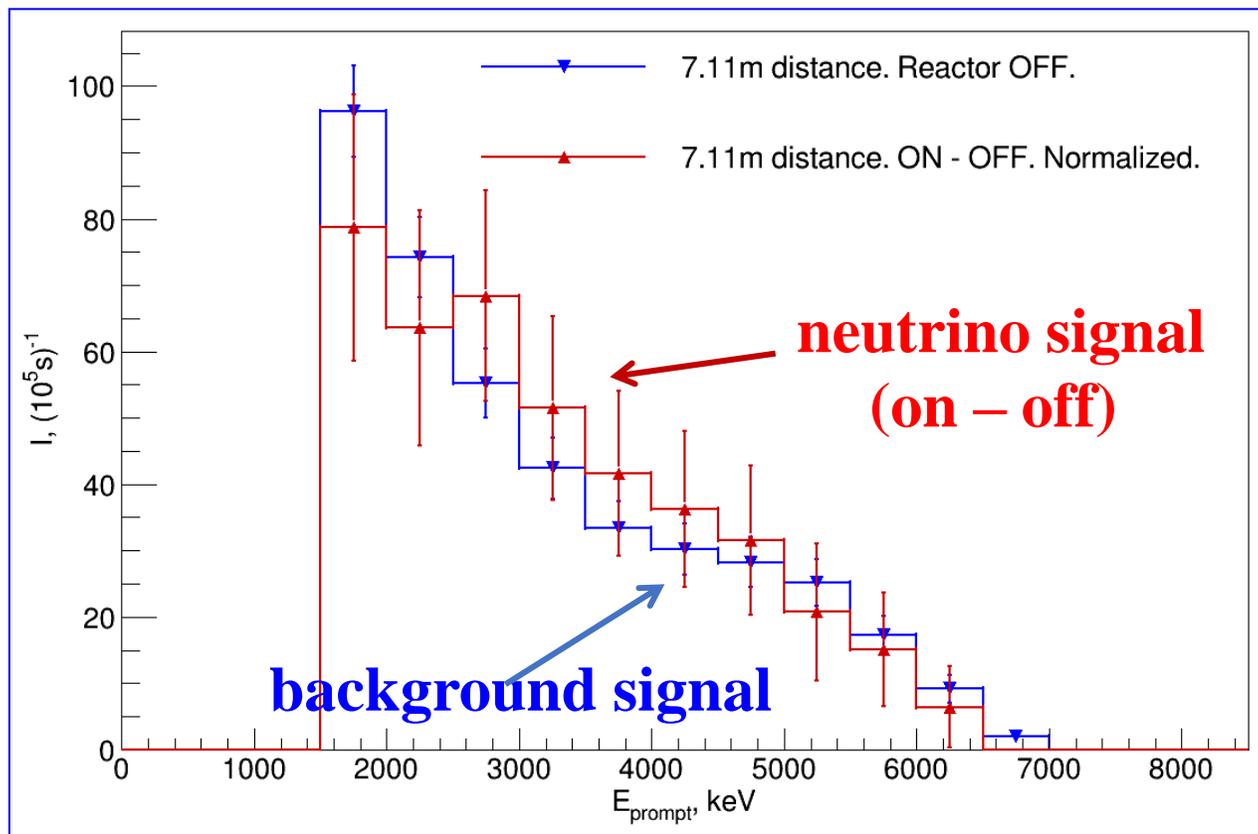


Реакторная антинейтринная аномалия с кривой осцилляций из эксперимента Нейтрино-4

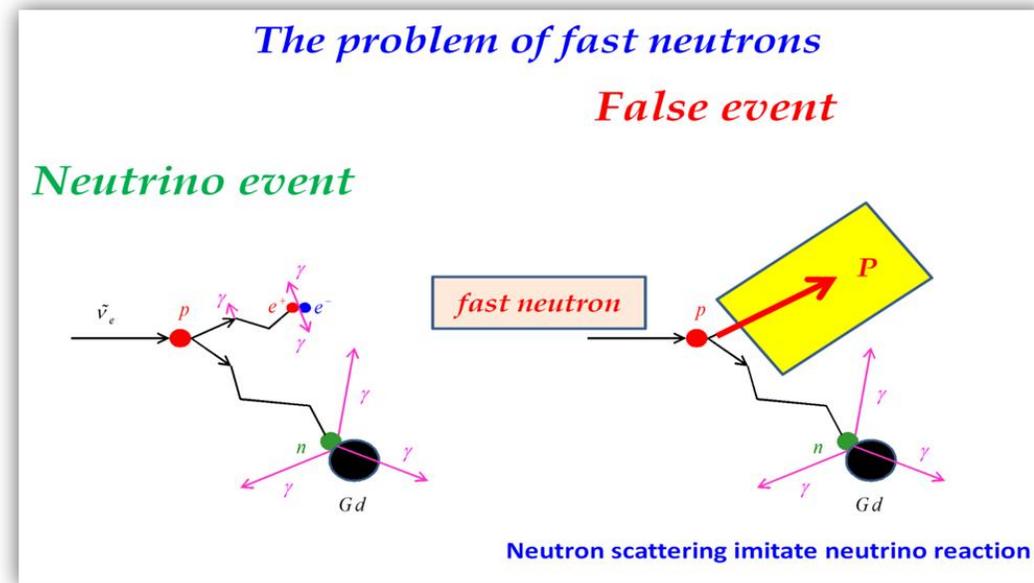


Анализ возможных систематических эффектов

Для проведения анализа возможных систематических эффектов нужно выключить поток антинейтрино (реактор) и провести такой же анализ фоновых данных

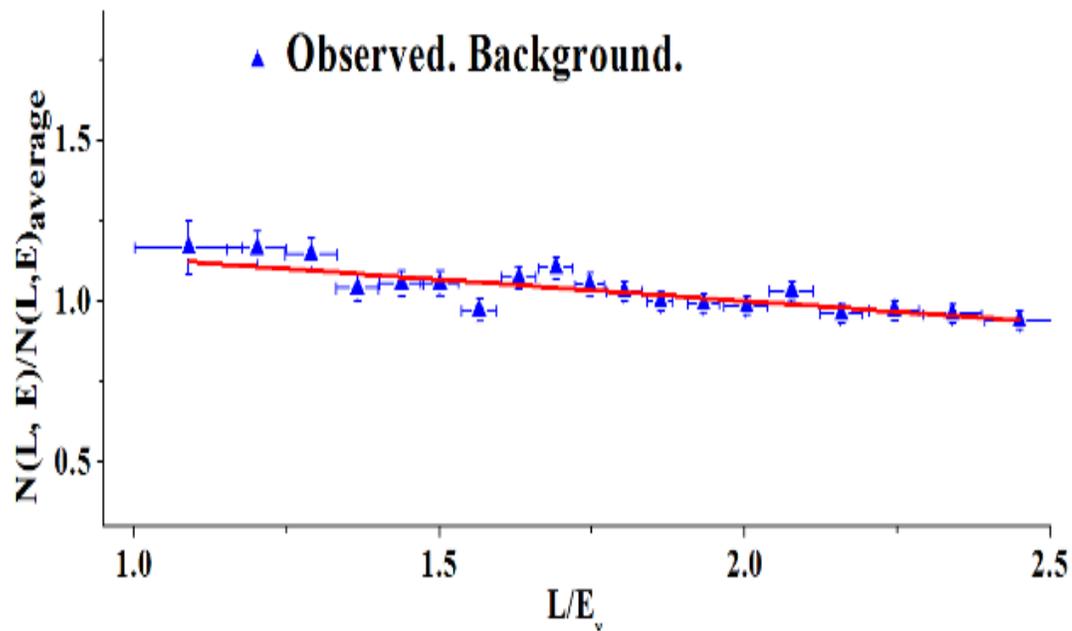


Спектр для сигнала антинейтрино и фоновый сигнал аналогичны. Поэтому испытание на систематический эффект должно быть адекватным.

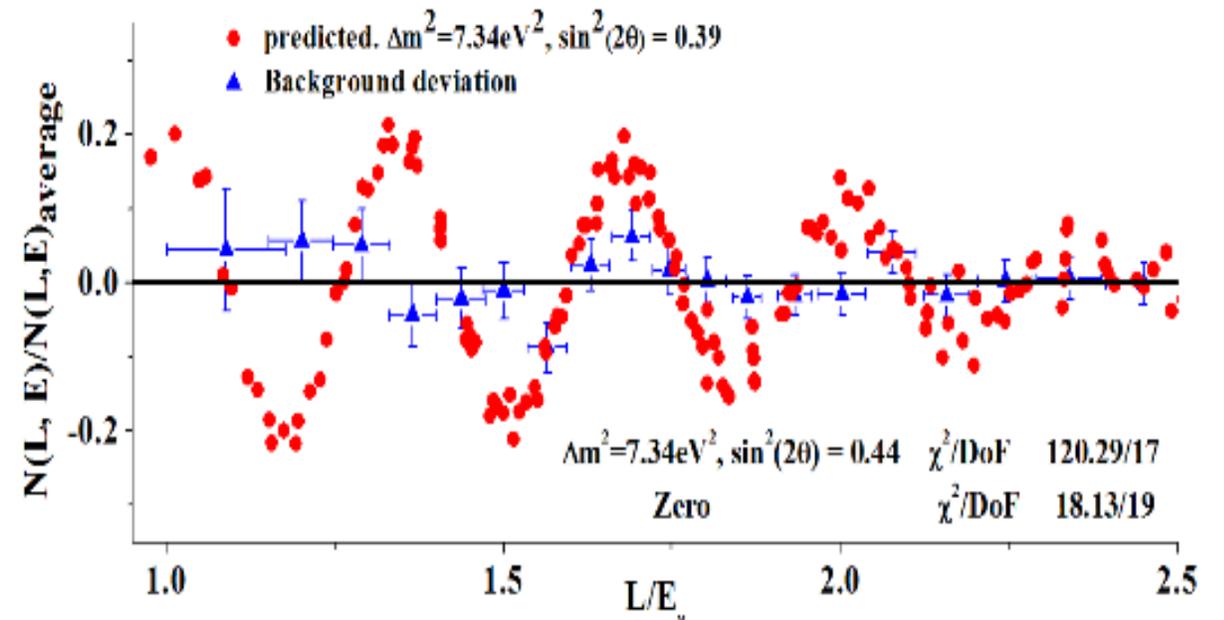


Испытание на систематический эффект

Для проведения анализа возможных систематических эффектов исключить поток антинейтрино (реактор) и провести такой же анализ фоновых данных



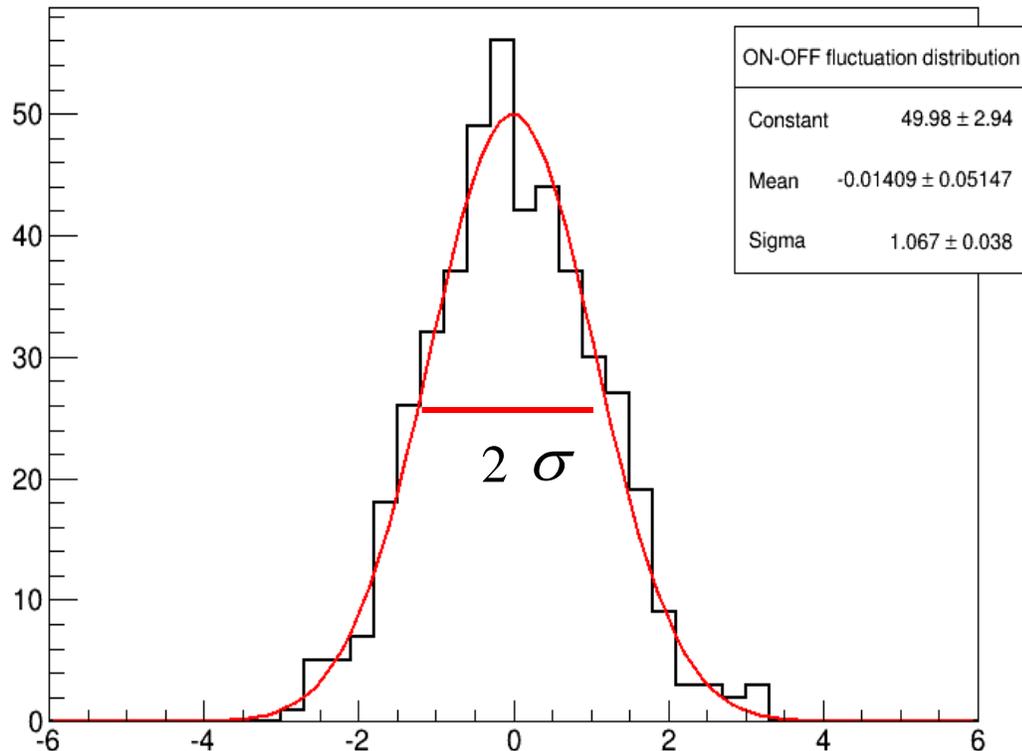
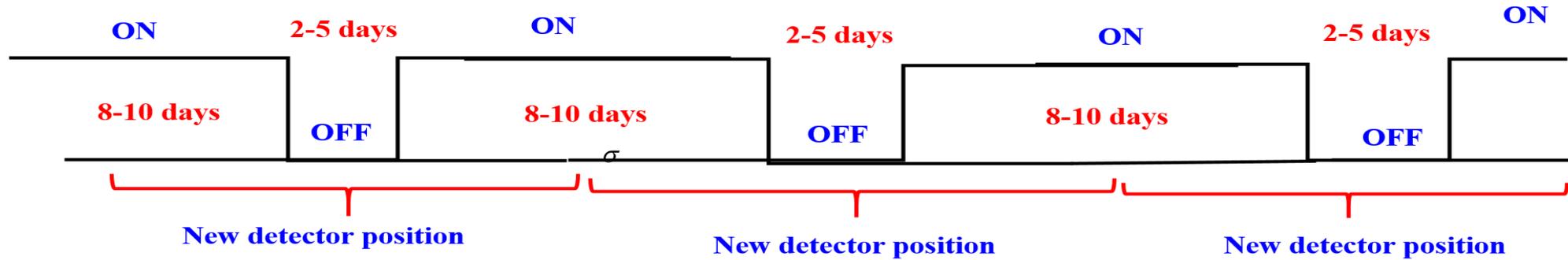
data analysis using coherent summation method



analysis of the results on oscillation parameters plane

Таким образом, никаких инструментальных систематических ошибок не наблюдалось

Дополнительная дисперсия результата измерения, возникающая из-за колебаний космического фона



$$\sigma = 1.070 \pm 0.045$$

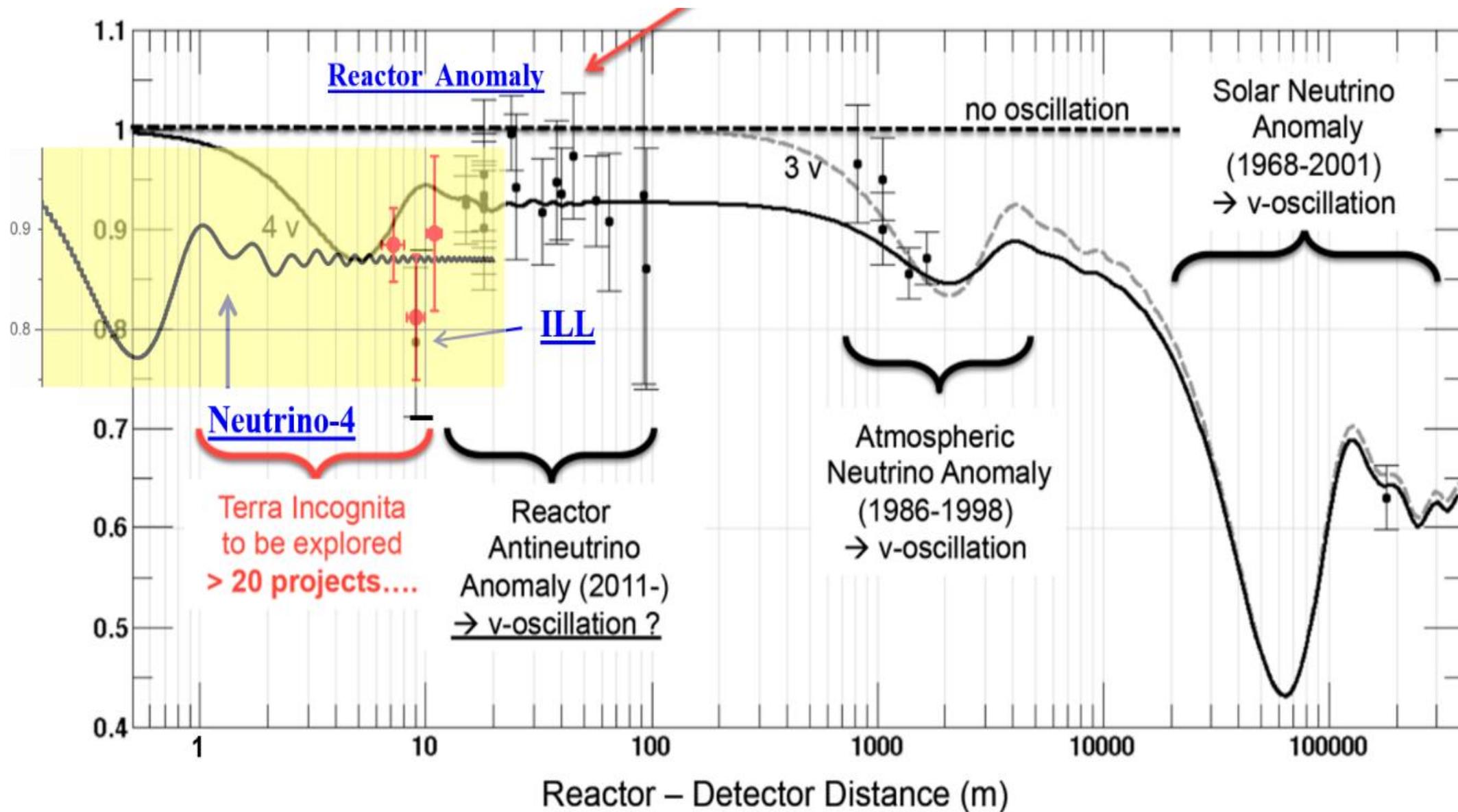
Это распределение имеет форму нормального распределения, но его ширина превышает единицу на **7%**

**Сравнение результатов эксперимента Нейтрино-4 с
реакторной и галлиевой аномалиями**

**Сравнение с результатами других экспериментов на
исследовательских реакторах и АЭС**

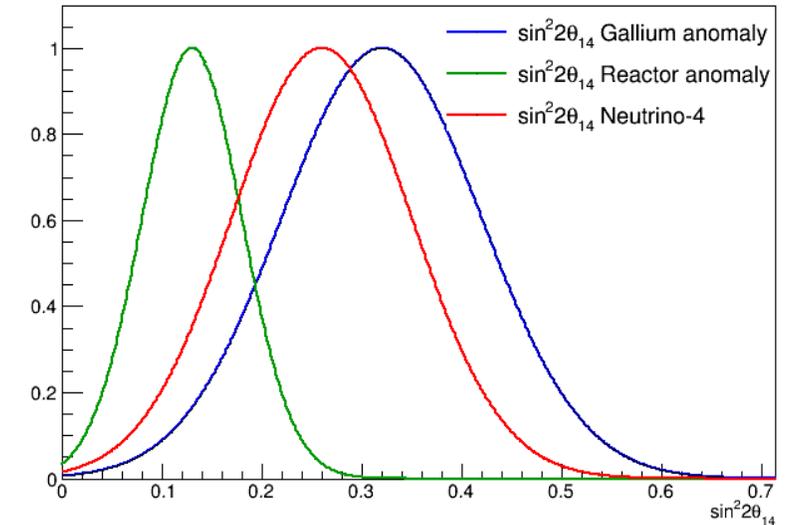
**Сравнение результатов эксперимента Нейтрино-4 с
результатами экспериментов на ускорителях
MiniBooNE и LSND**

Реакторная антинейтринная аномалия с кривой осцилляций из эксперимента Нейтрино-4.



Сравнение результатов эксперимента Нейтрино-4 с реакторной и галлиевой аномалиями

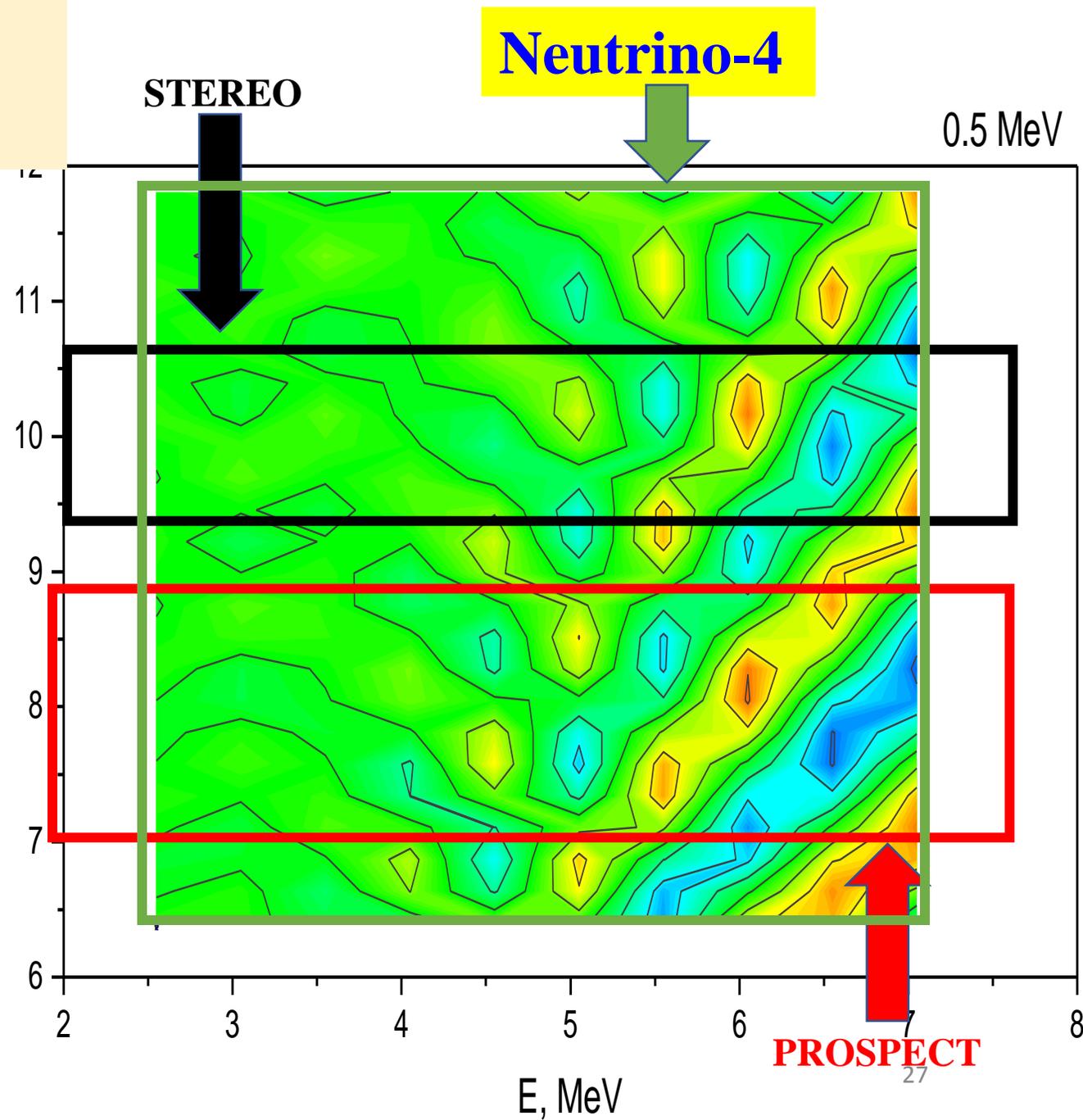
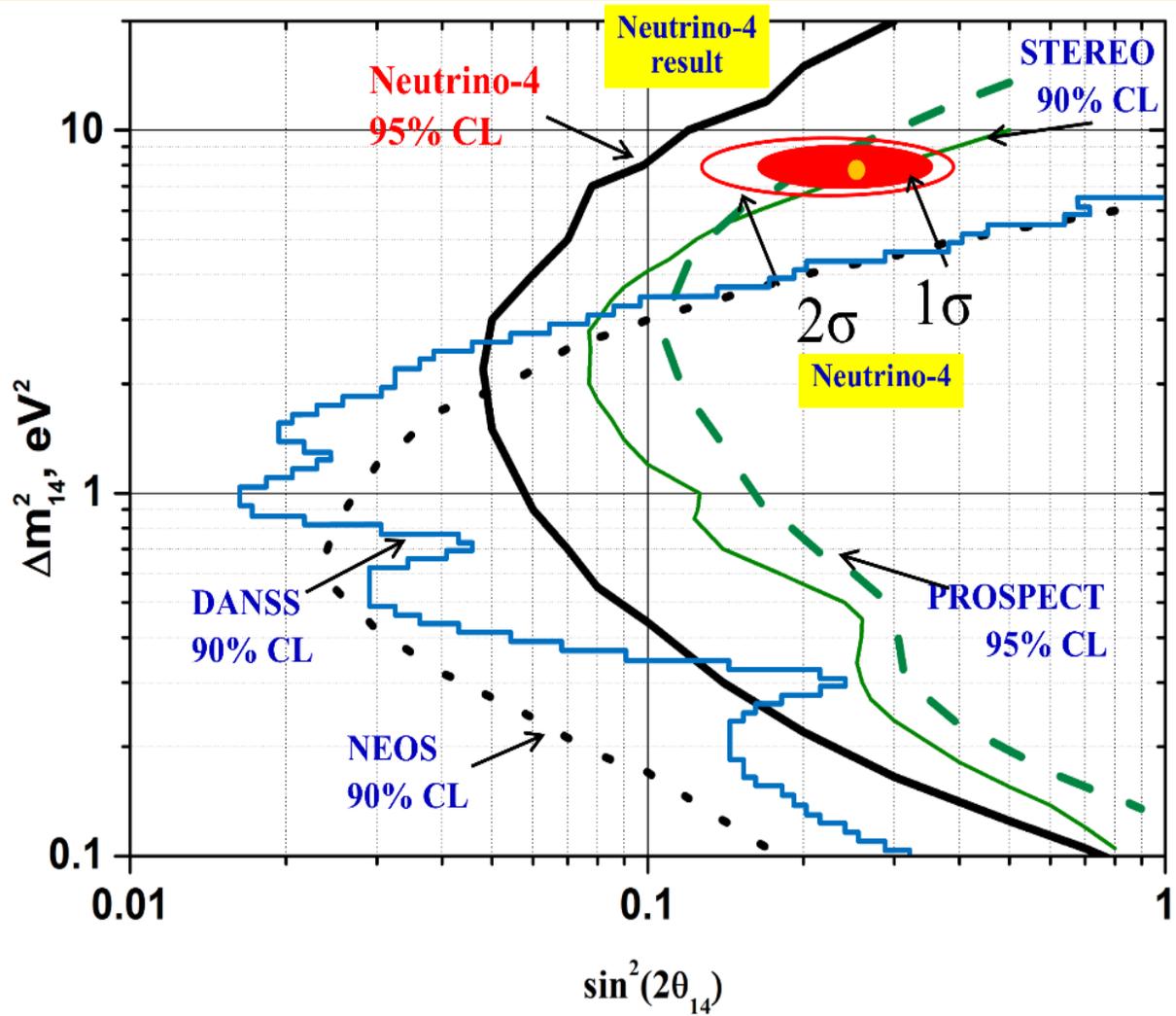
	Reactor anomaly	Neutrino-4	Gallium anomaly
$\sin^2 2\theta$	0.13 ± 0.05 (2.6σ)	0.26 ± 0.09 (3.0σ)	0.32 ± 0.10 (3.2σ)
	0.29 ± 0.07 (4.3σ)		
	0.19 ± 0.04 (4.6σ)		



Combination of these results gives an estimation for mixing angle

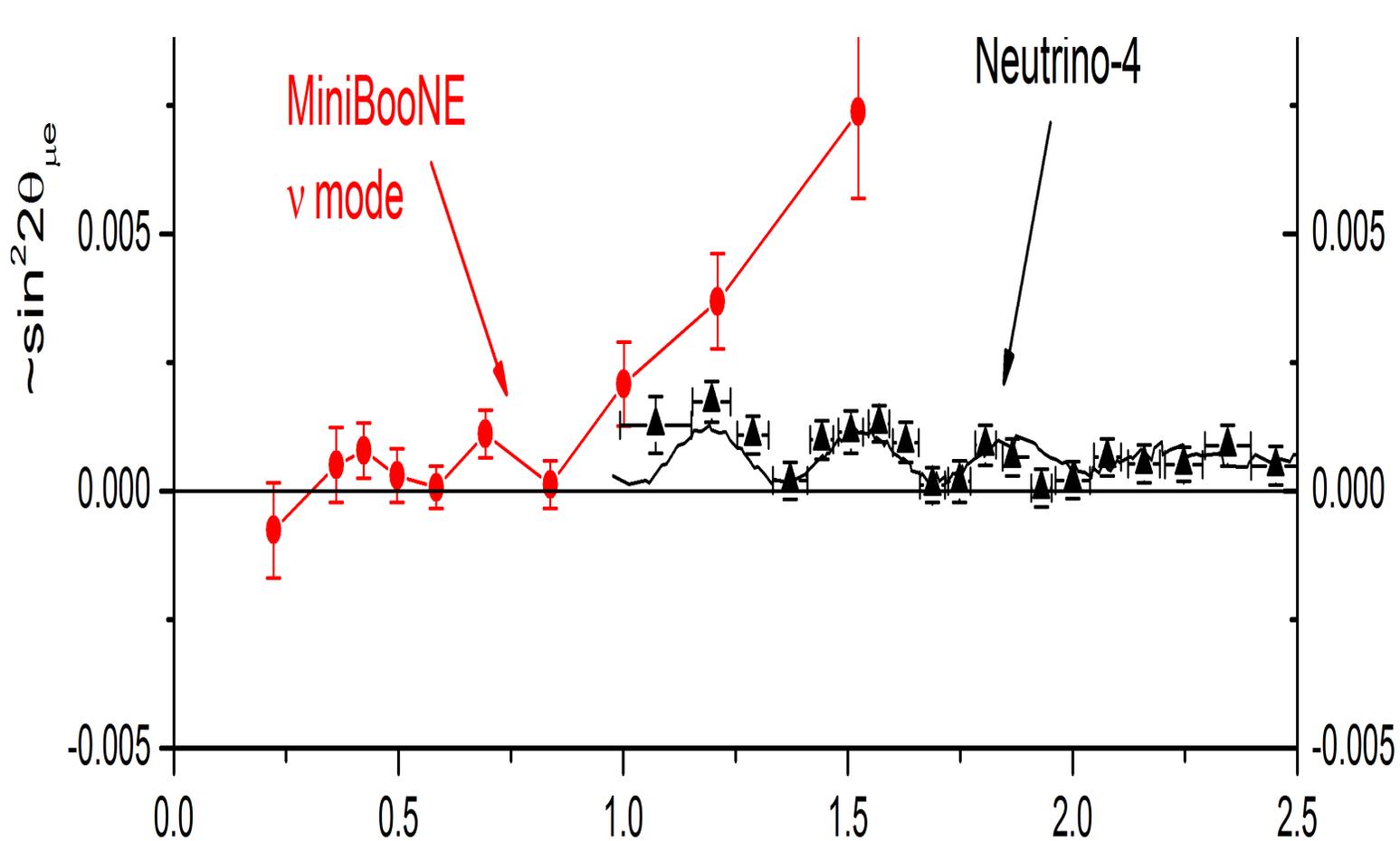
$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.19 \pm 0.04 (4.6\sigma).$$

Сравнение с результатами других экспериментов на исследовательских реакторах и АЭС



PROSPECT₂₇

Сравнение результатов эксперимента Neutrino-4 с результатами экспериментов на ускорителях MiniBooNE и LSND



$$\sin^2 2\theta_{\mu e} = 4|U_{\mu 4}|^2 |U_{e 4}|^2$$

$$\sin^2 2\theta_{ee} \approx 4|U_{e 4}|^2$$

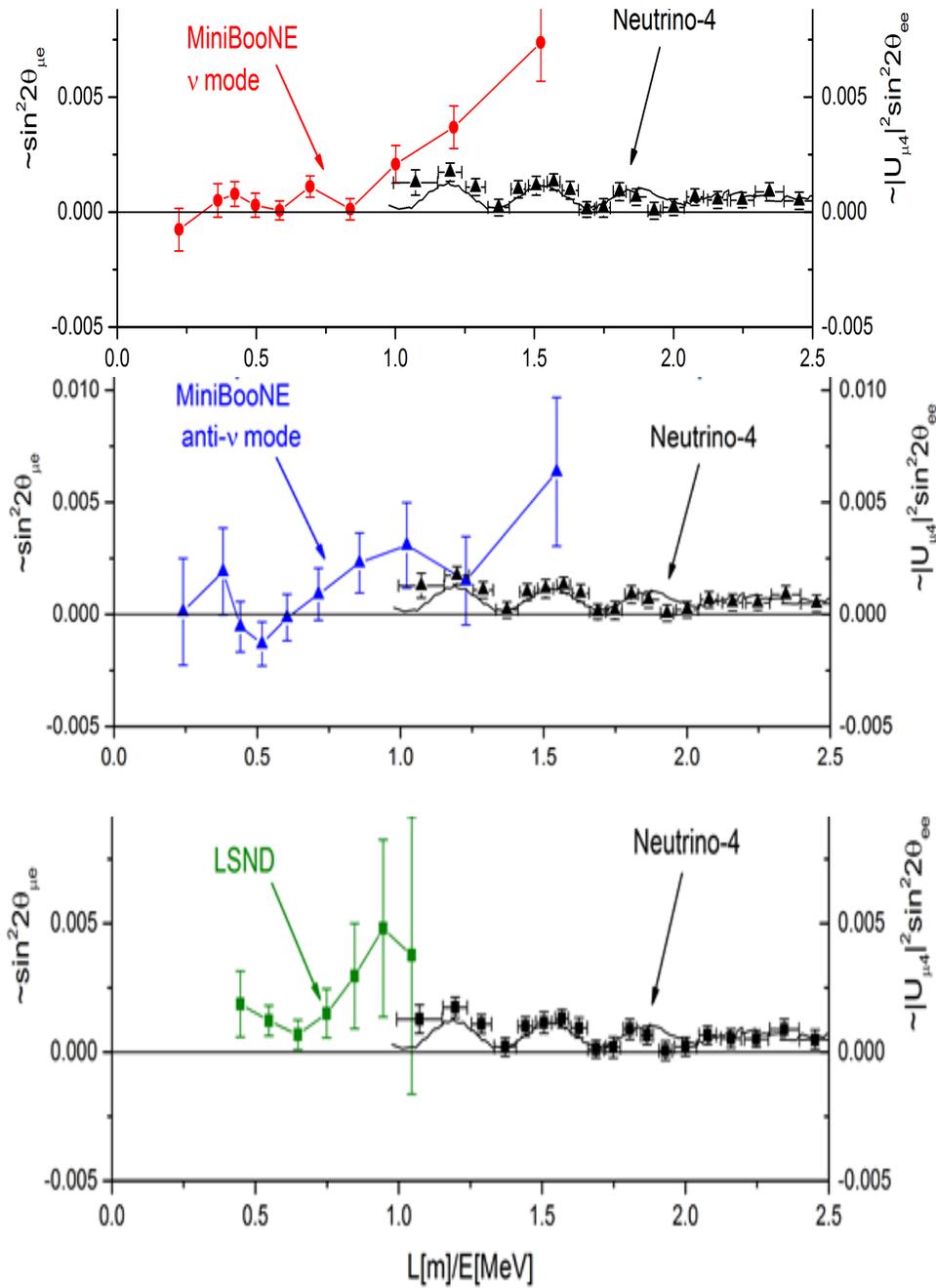
$$|U_{\mu 4}|^2 < 10^{-2} \text{ at 99\% CL.}$$

$$|U_{\mu 4}|^2 = 0.005$$

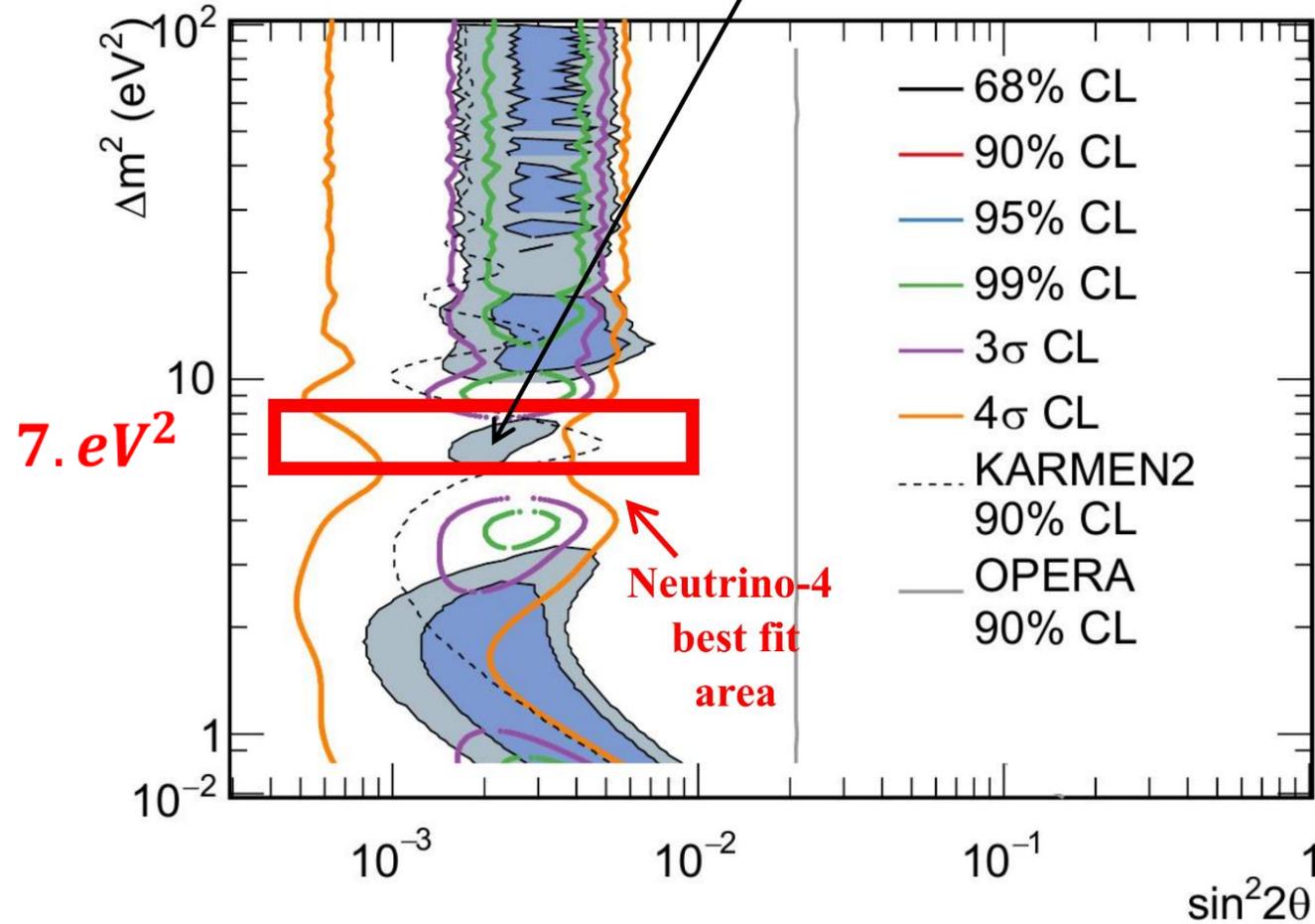
$$\sin^2 2\theta_{\mu e} = |U_{\mu 4}|^2 \sin^2 2\theta_{ee}$$

MiniBooNE

Neutrino-4



The black line shows the MiniBooNE CL 68%



There is a local minimum of χ^2 in the area of big values of parameter Δm_4^2 , which coincides with the minimum $\Delta m_{14}^2 \approx 7. eV^2$ of χ^2 from experiment Neutrino-4.

Сравнение с экспериментом KATRIN по измерению массы нейтрино

$$m_\beta = \sqrt{\sum_i m_i^2 / U_{ei}^2} \quad \sin^2 2\theta_{14} = 4 / U_{14}^2 (1 - /U_{14}^2)$$

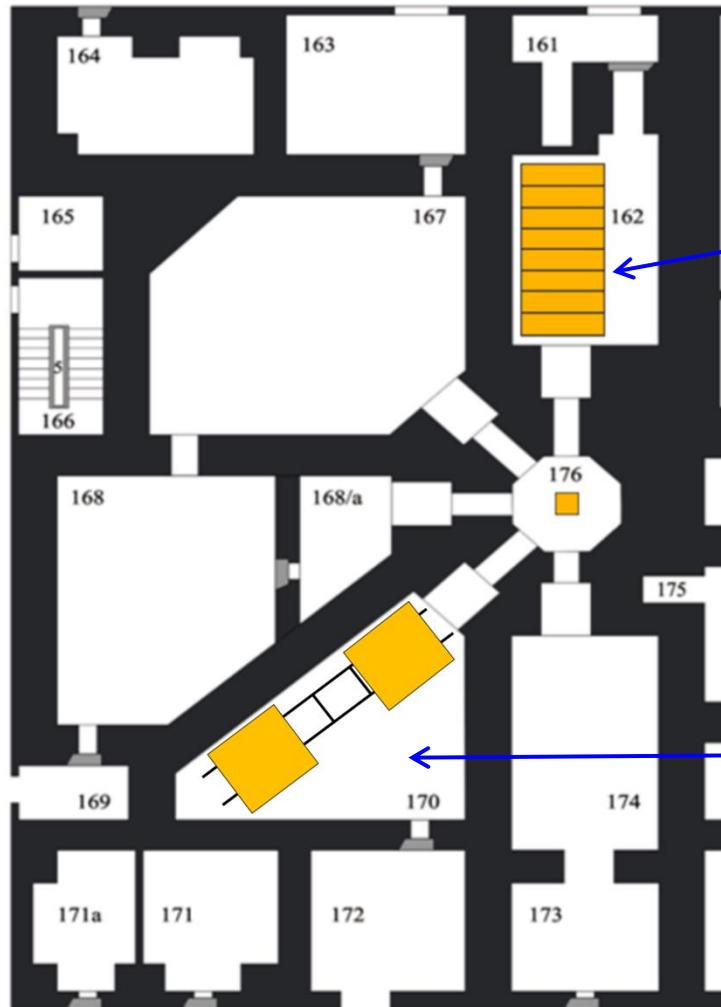
$$\Delta m_{14}^2 \approx m_4^2, \quad /U_{14}^2 \approx \frac{1}{4} \sin^2 2\theta_{14} \quad /U_{14}^2 \ll 1$$

$$m_\beta \approx \sqrt{7.26 \cdot 0.19 / 2} \approx 0.6 \text{ eV}$$

Вычисленная масса нейтрино не противоречит ограничению на массу нейтрино, полученному в эксперименте KATRIN $m_\beta \leq 1 \text{ eV}$

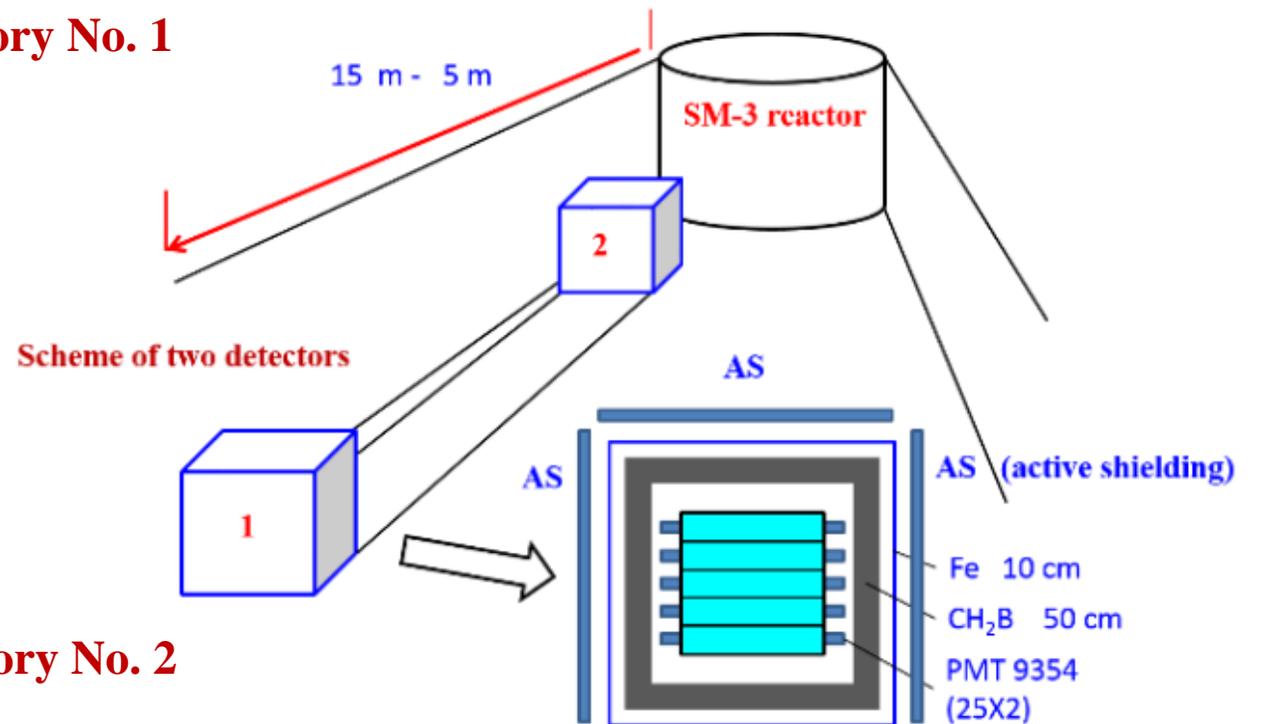
Более того, результаты определения параметров стерильного нейтрино делают возможным предсказать значение, которое может быть получено в эксперименте KATRIN.

Подготовка нового более точного эксперимента

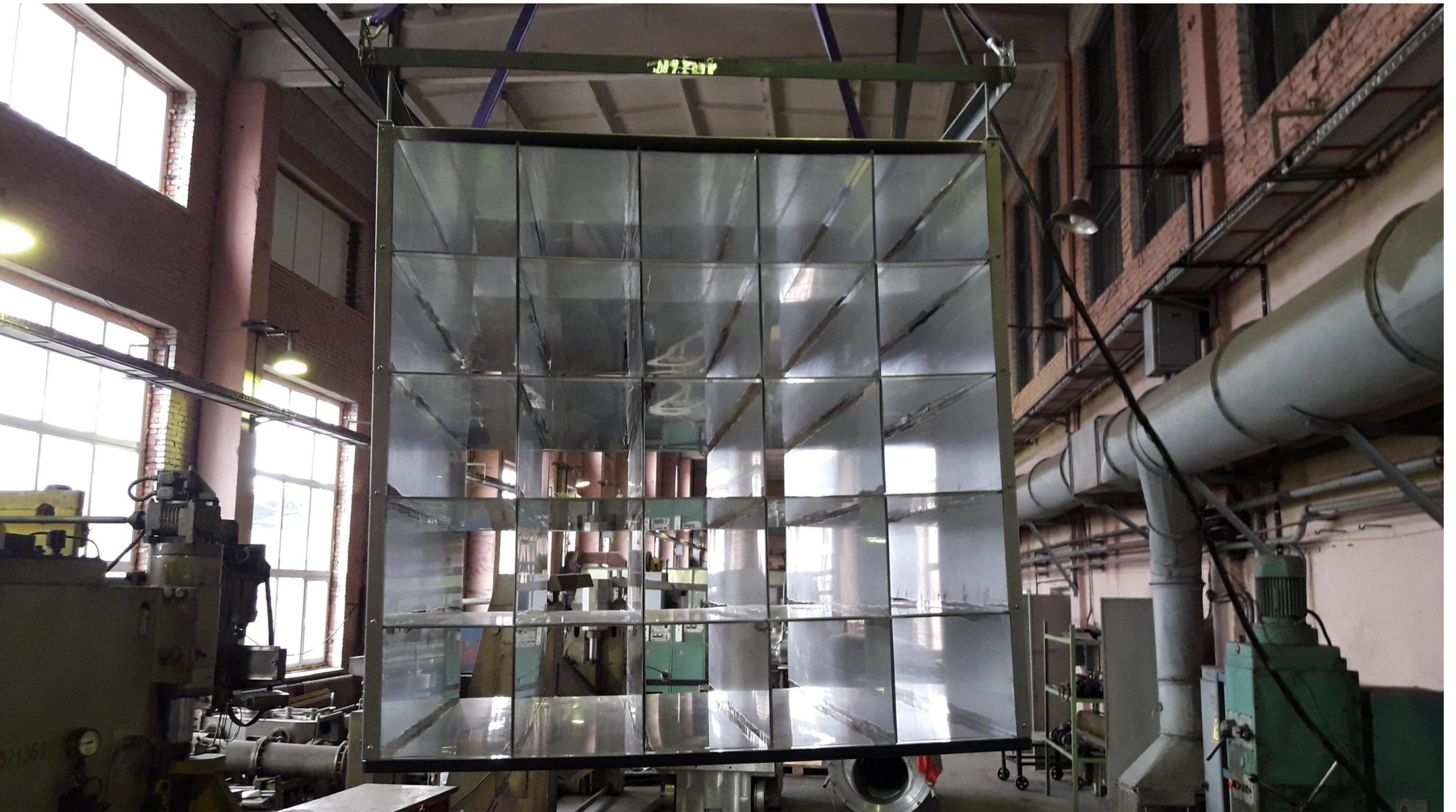


**Neutrino
Laboratory No. 1**

**Neutrino
Laboratory No. 2**











Ожидается повышение статистической ТОЧНОСТИ

Method	Consequence	Increasing accuracy factor
4 detectors	3x larger volume	1.6
Gd concentration	4x less accidental background	1.5
PSD	4x less correlated background	1.3
Total		3.1

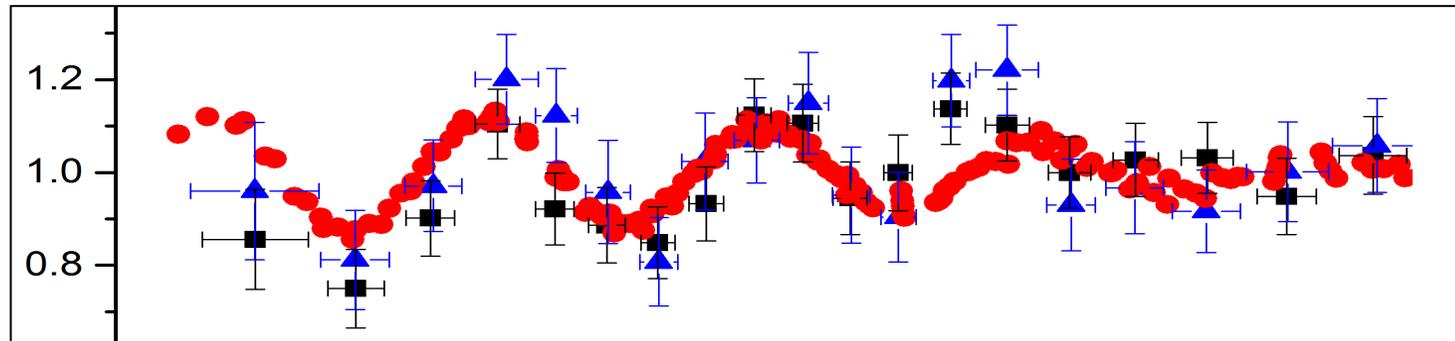
Заключение

Впервые наблюден эффект осцилляций электронных антинейтрино
в стерильные нейтрино

$$\Delta m_{14}^2 \approx 7.25 \pm 0.13 \text{eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.26 \pm 0.08$$

(3.0 σ)

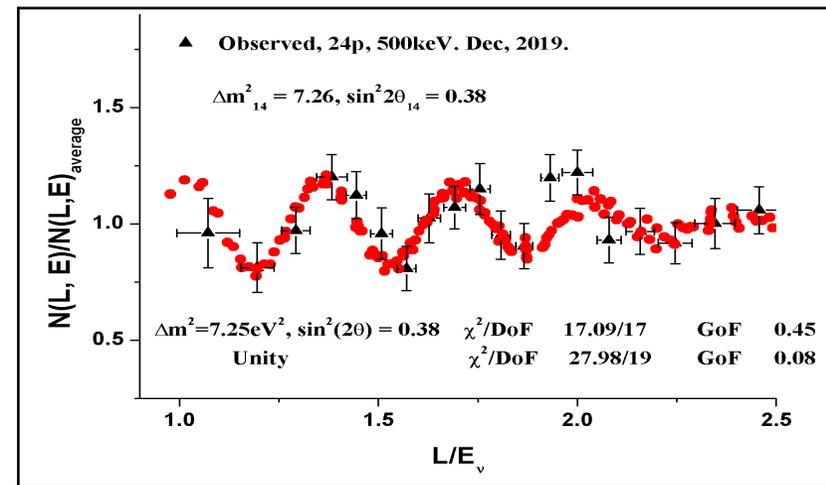
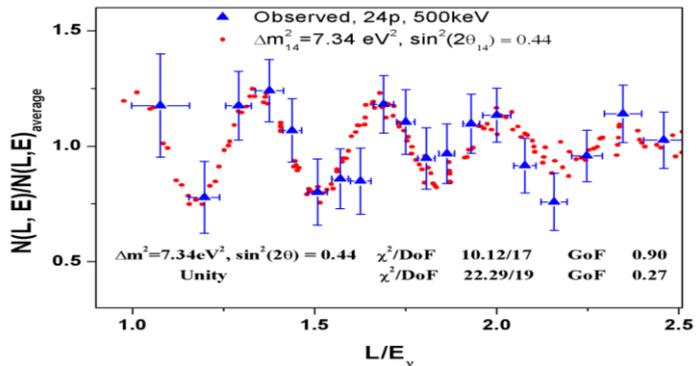


Объединение результатов эксперимента Нейтрино-4, реакторной и галлиевой
аномалий даёт оценку на угол смешивания $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.19 \pm 0.04(4.6\sigma)$

Из этих значений параметров осцилляций можно сделать оценку на массу
электронного нейтрино

$$m_\beta \approx 0.6 \div 0.8 \text{eV}$$

Спасибо за внимание



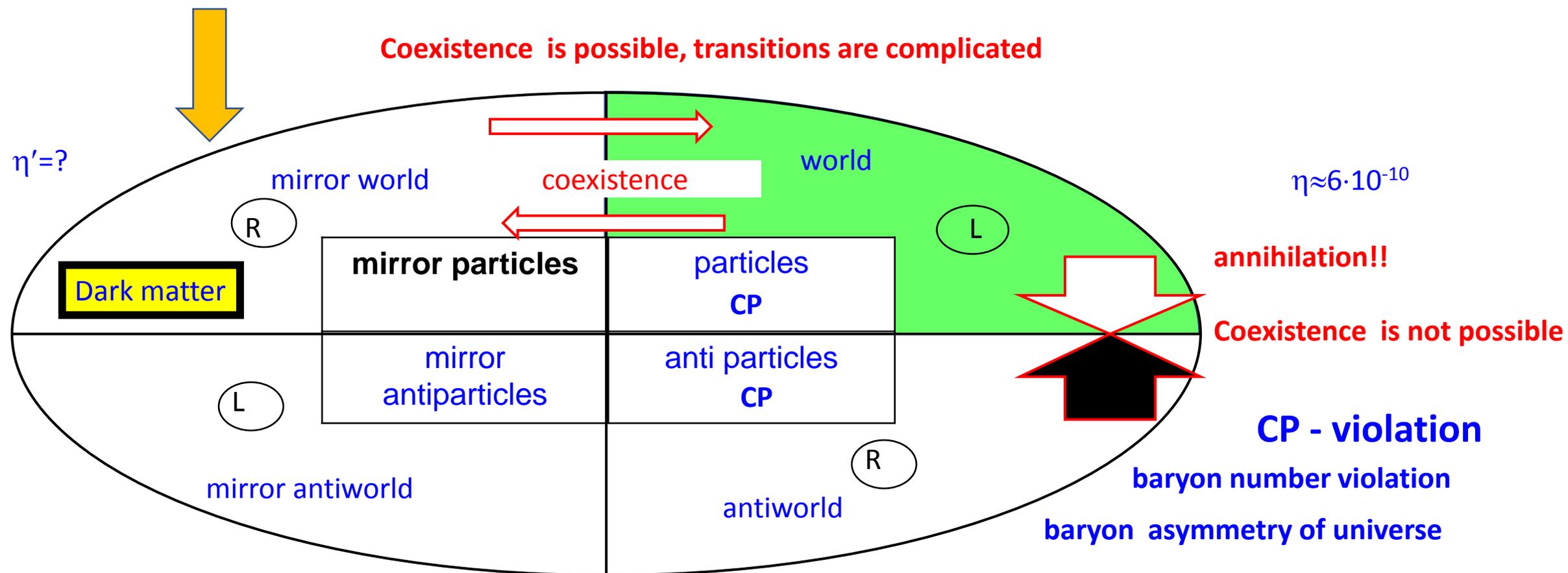
Best regards from Gatchina

Best regards from Dimitrovgrad

Back up

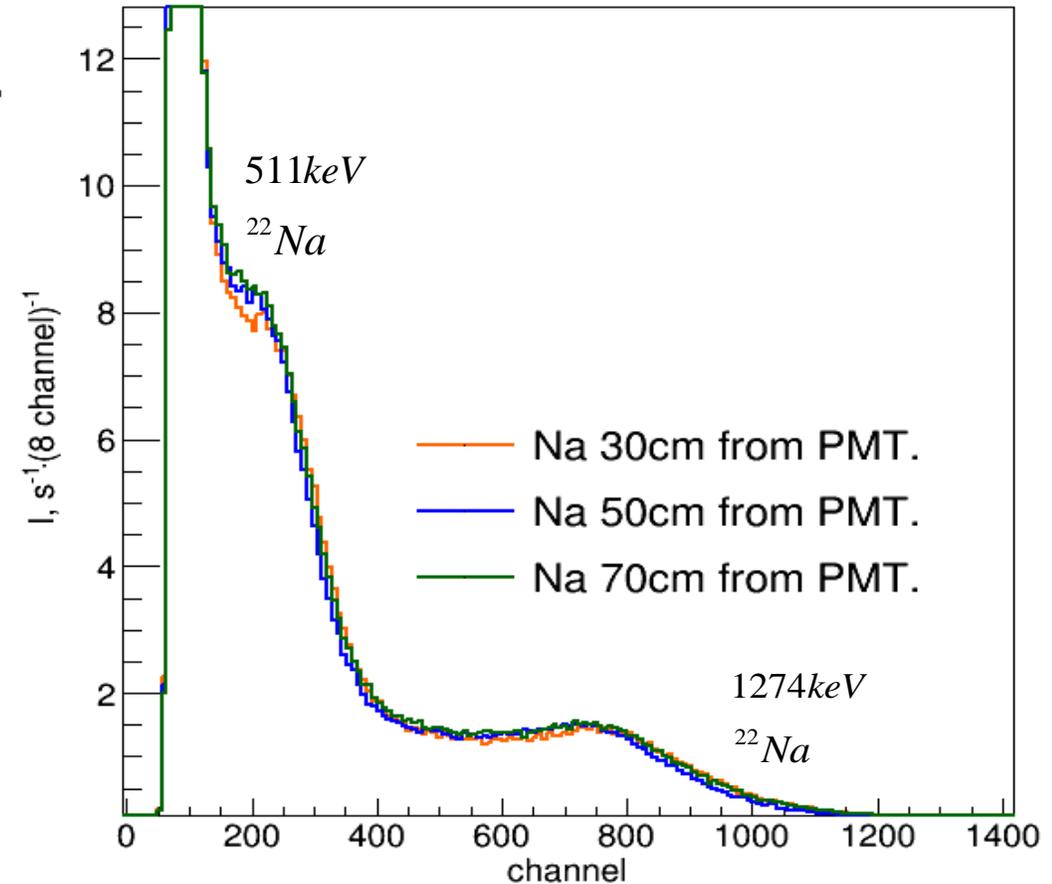
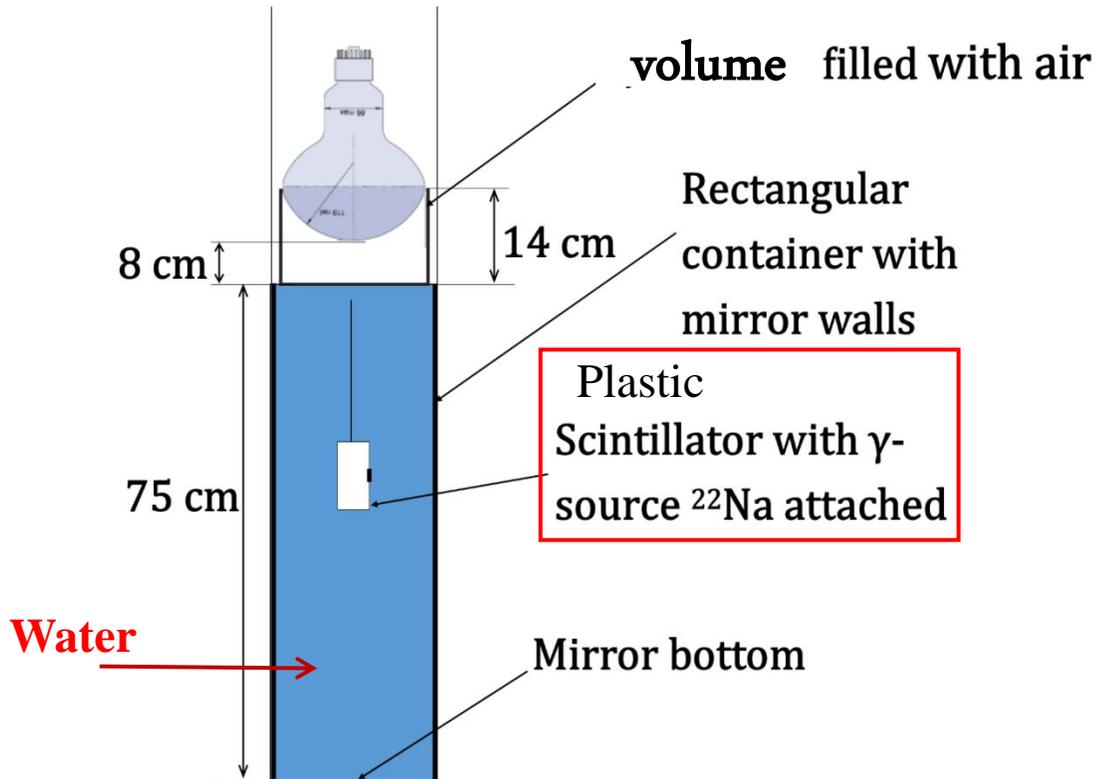
Two problems of fundamental interaction – baryon asymmetry of the universe and dark matter (left-right asymmetry in nature)

Sterile neutrino it is mirror neutrino – candidate for dark matter particle



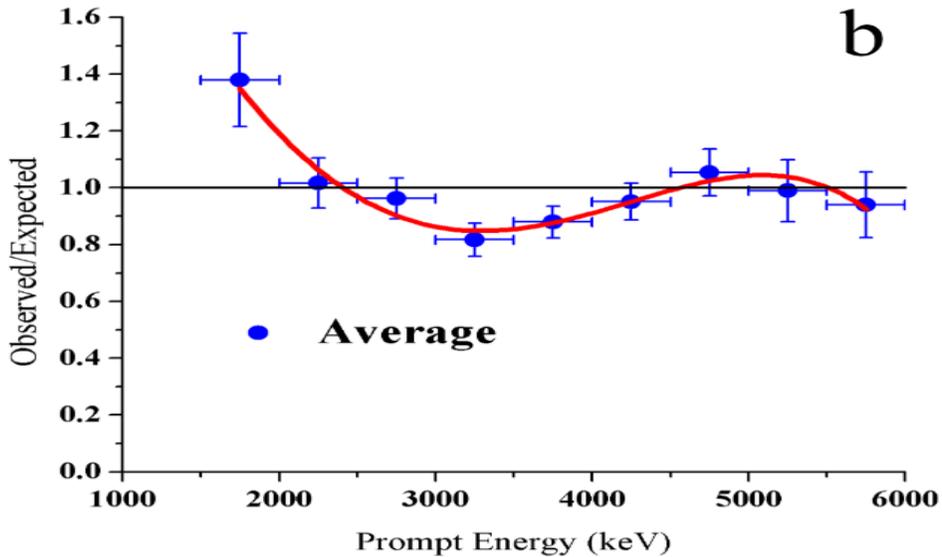
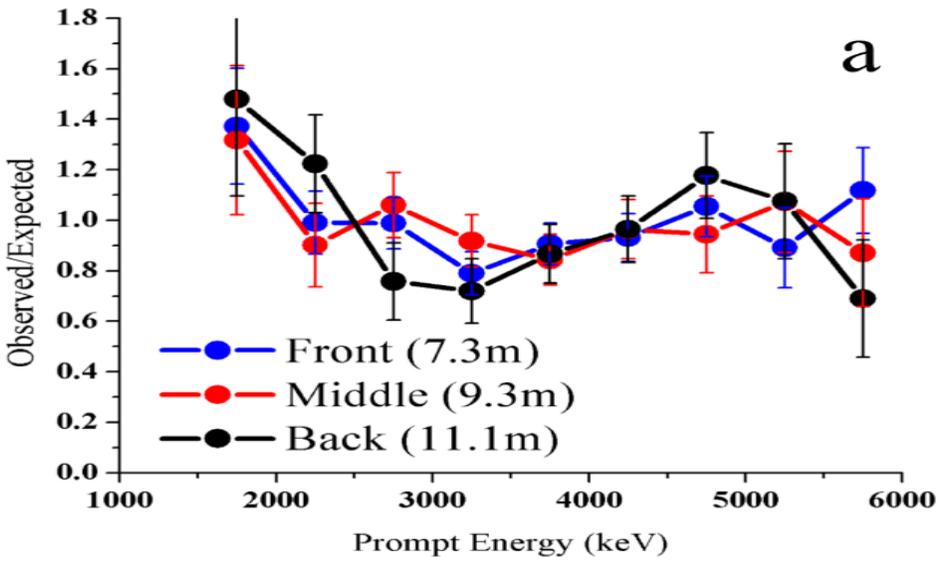
Энергетическая калибровка на модели одной секции

Мы используем эффект полного внутреннего отражения света на границе сцинтиллятор - воздух при малых углах падения, чтобы улучшить сбор света с разных расстояний. Поэтому калибровка может быть сделана, используя источники, расположенные снаружи – над детектором.

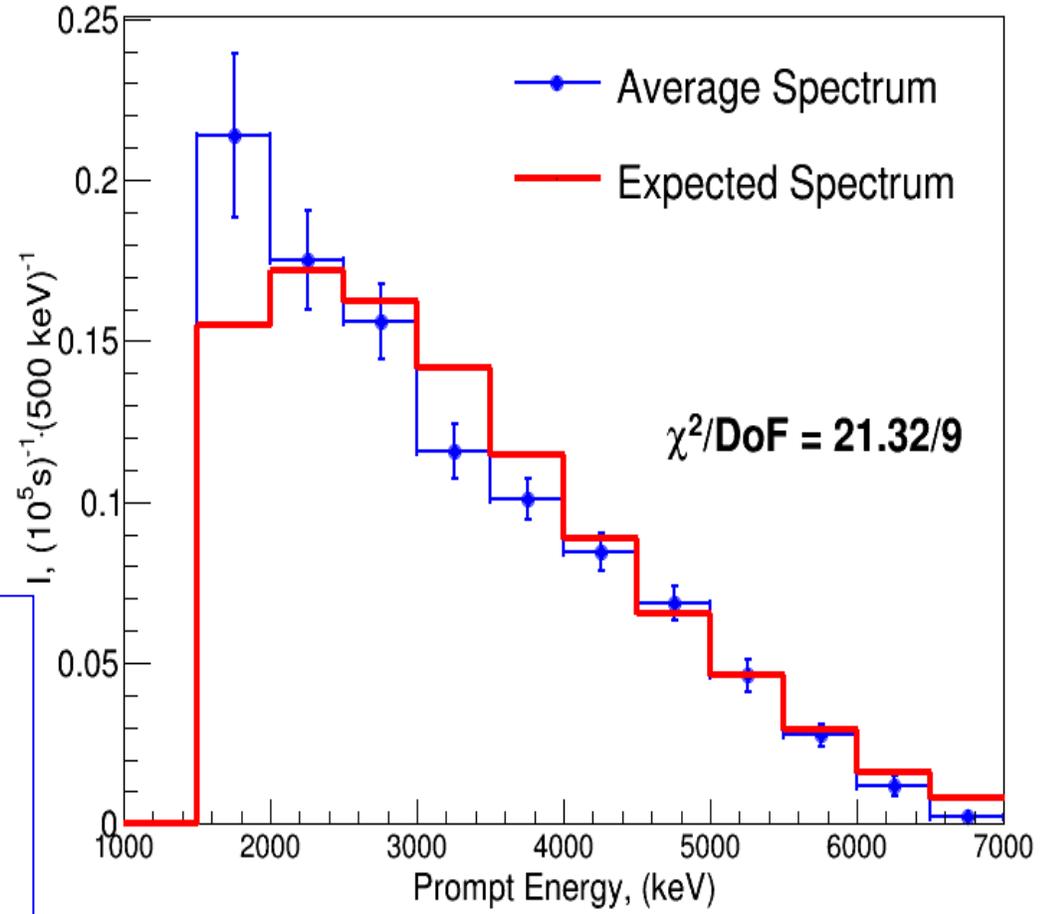


a) The ratio of an experimental spectrum of prompt signals to the spectrum, expected from MC calculations for 3 ranges (~2m) with centers 7.3m, 9.3m and 11.1m

b) polynomial fit of results averaged by distance (red curve)

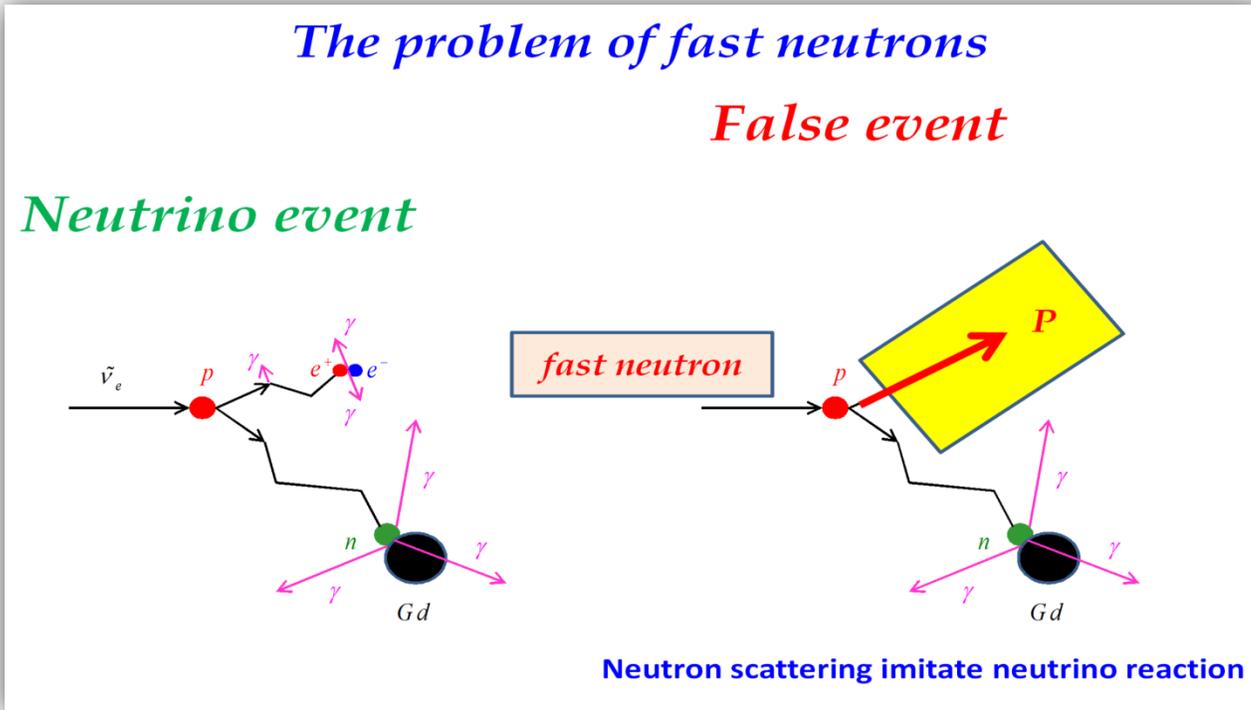


Problems with energy spectrum

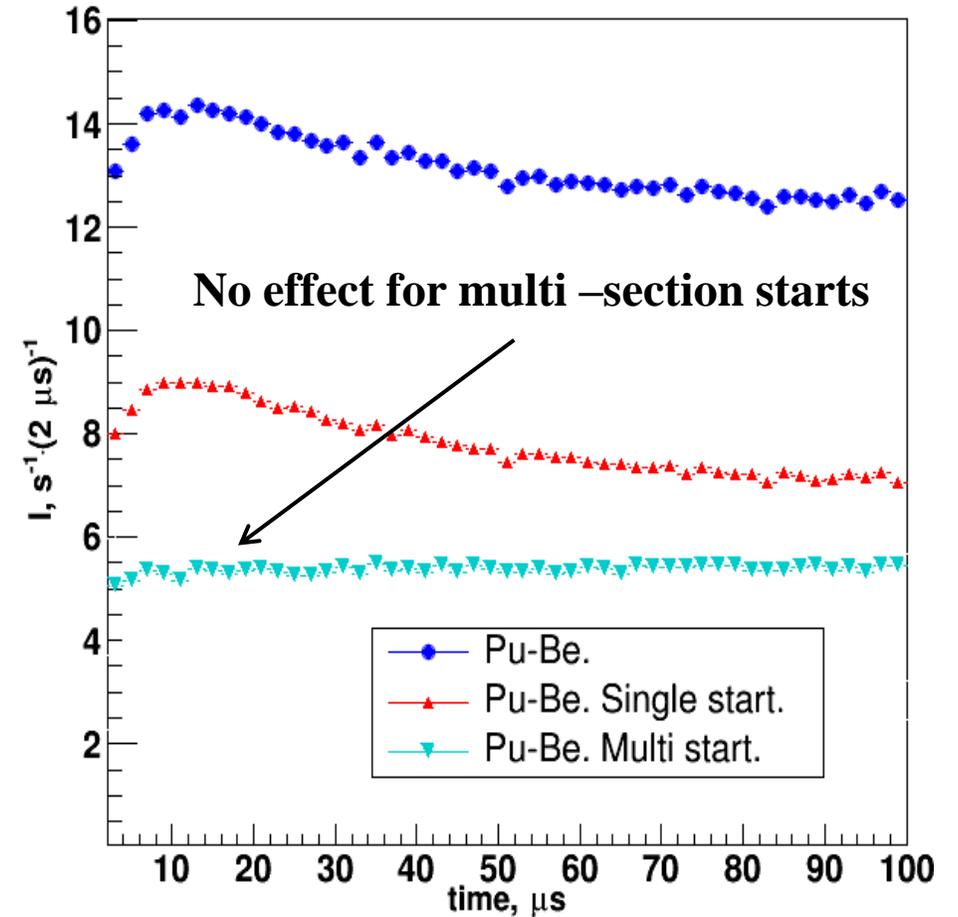


Spectrum of prompt signals in the detector for a total cycle of measurements summed over all distances (average distance — 8.6 meters). The red line shows Monte -Carlo simulation with neutrino spectrum of ^{235}U , as the SM-3 reactor works on highly enriched uranium.

- Sectioning of the detector
- Problem of fast neutrons
- Allocation of a neutrino signal



The test with a source of fast neutrons



24 central and 16 side cells for full-scale detector

central cell	side cell	angular cell	in all cells
42%	29%	19%	37%

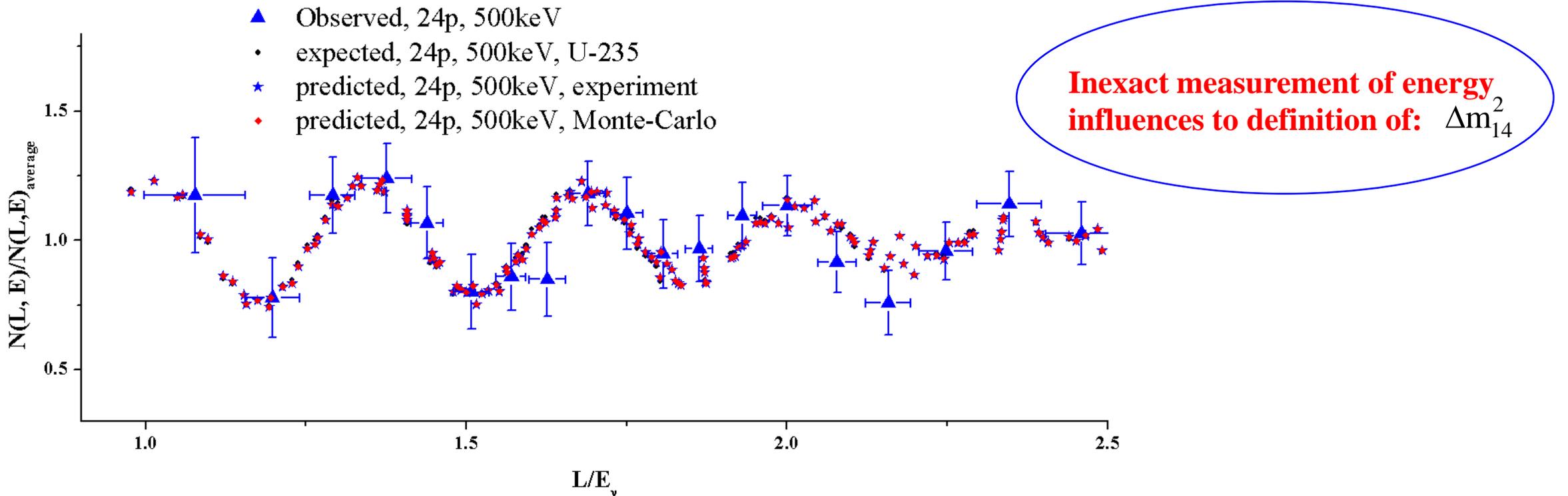
Calculated percentage of multi-start events

**Experimental average
percentage of multi-start
events for full-scale detector**

$(37 \pm 4)\%$

Independence of identification of effect of oscillations of a form of a neutrino spectrum

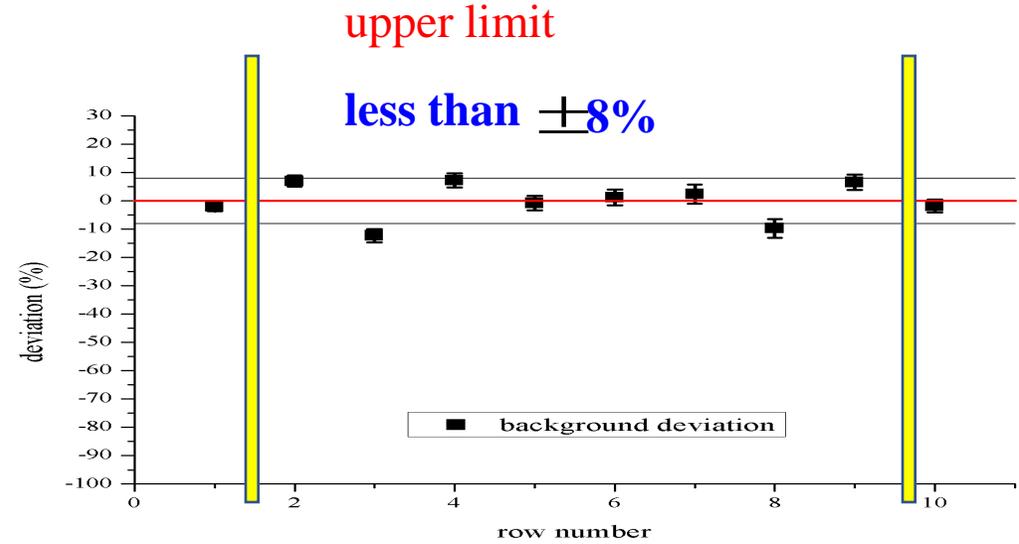
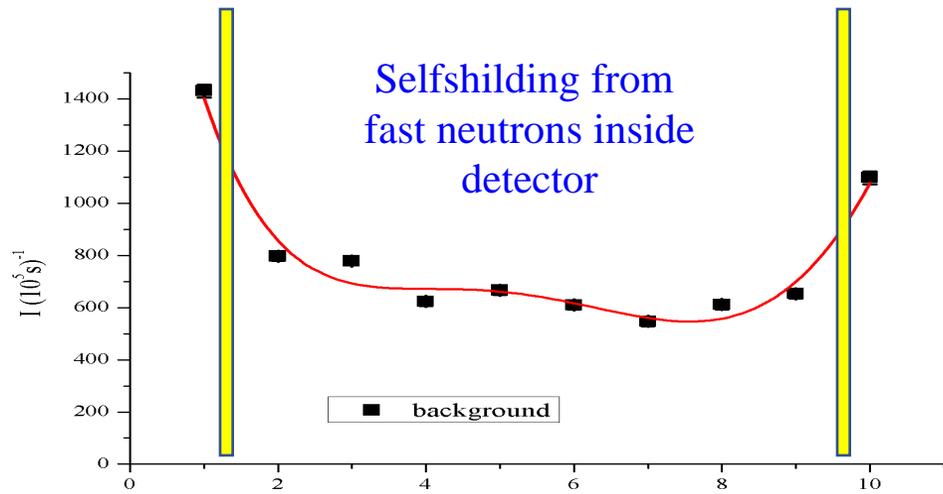
3 different ranges were chosen : 1) U-235, 2) Experiment, 3) Monte-Carlo



Apparently there is no difference. It also should not be because spectra are strictly canceled in formula (2)

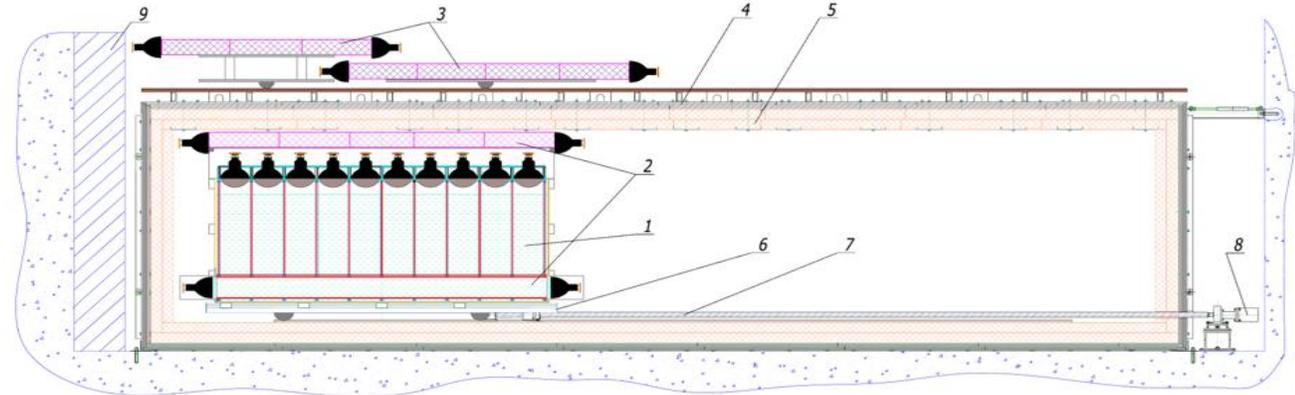
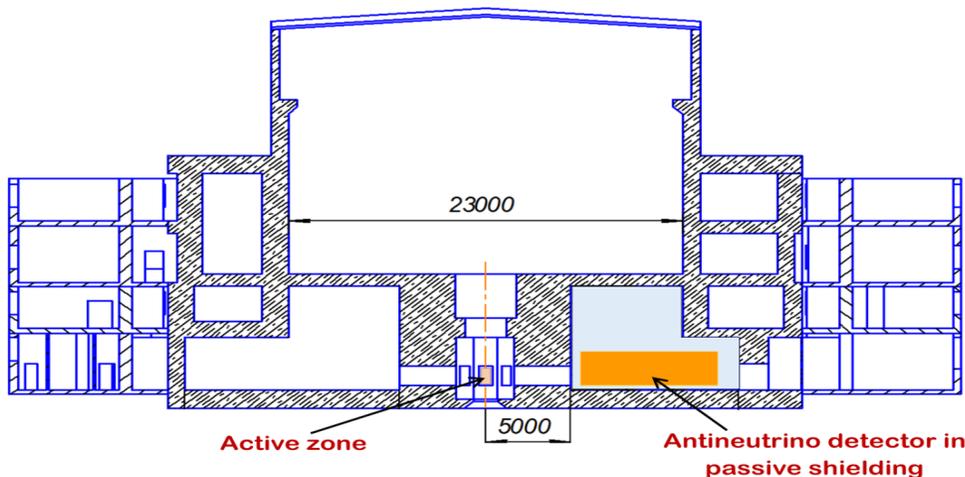
$$R_{i,k}^{\text{exp}} = \frac{N(E_i, L_k) L_k^2}{K^{-1} \sum_k N(E_i, L_k) L_k^2} = \frac{[1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 (1.27 \Delta m_{14}^2 L_k / E_i)]}{K^{-1} \sum_k [1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 (1.27 \Delta m_{14}^2 L_k / E_i)]} = R_{i,k}^{\text{th}} \quad (2)$$

Analysis of possible difference in efficiency of rows of the detector, using the background of fast neutrons which is given rise into the building from cosmic muons.



The background of fast neutrons is asymmetric because of structure of the building.

The dispersion on a background when moving the detector is within the same 8%.



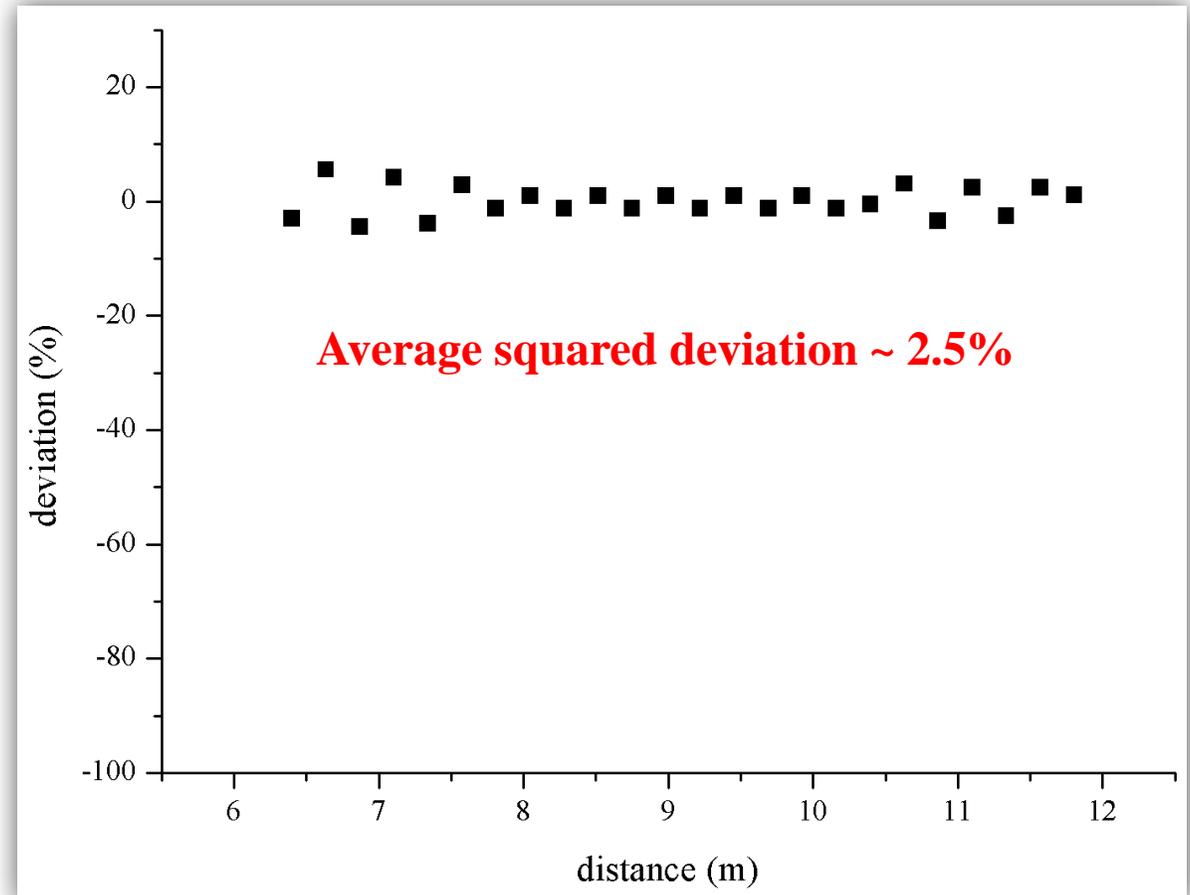
We use only 8 internal rows, the first and tenth are protective.

Averaging of detector rows efficiencies due to movements (above estimation)

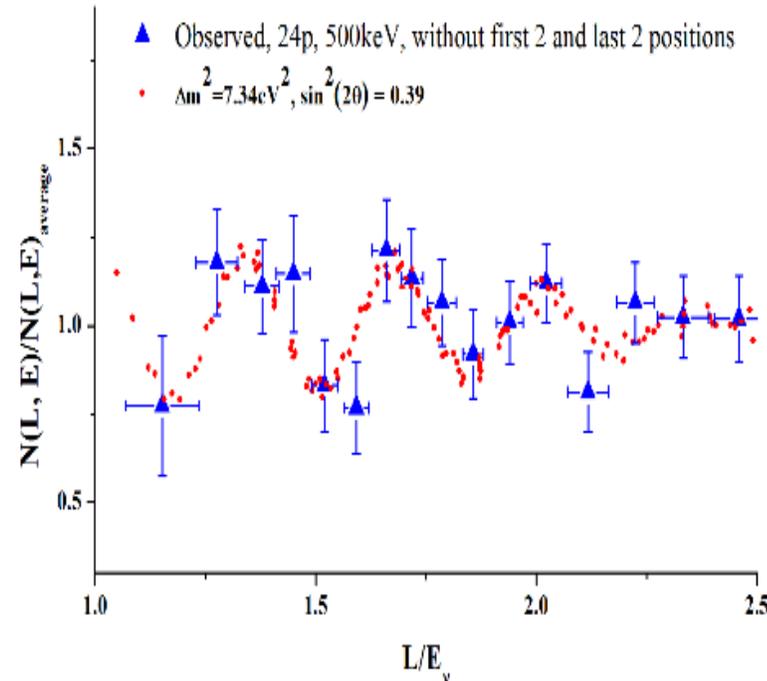
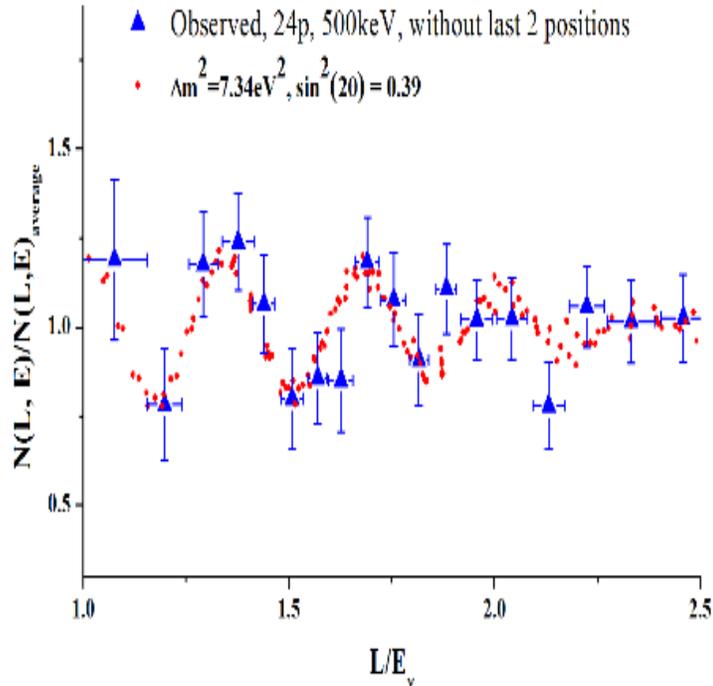
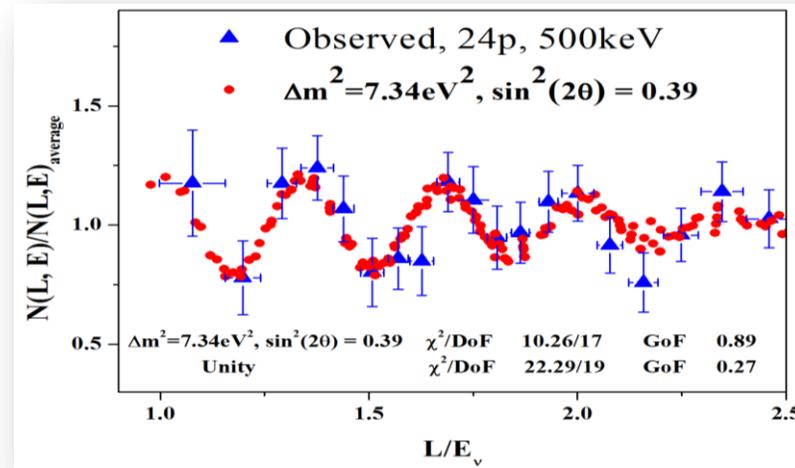
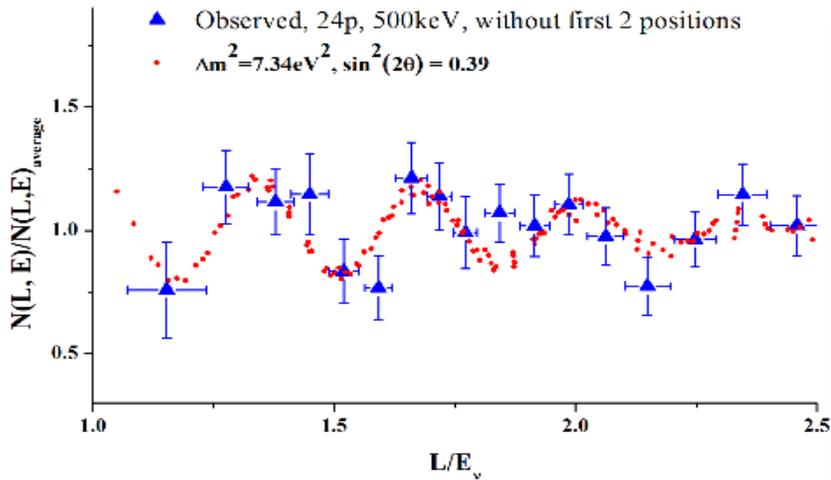
L(m) **Numbers of detector row**

6.4025	2				
6.6375	3				
6.8725	4	2			
7.1075	5	3			
7.3425	6	2	4		
7.5775	7	3	5		
7.8125	8	4	6	2	
8.0475	9	5	7	3	
8.2825	6	2	8	4	
8.5175	7	3	9	5	
8.7525	8	4	6	2	
8.9875	9	5	7	3	
9.2225	6	2	8	4	
9.4575	7	3	9	5	
9.6925	8	4	6	2	
9.9275	9	5	7	3	
10.1625	6	2	8	4	
10.3975	7	3	9	5	2
10.6325	8	4	6	3	
10.8675	9	5	7	4	
11.1025	6	8	5		
11.3375	7	9	6		
11.5725	8	7			
11.8075	9	8			

Average efficiency at various distances

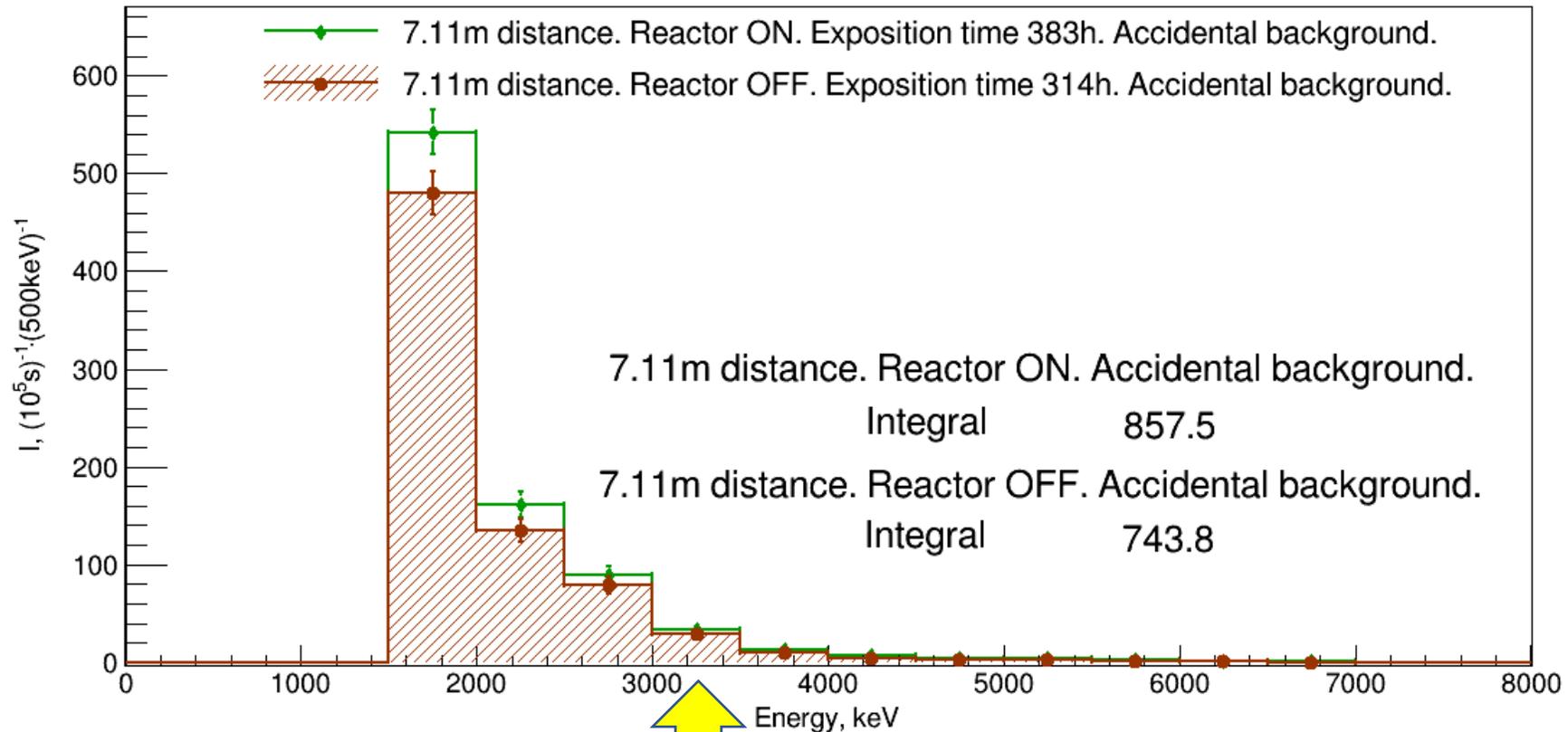


Test of stability of the effect by means of removal of extreme positions

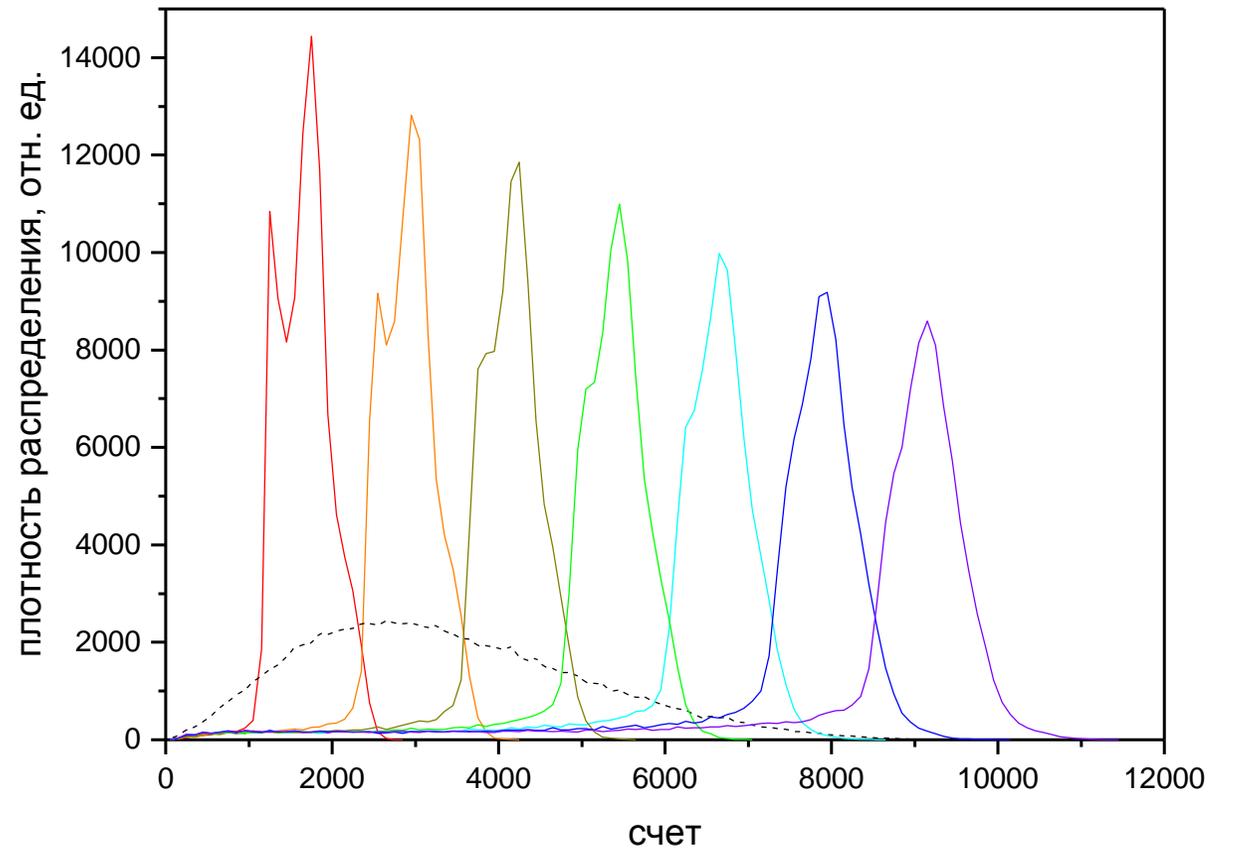
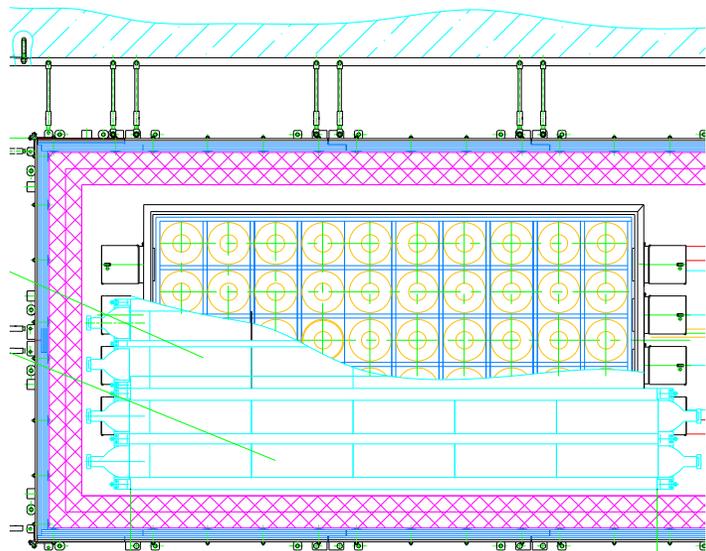
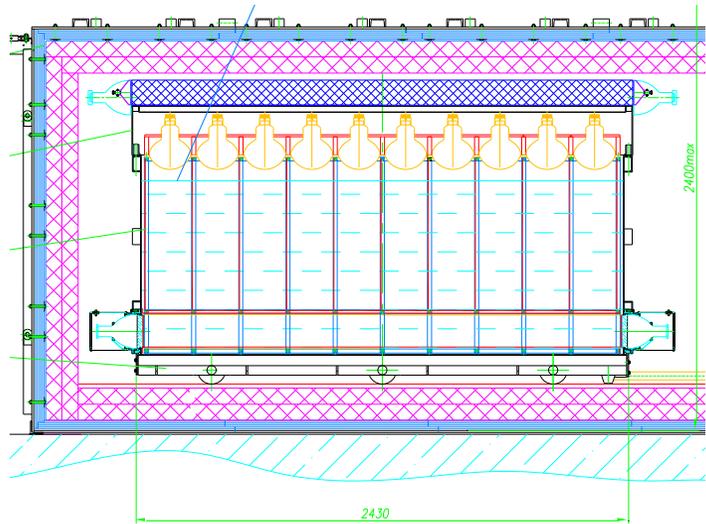


Conclusion
 There is no reason to consider that the effect can be caused by structure of the detector. The possibility of averaging of efficiency of various sections by placing them at the same distance is the advantage of our experiment.

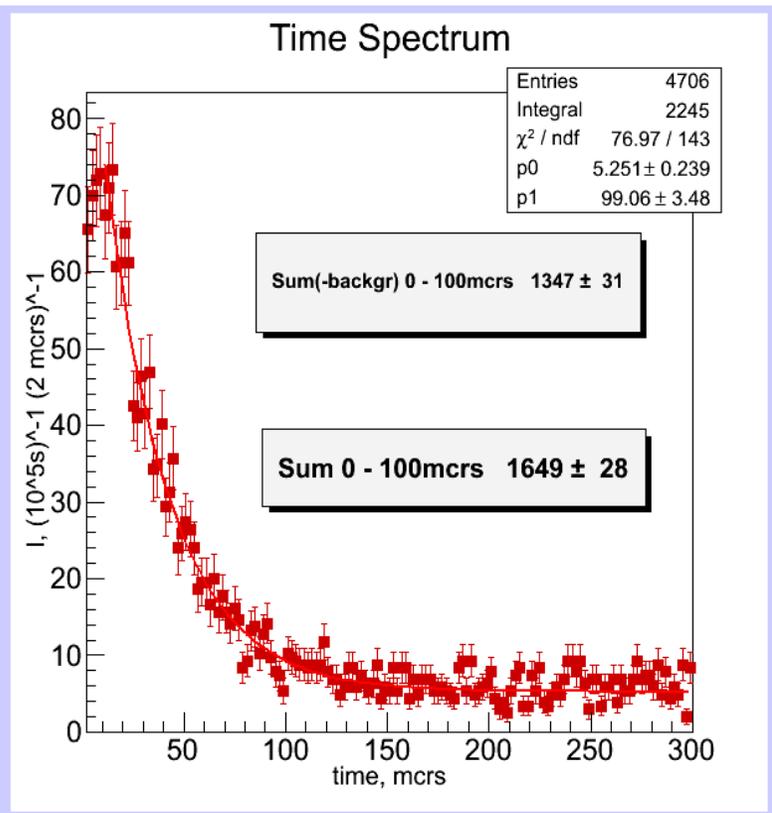
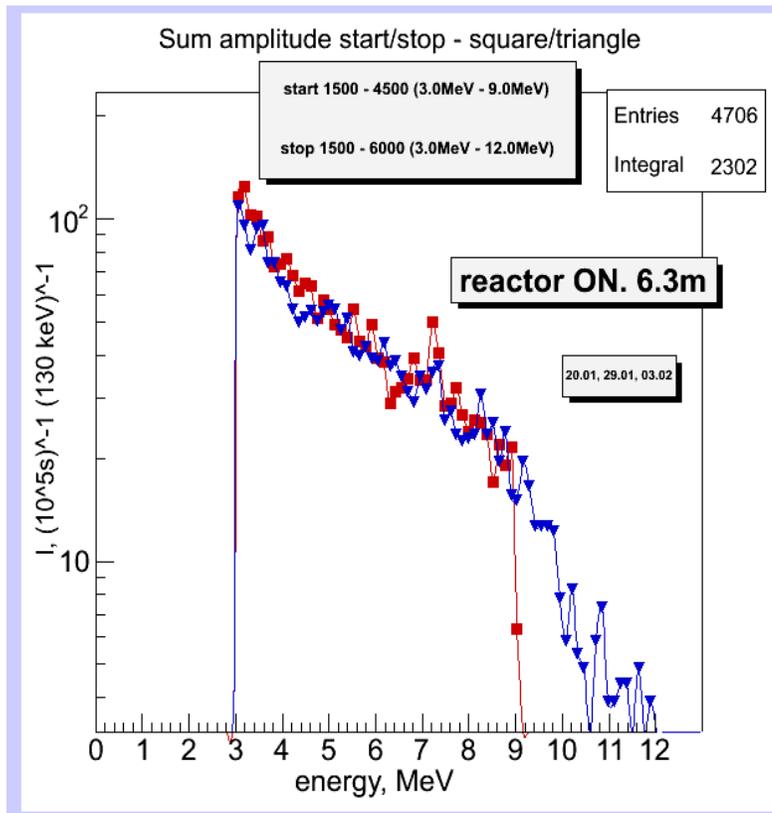
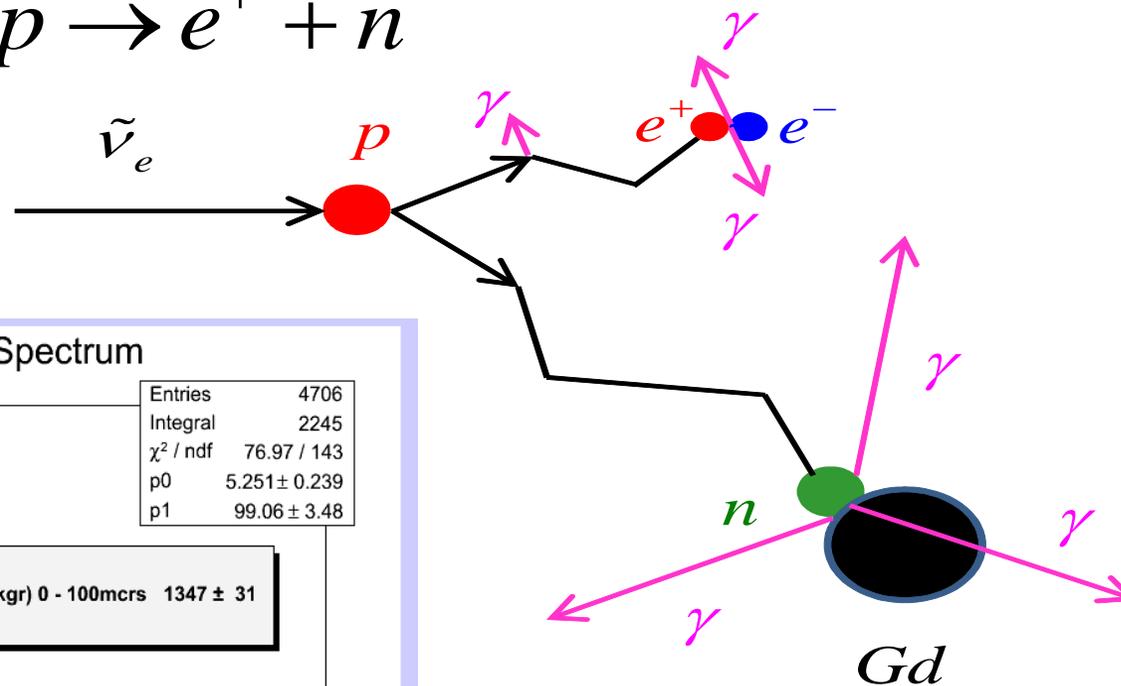
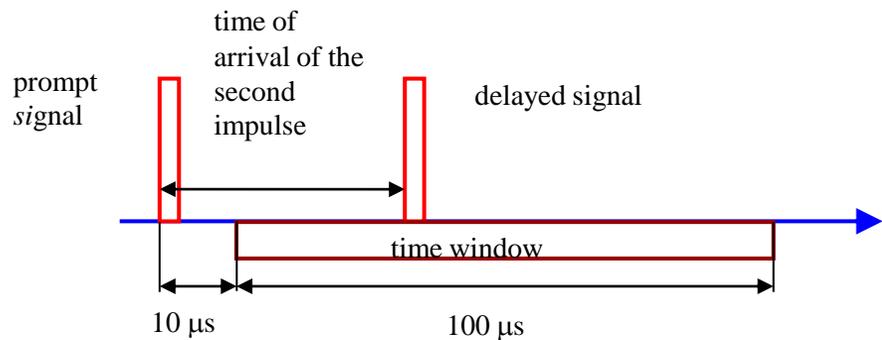
Accidental background practically does not depend on reactor, but it is rather big at low energies.



Threshold for delayed coincidences 3.2MeV

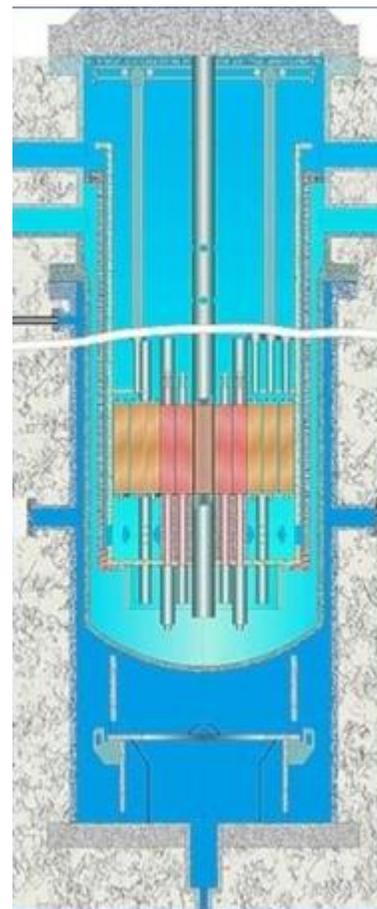


Signal of correlated events

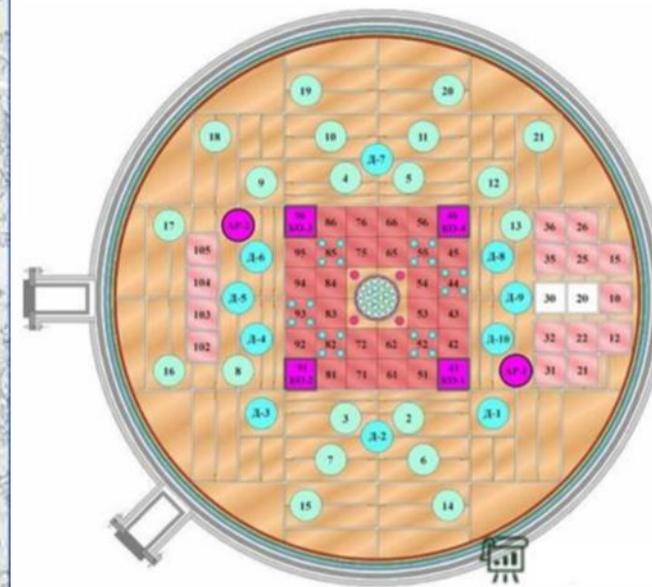


SM-3 research reactor

- 100 MW thermal power
- Compact core 42x42x35cm
- Highly enriched ^{235}U fuel
- Separated rooms for experimental setup
- The laboratory is poorly protected from cosmic rays



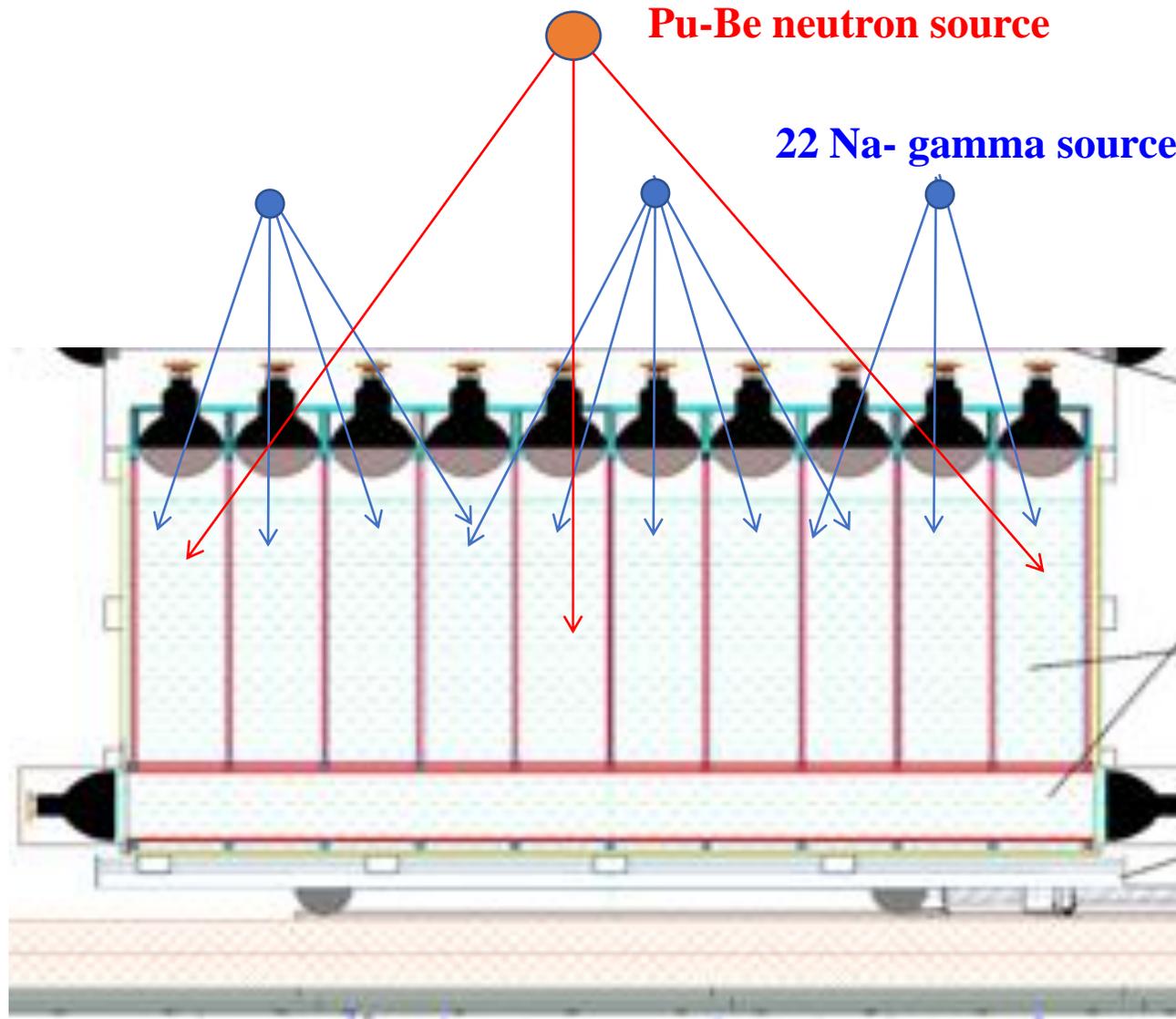
Vertical and horizontal sections of SM-3 reactor



Energy calibration of the full-scale detector

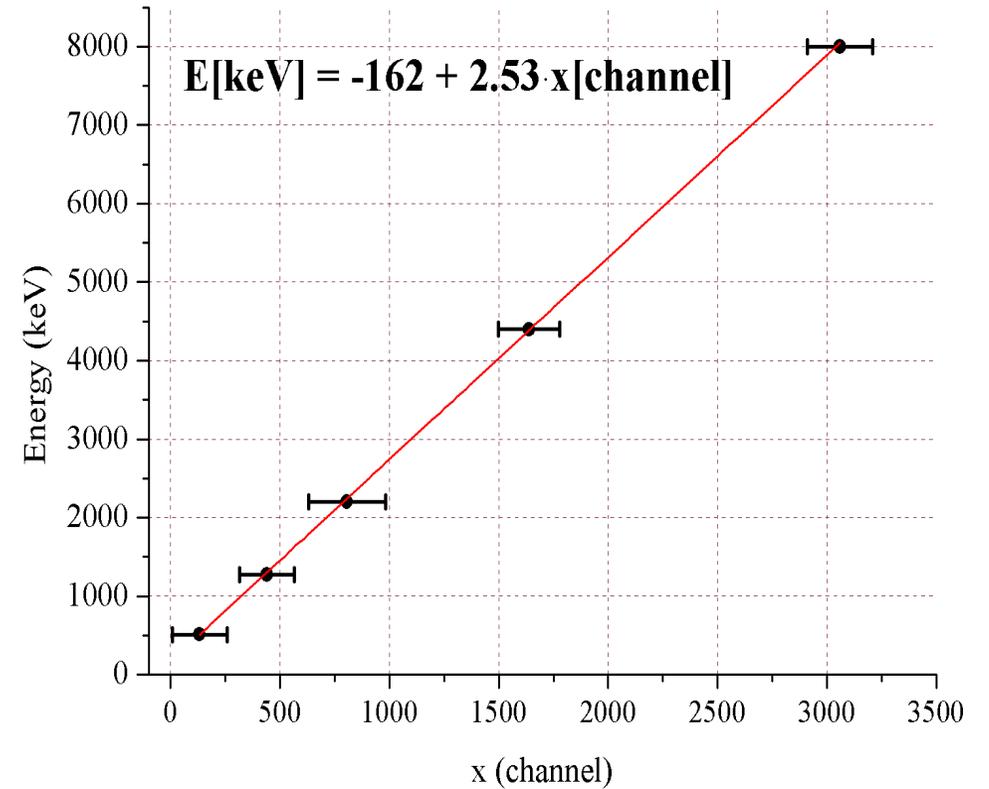
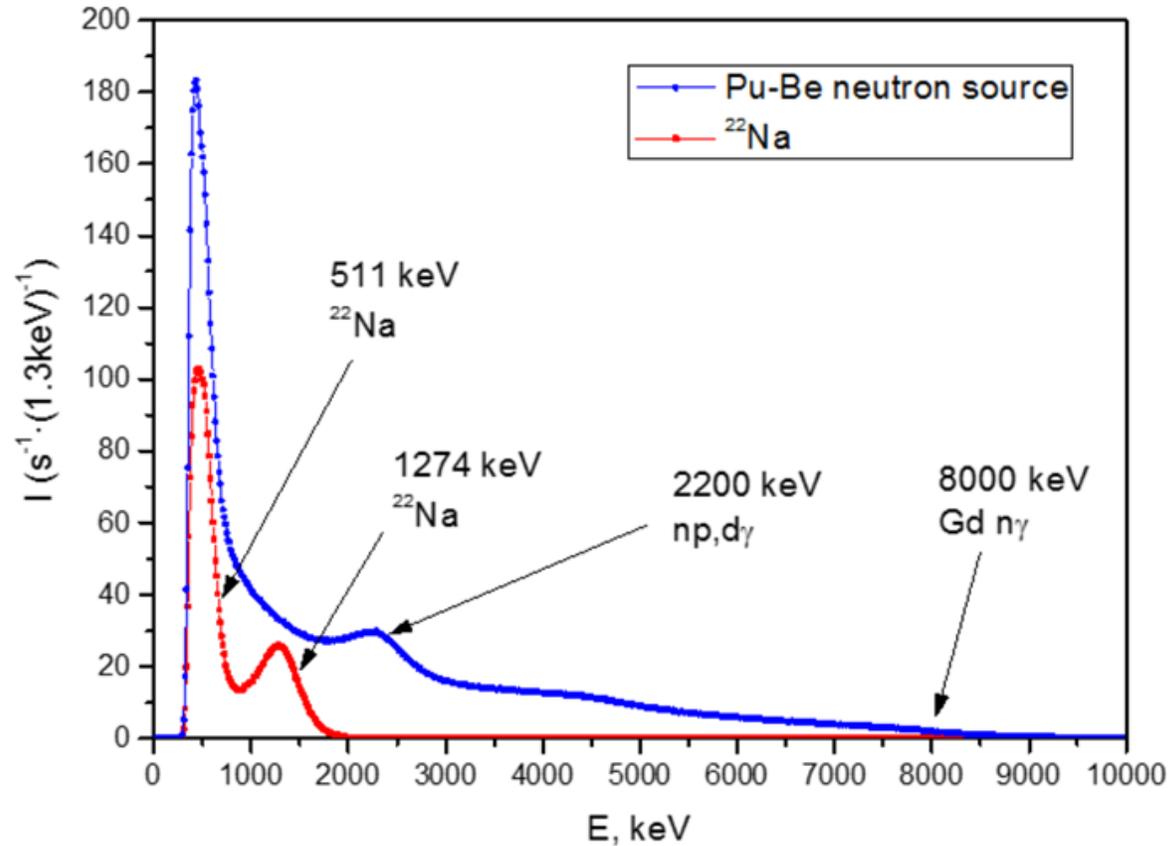
The source ^{22}Na is installed above the detector at distance about 0.8 meters and irradiate about 16 sections at once. PMTs were normalized to one energy scale by selecting voltage on them. Simultaneous calibration of several sections is required. For all detector only 6 positions of the source were used.

Overlapping of the irradiated sections unifies the calibration.



The neutron Pu-Be source irradiated all sections at once. This method has advantage relatively to using of internal sources. The difficulty of calibration at energy 8MeV is that quanta from neutron capture by gadolinium can't be absorbed in the same row. Therefore the detector calibration should be conducted on a diffuse edge of spectrum.

Energy calibration of the full-scale detector



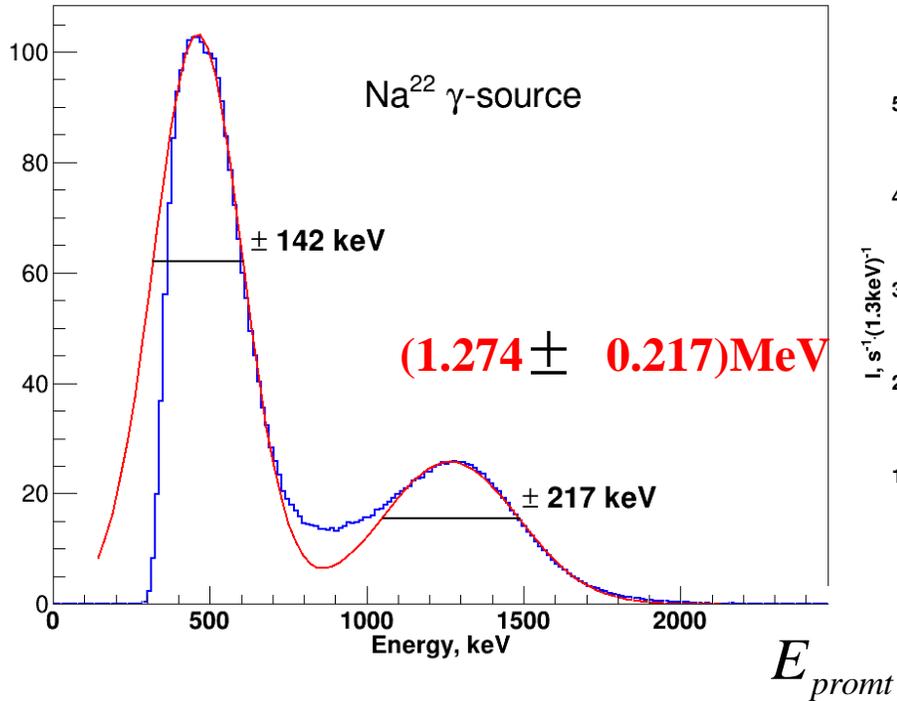
In the left - ranges of sources. In the right - the calibration of gamma quanta scale.

Registration of positrons includes inevitable loss of a part of energy of 511keV gamma-quanta. Because of the threshold of registration in the adjacent section we have to increase errors up to ± 250 keV.

It is the calibration which needs to be used at data processing.

Energy calibration of the full-scale detector

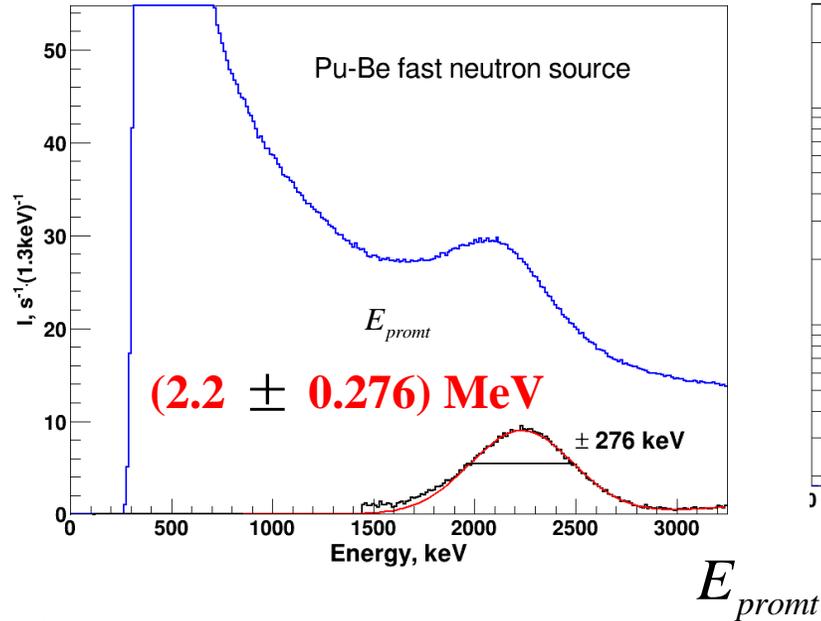
$(0.511 \pm 0.142) \text{ MeV}$



$$\Delta E_{\nu} / E_{\nu} (2 \text{ MeV}) = 21\%$$

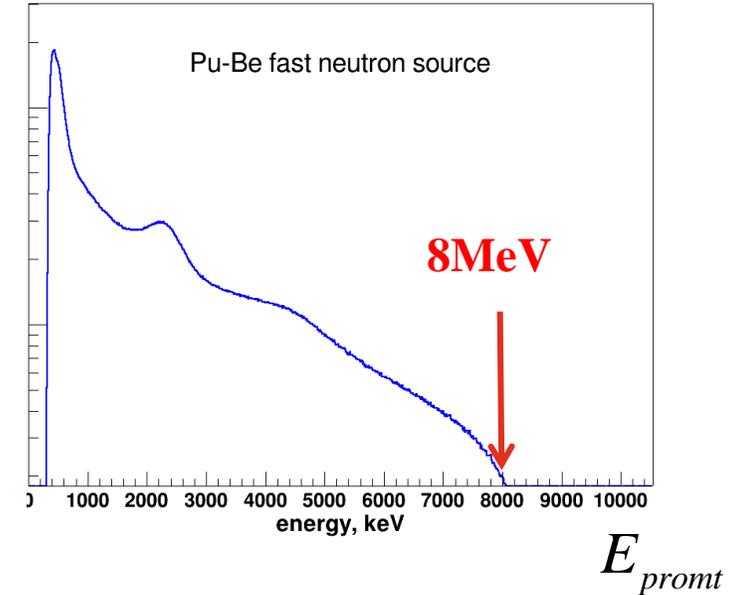
$$\Delta E_{\nu} (2 \text{ MeV}) = 440 \text{ keV}$$

$$E_{\nu} = E_{prompt} + 0.8 \text{ MeV}$$



$$\Delta E_{\nu} / E_{\nu} (3 \text{ MeV}) = 18\%$$

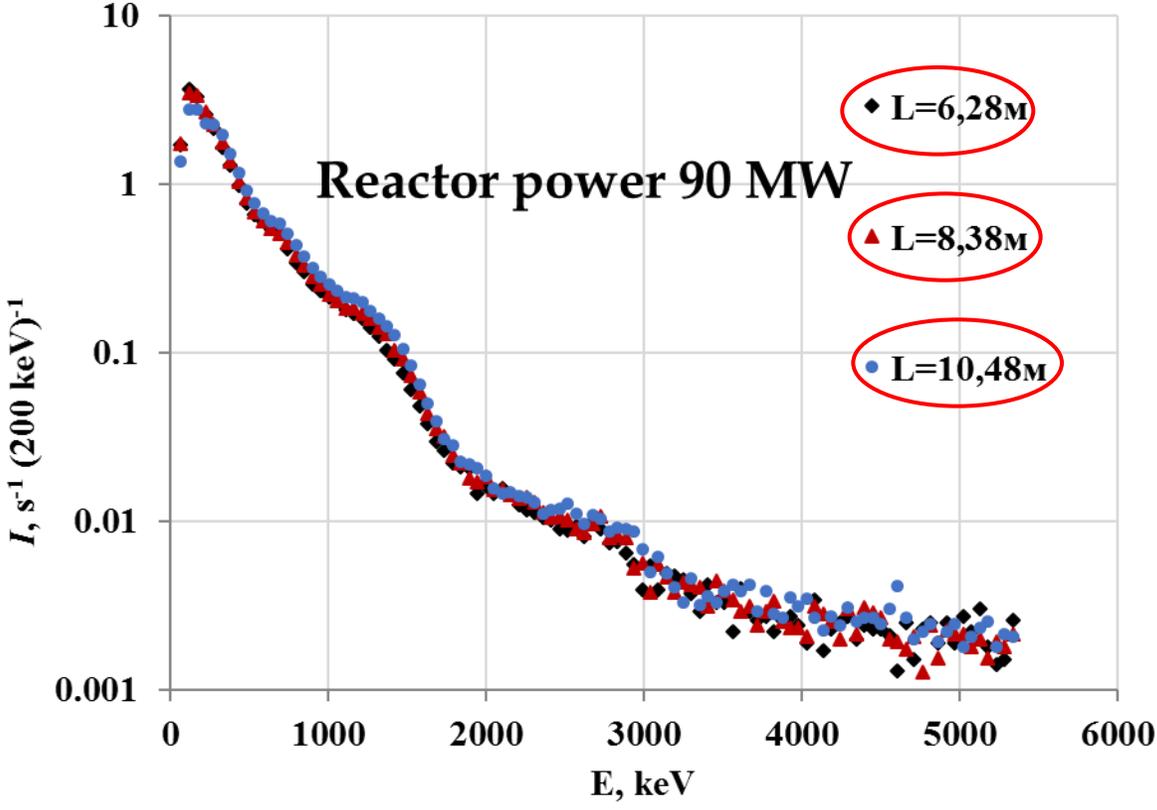
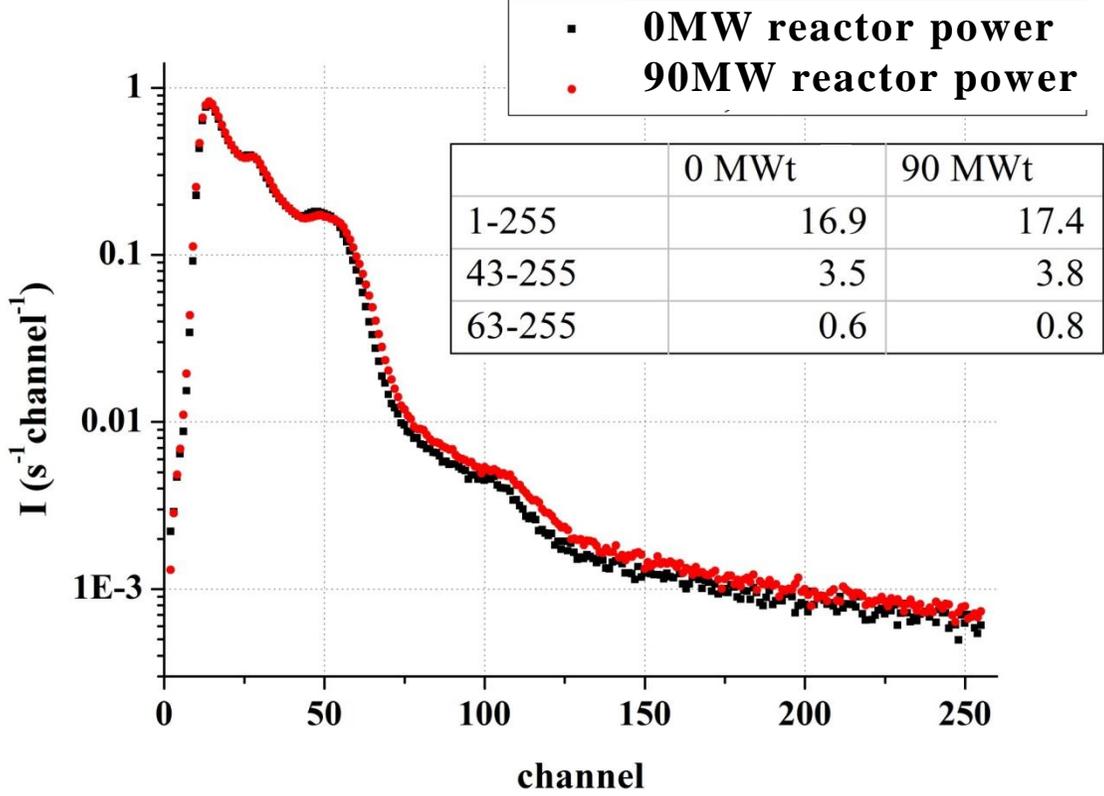
$$\Delta E_{\nu} (3 \text{ MeV}) = 550 \text{ keV}$$



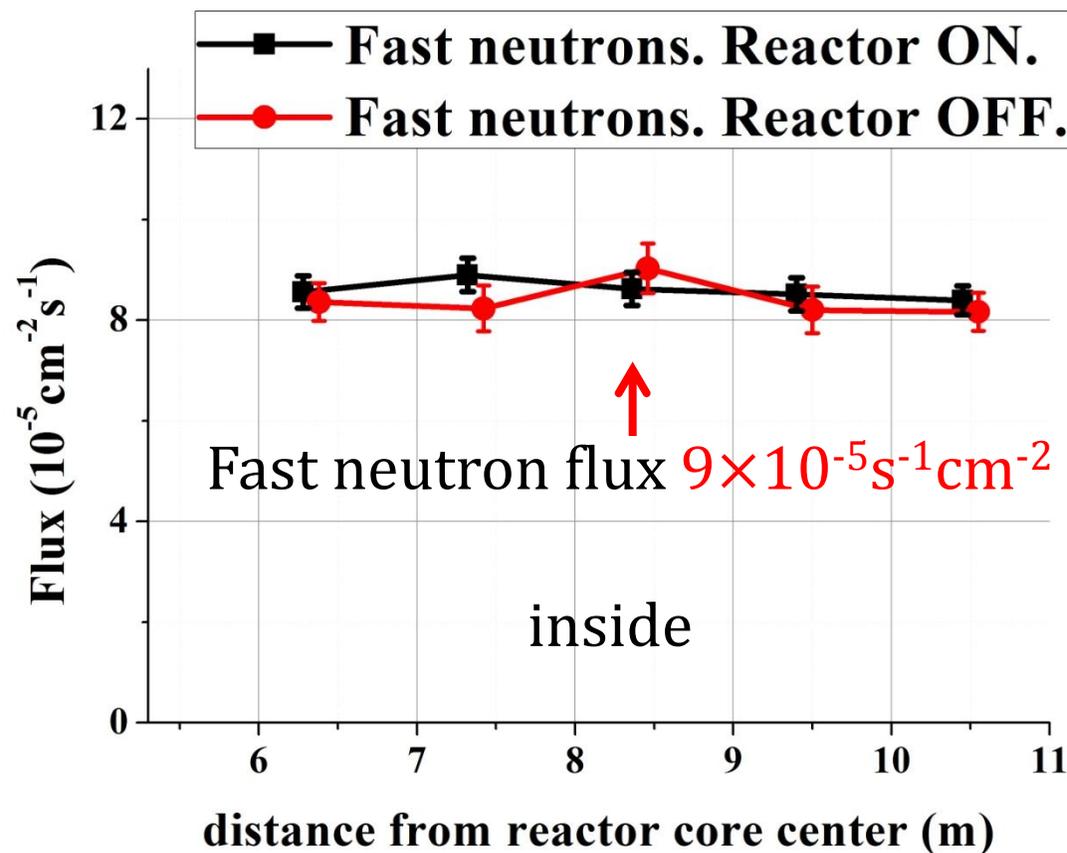
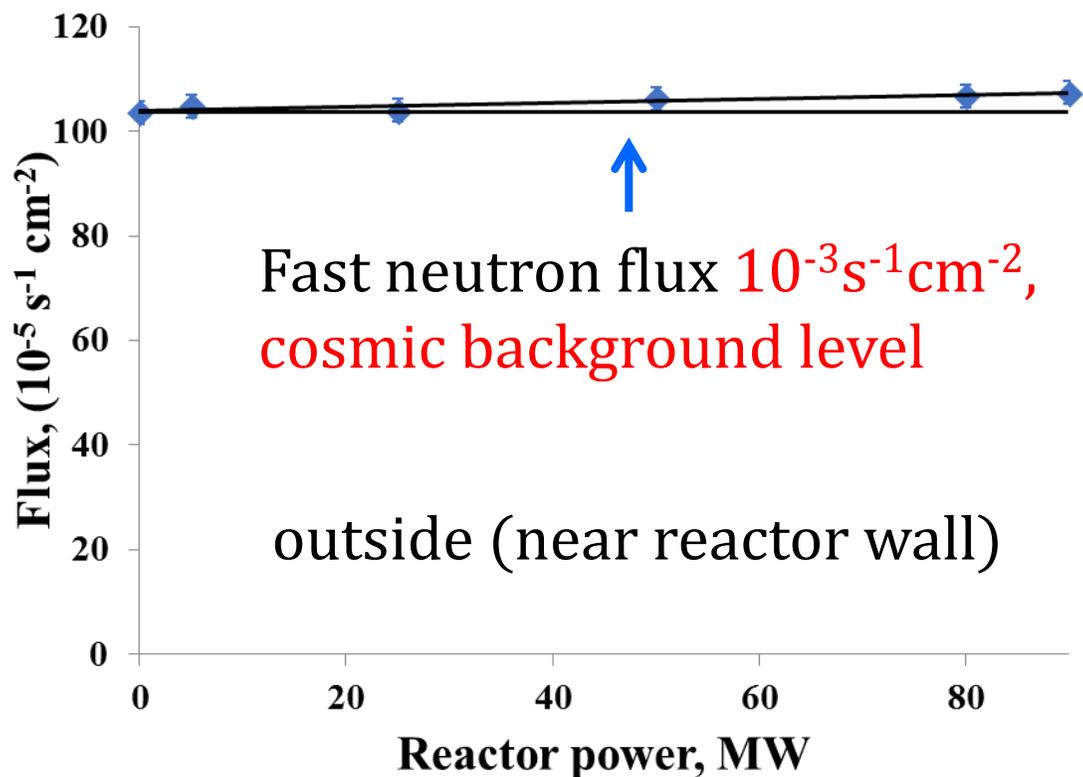
$$\Delta E_{\nu} / E_{\nu} (6 \text{ MeV}) = 14\%$$

$$\Delta E_{\nu} (6 \text{ MeV}) = 830 \text{ keV}$$

Gamma background in passive shielding **does not depend neither on the power of the reactor nor on distance from the reactor**

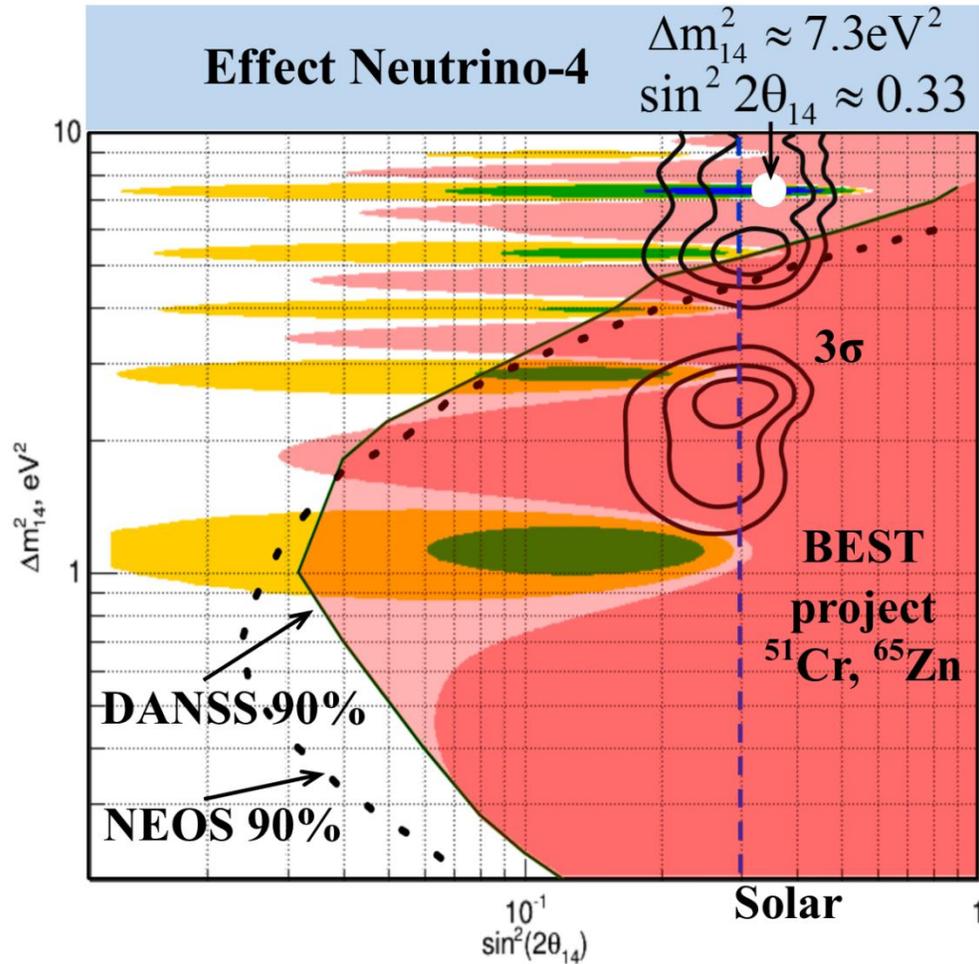


The background of fast neutrons in passive shielding **does not** depend neither on the power of the reactor nor on distance from the reactor

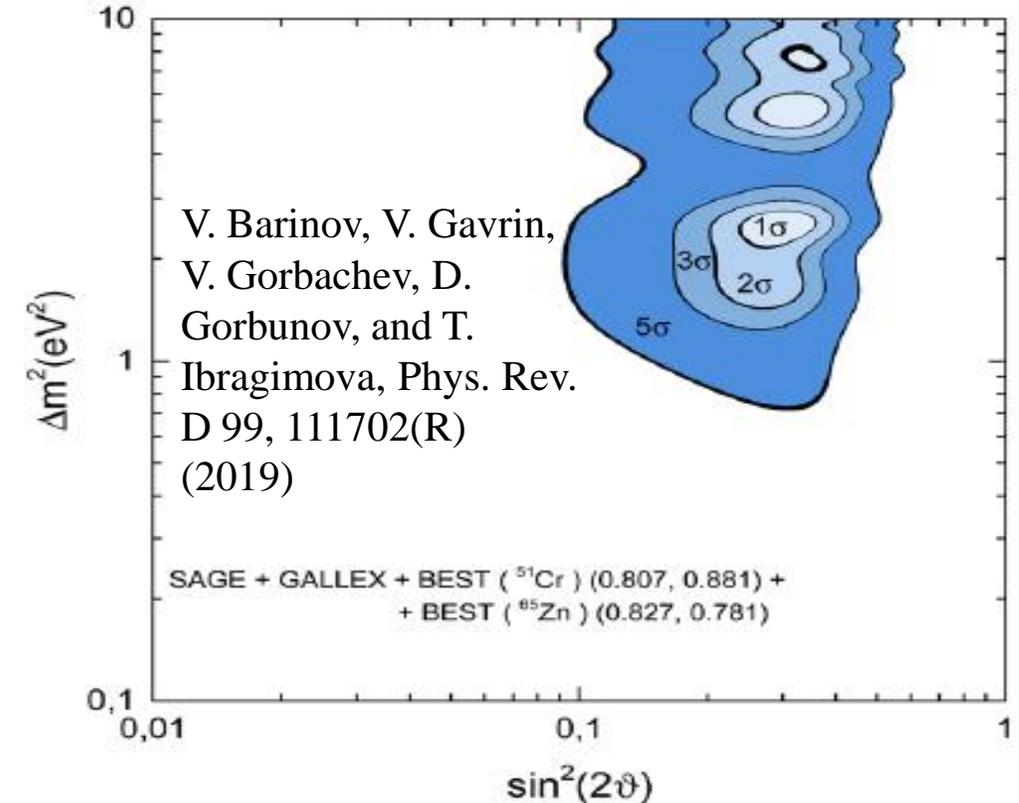


The background of fast neutrons in passive shielding is 10 times less than outside.
The background of fast neutrons outside of passive shielding is defined by cosmic rays and practically **does not** depend on reactor power.

BEST experiment - Sensitivity Area



There is combined analysis of Neutrino-4 result and BEST potential in case of gallium anomaly confirmation in this experiment



The BEST experiment started in August 2019 in BNO has good sensitivity at $\Delta m_{14}^2 > 5 \text{eV}^2$ area

FIG. 7. Allowed regions of oscillation parameters, built on the basis of new data, in the case of combining the results of SAGE + GALLEX with the result of BEST for two sources (^{51}Cr and ^{65}Zn), which corresponds to the best fit point.