

Наблюдение эффекта осцилляций в эксперименте Нейтрино-4 по поиску стерильного нейтрино

А.П. Серебров, ПИЯФ

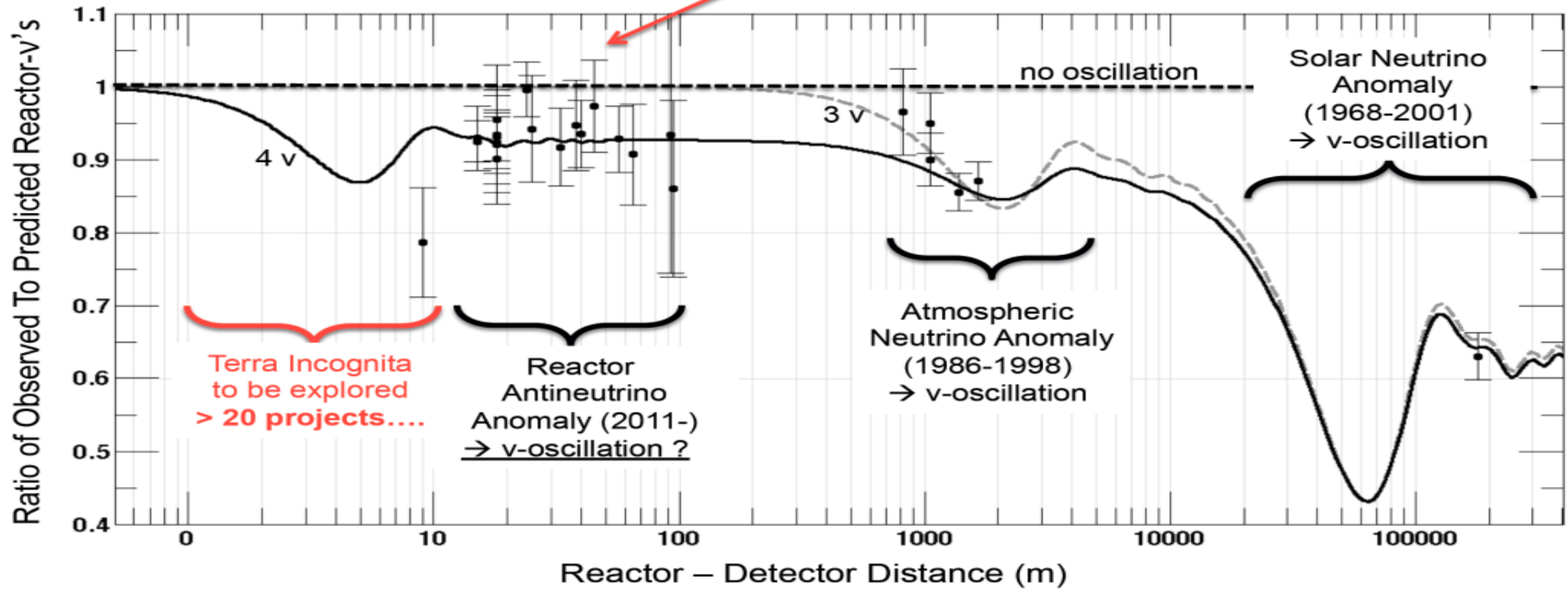
А.П. Серебров¹, В.Г. Ивочкин¹, Р.М. Самойлов¹, А.К. Фомин¹, А.О.Полюшкин¹,
В.Г. Зиновьев¹, П.В. Неустроев¹, В.Л. Головцов¹, А.В. Чёрный¹, О.М. Жеребцов¹,
М.Е. Чайковский¹, В.П. Мартемьянов², В.Г. Тарасенков², В.И. Алешин²,
А.Л. Петелин, А.Л. Ижутов³, А.А. Тузов³, С.А. Сазонтов³, М.О. Громов³,
В.В. Афанасьев³, М.Е. Зайцев^{1,4}, Д.К. Рязанов⁴

1. НИЦ «КИ» Петербургский институт ядерной физики,
2. НИЦ “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия
3. ОАО “ГНЦ НИИАР”, 433510 Димитровград, Россия,
4. ДИТИ МИФИ, 433511 Димитровград, Россия

20 сентября 2018, актовй зал ПИЯФ

Reactor antineutrino anomaly

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



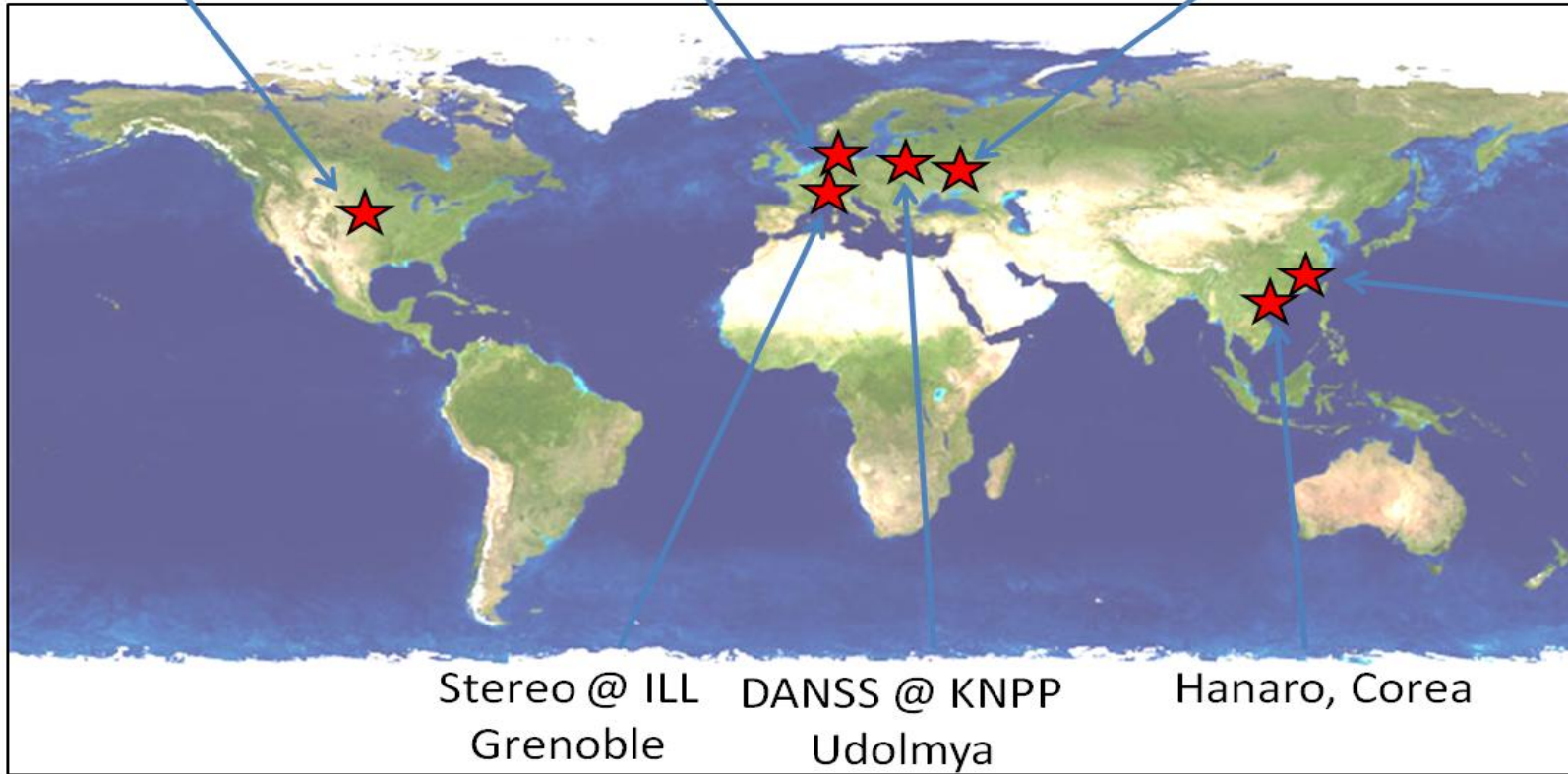
$$P(\tilde{\nu}_e \rightarrow \tilde{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_{\tilde{\nu}} [\text{MeV}]} \right)$$

New Short Baseline Reactor Experiments

US Short Baseline
Interest Group

SOLID @ BR2, Belgium

Neutrino4 @ SM-3
Dimitrovgrad



CARR site
Beijing

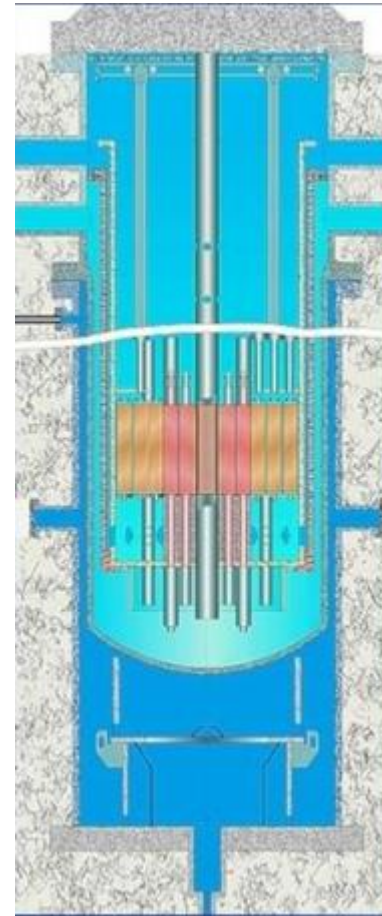
Stereo @ ILL
Grenoble

DANSS @ KNPP
Udolmya

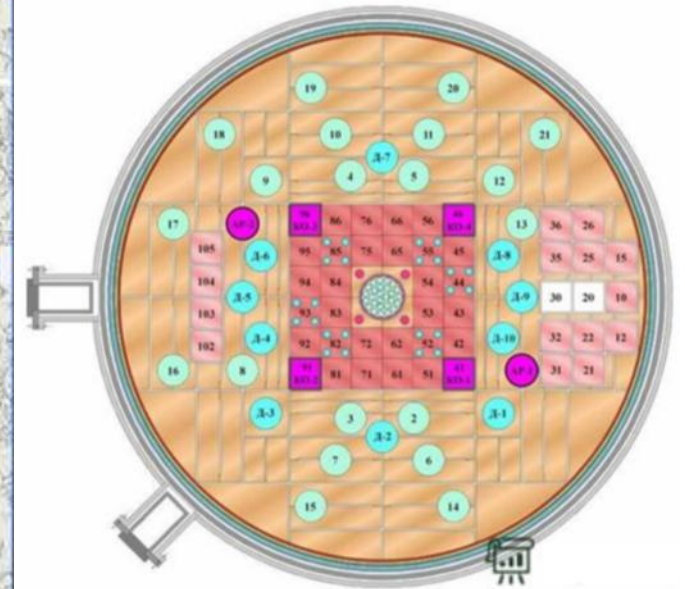
Hanaro, Korea

SM-3 research reactor

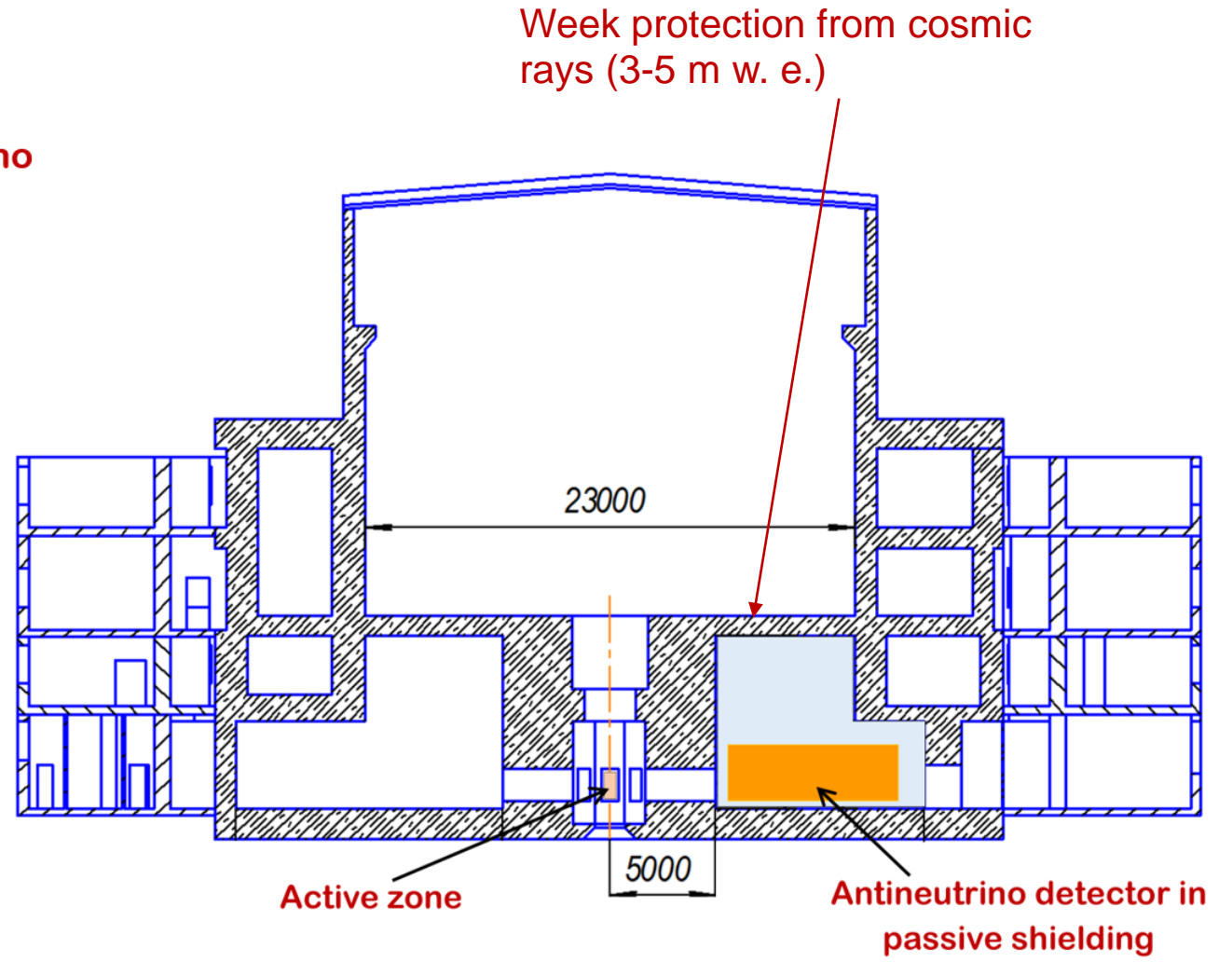
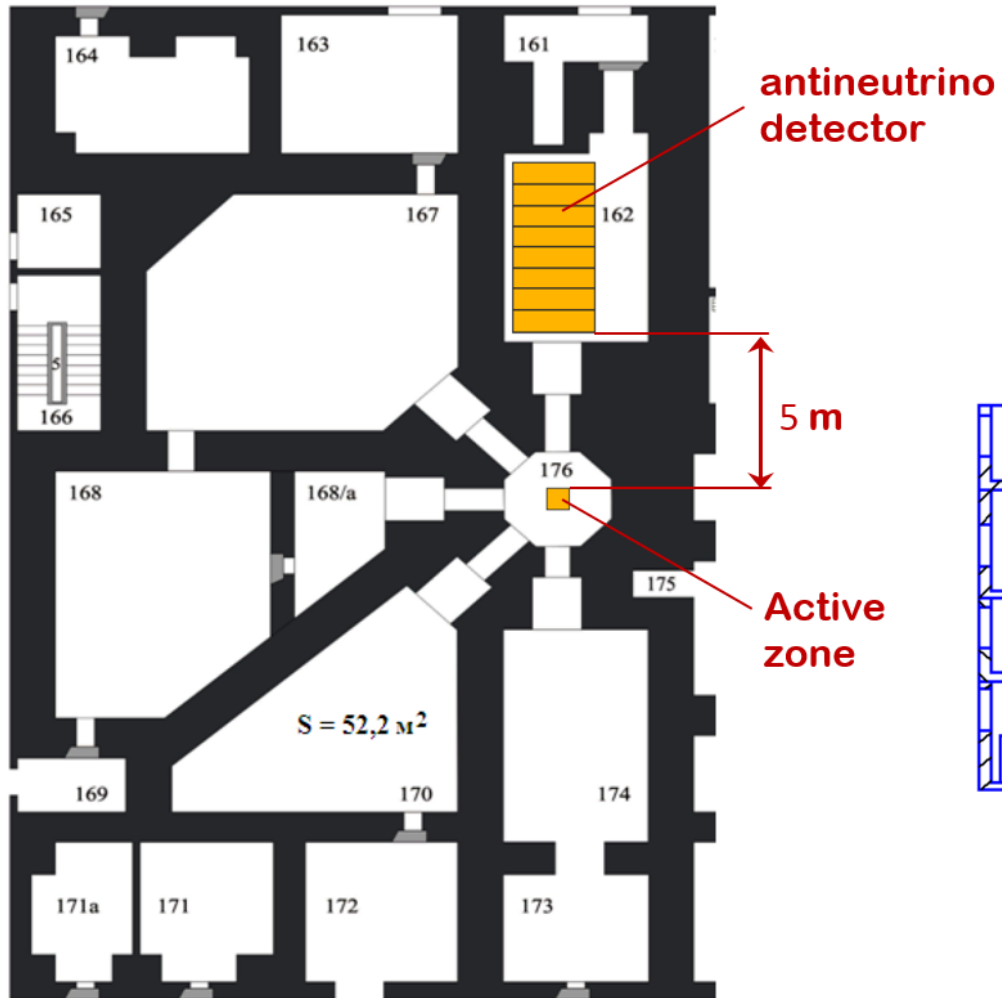
- 100 MW thermal power
- Compact core 42x42x35cm
- Highly enriched ^{235}U fuel
- Separated rooms for experimental setup
- Rooms poorly protected from space radiation



Vertical and horizontal sections of SM-3 reactor



Reactor SM-3



На реакторе СМ-3 создана нейтринная лаборатория

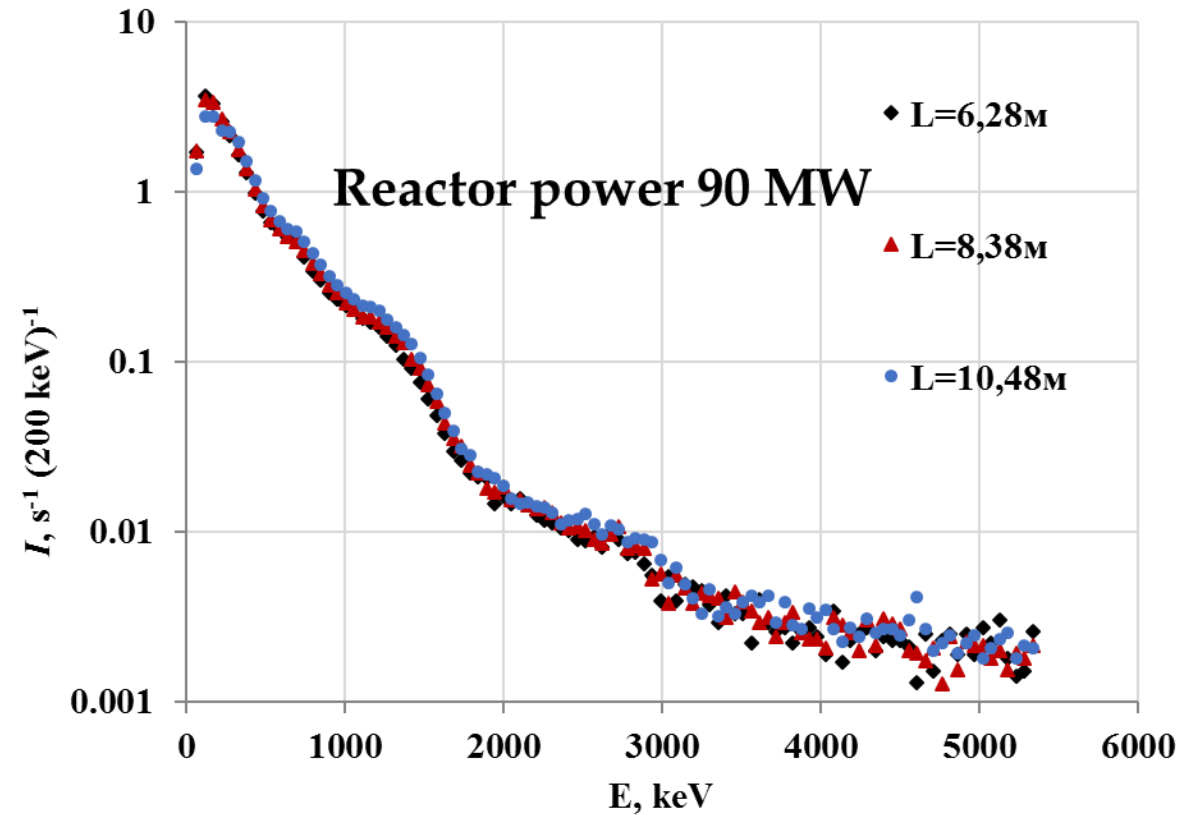
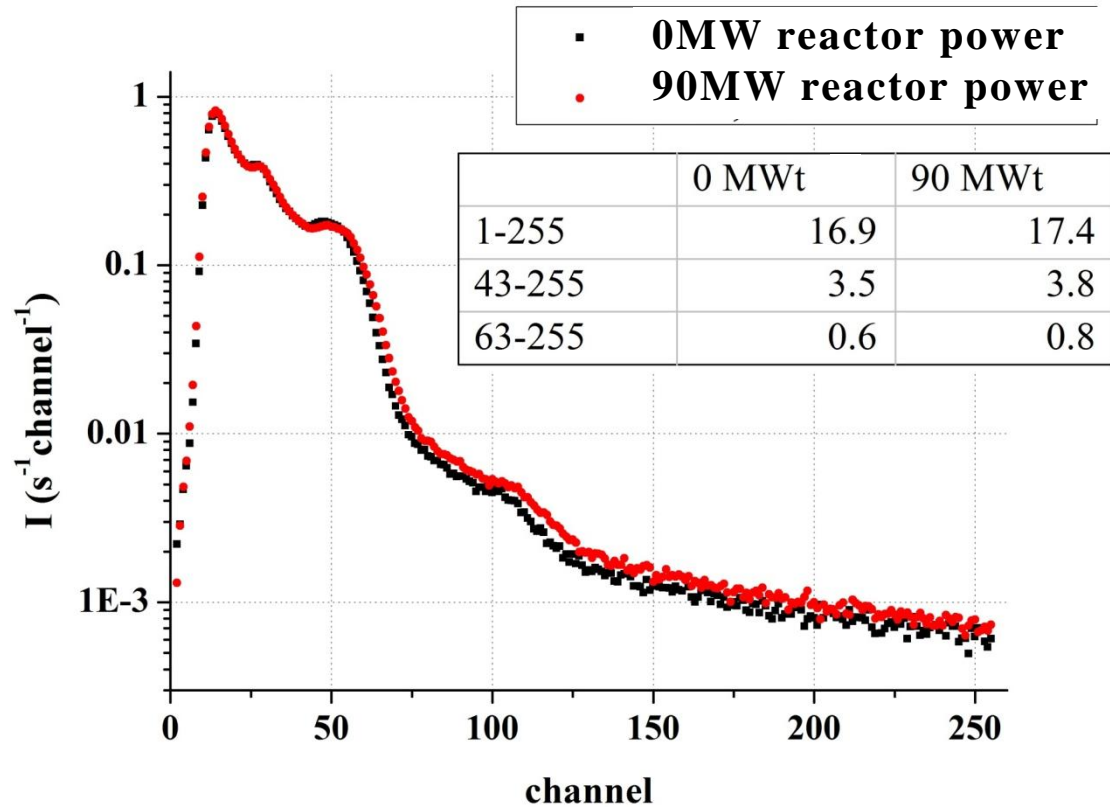


Пассивная защита 60т

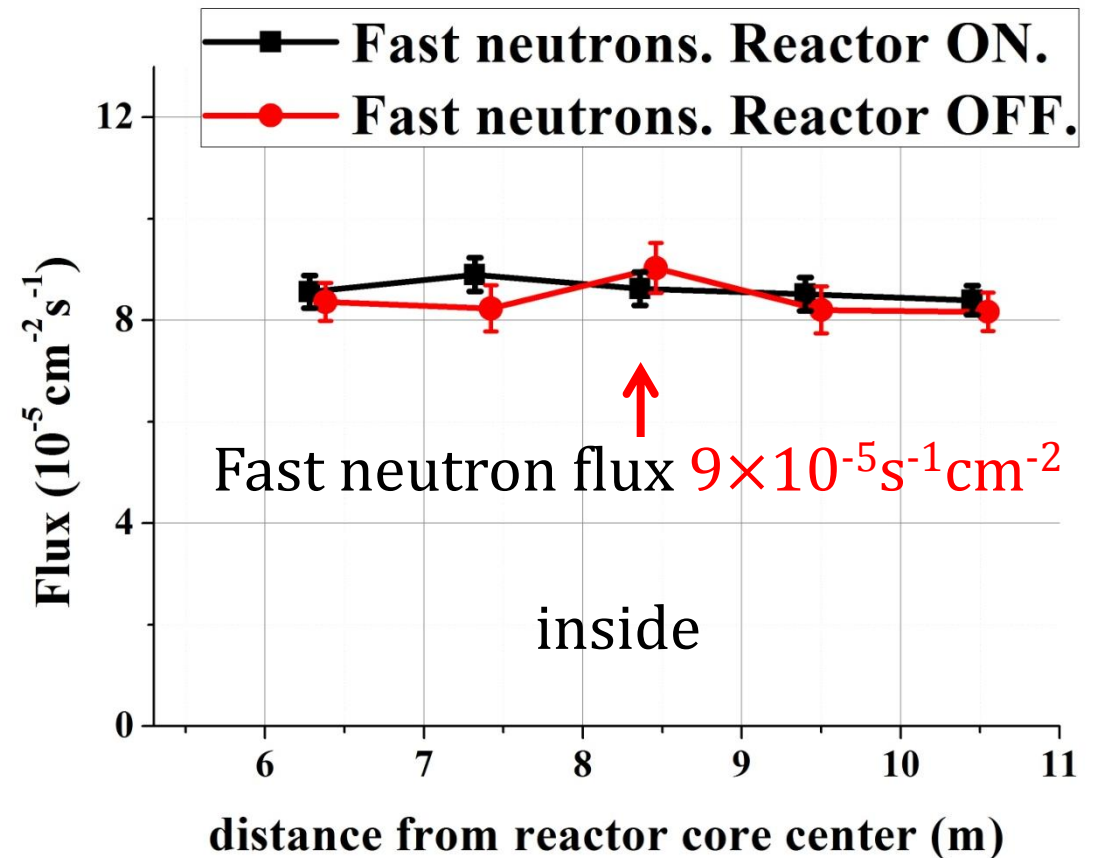
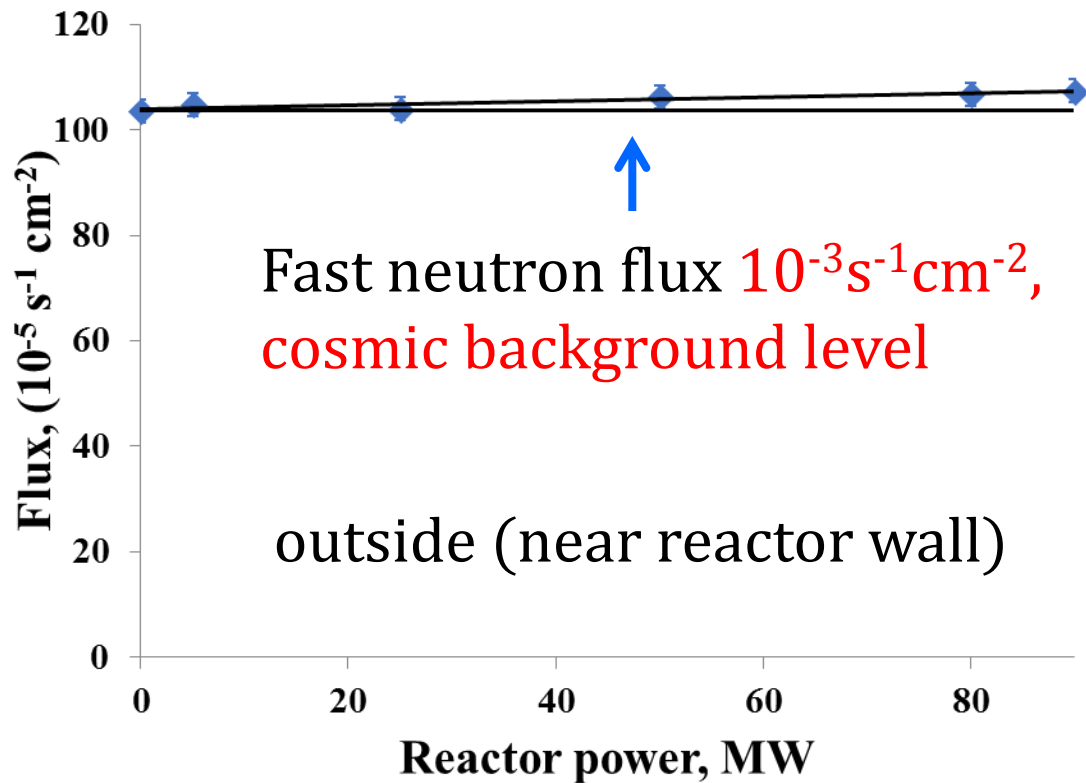


**Диапазон измерений потока реакторных
антинейтрино 6-12м**

Гамма фон внутри пассивной защиты не зависит ни от мощности реактора ни от расстояния от реактора



Фон быстрых нейтронов внутри пассивной защиты не зависит ни от мощности реактора ни от расстояния от реактора



Фон быстрых нейтронов внутри пассивной защиты на порядок величины меньше чем снаружи.
Фон быстрых нейтронов снаружи пассивной защиты определяется космическим излучением и практически не зависит от мощности реактора.

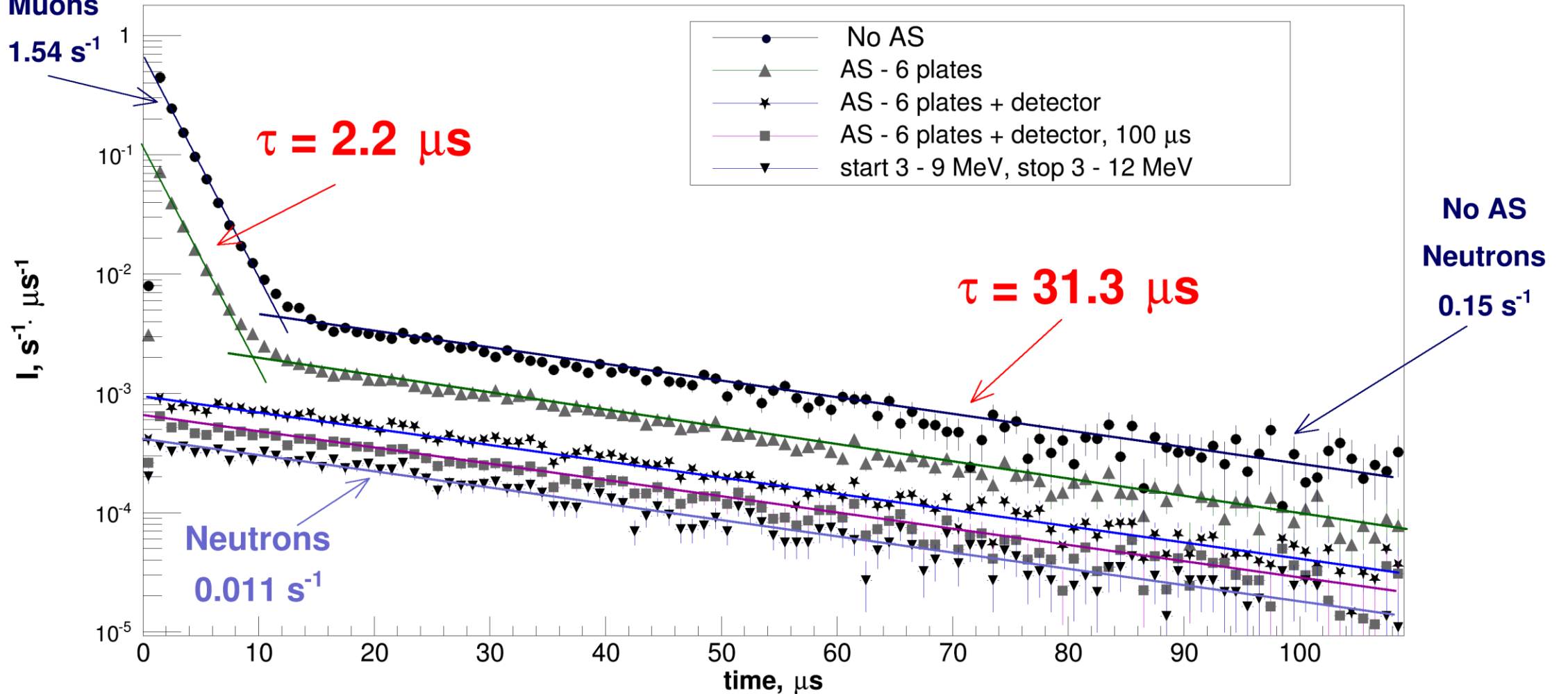
Космический фон

First AS version suppress background **by an order** of magnitude

No AS
Muons

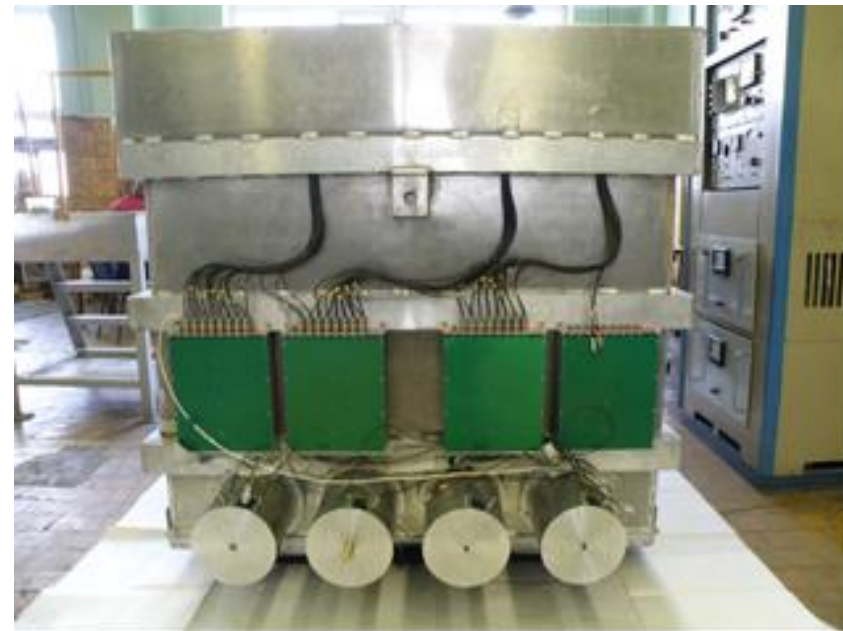
1.54 s^{-1}

Time spectra for the 1st version of active shielding (AS) in different configuration.

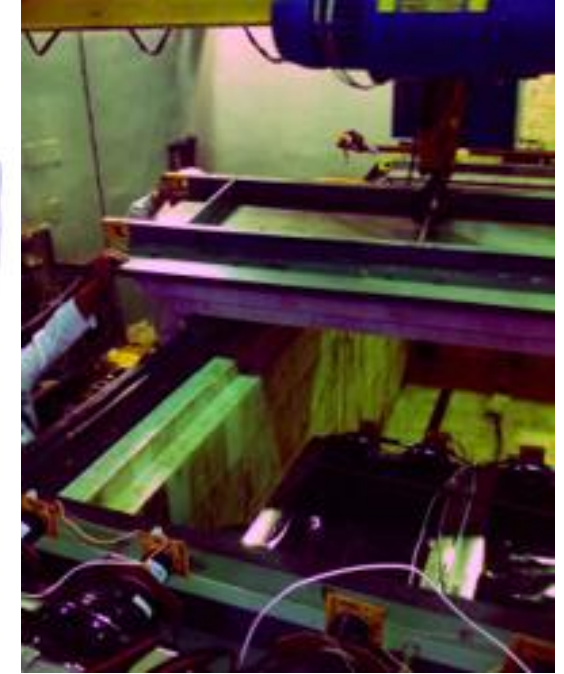
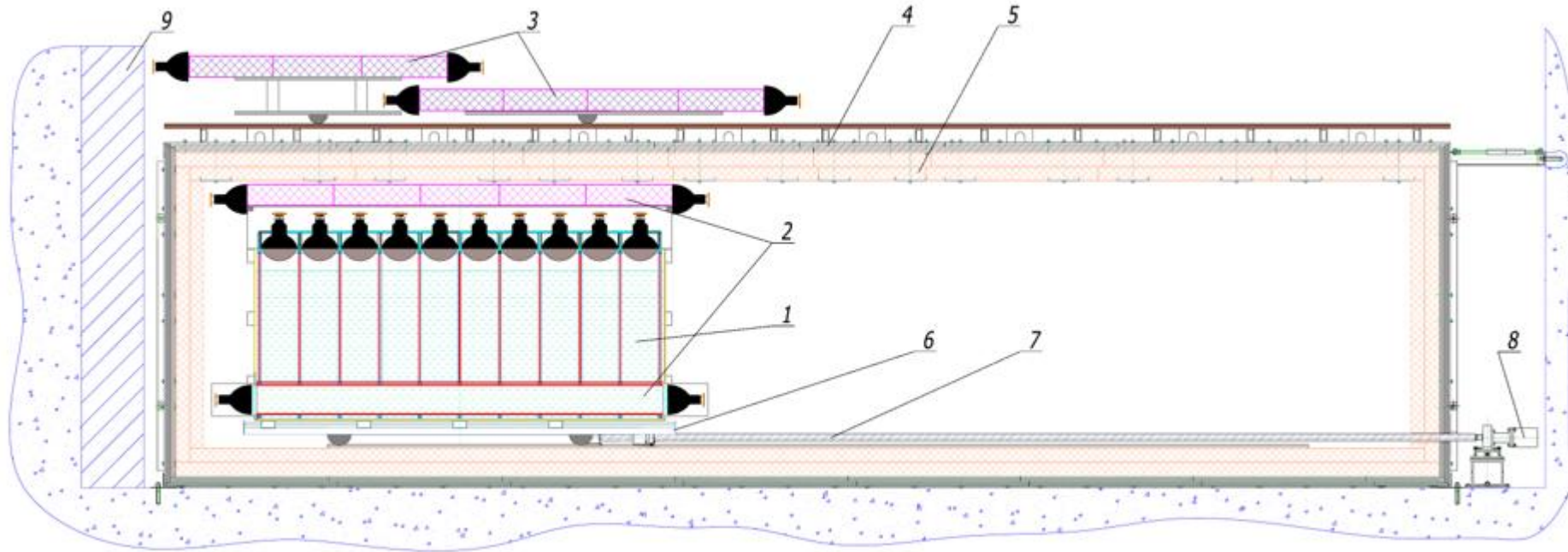


Создание полномасштабного детектора антинейтрино в ПИЯФ

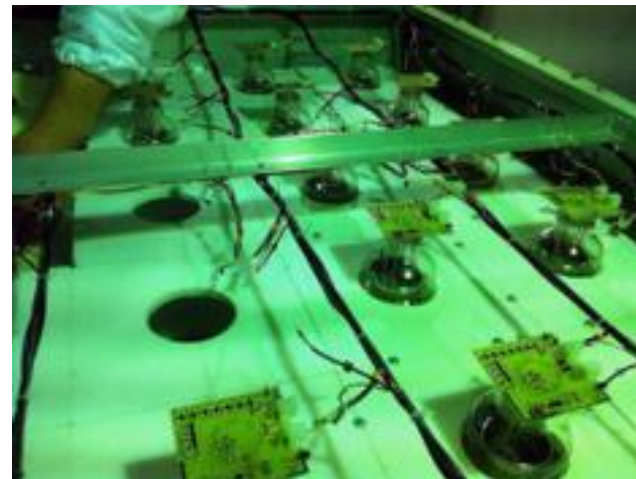
- Cell structure (50 cells)
- LAB-based Gd loaded (1g/l) LS
- Hamamatsu R5912 (35) and PMT 9354 (15) only from above
- Downside volume for active shielding



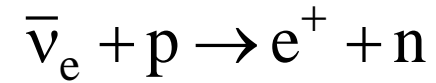
Установка полномасштабного детектора антинейтрино на реакторе СМ-3 НИИАР



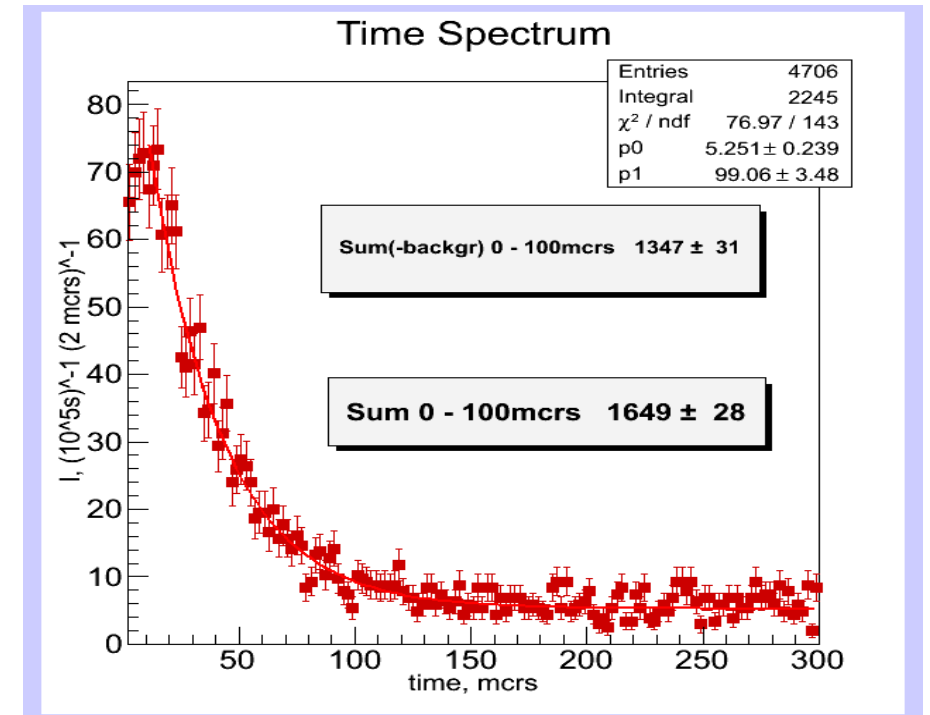
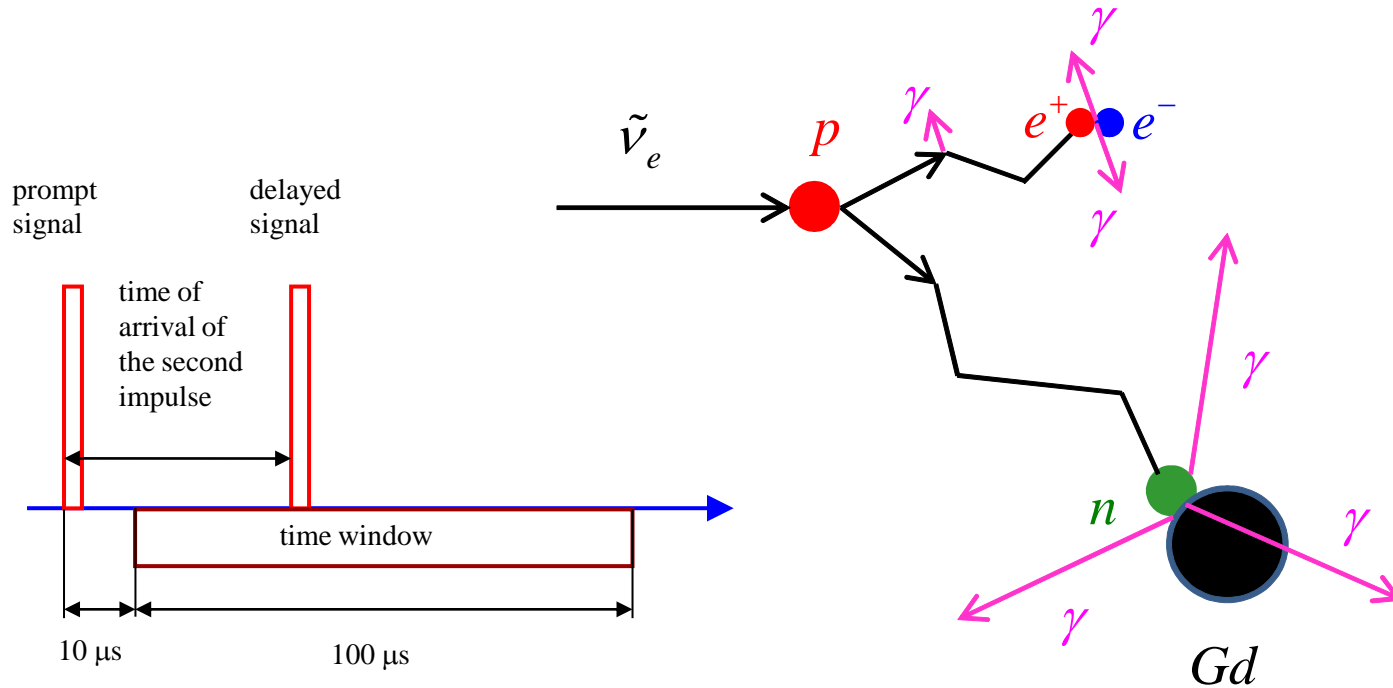
2. internal active shielding (AS)
3. external AS (umbrella)
4. steel and lead
5. borated polyethylene
6. moveable platform
7. feed screw
8. step motor
9. shielding against fast neutrons from iron shot



Детектор с сцинтиллятором с добавкой гадолиния концентрацией 0.1%г/л предназначен для регистрации процессов обратного бета-распада



Метод регистрации антинейтрино состоит в выделении коррелированной пары сигналов: мгновенного сигнала от позитрона и задержанного сигнала после захвата нейтрона гадолинием.

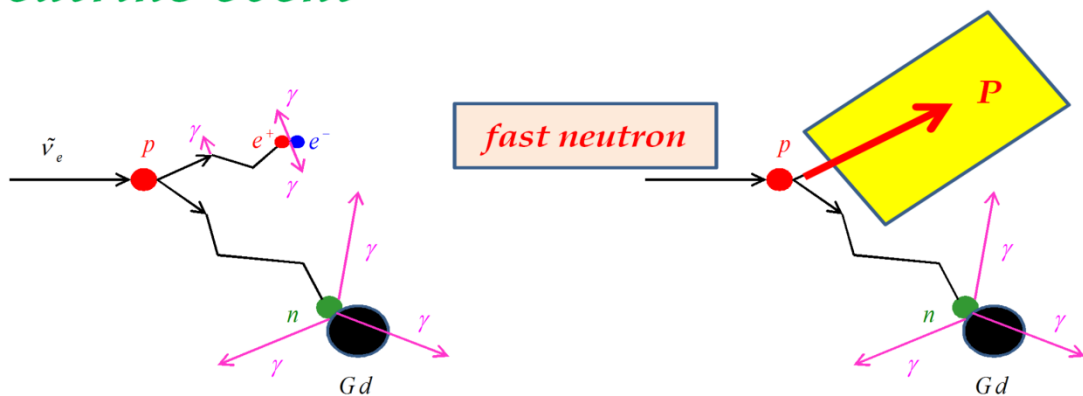


Секционирование детектора, проблема быстрых нейтронов, выделение нейтринного сигнала

The problem of fast neutrons

False event

Neutrino event

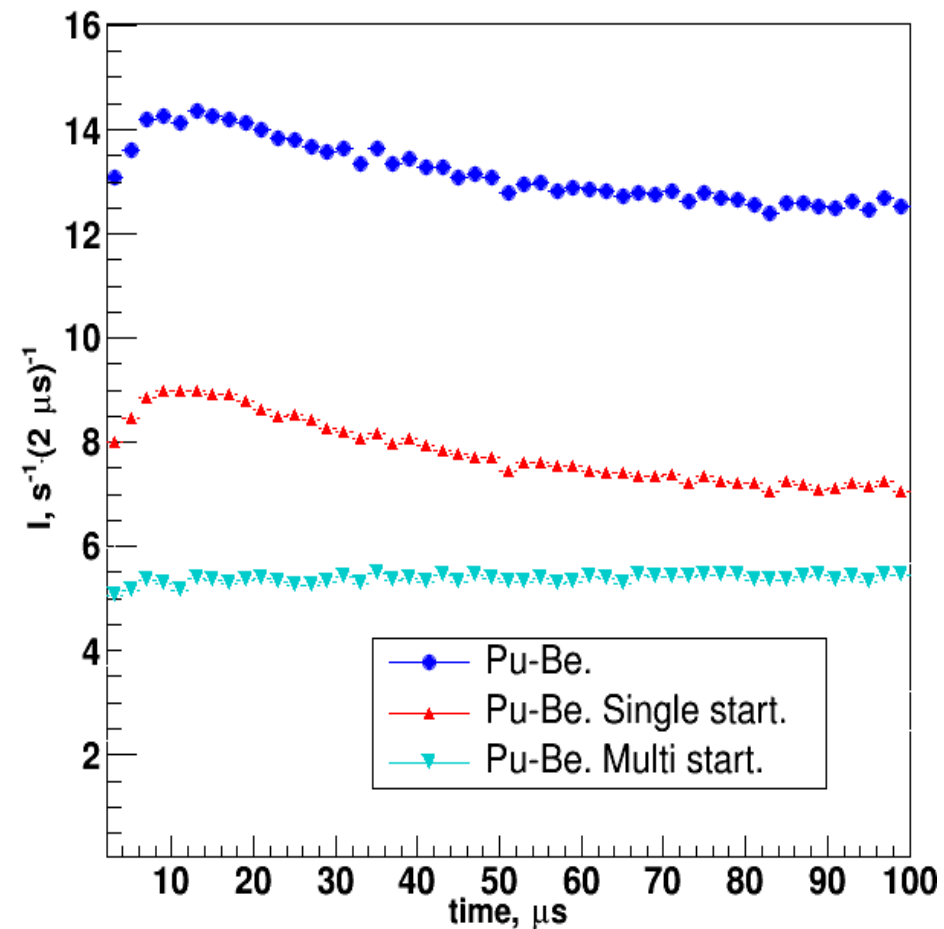


Neutron scattering imitate neutrino reaction

24 central and 16 side cells for full-scale detector

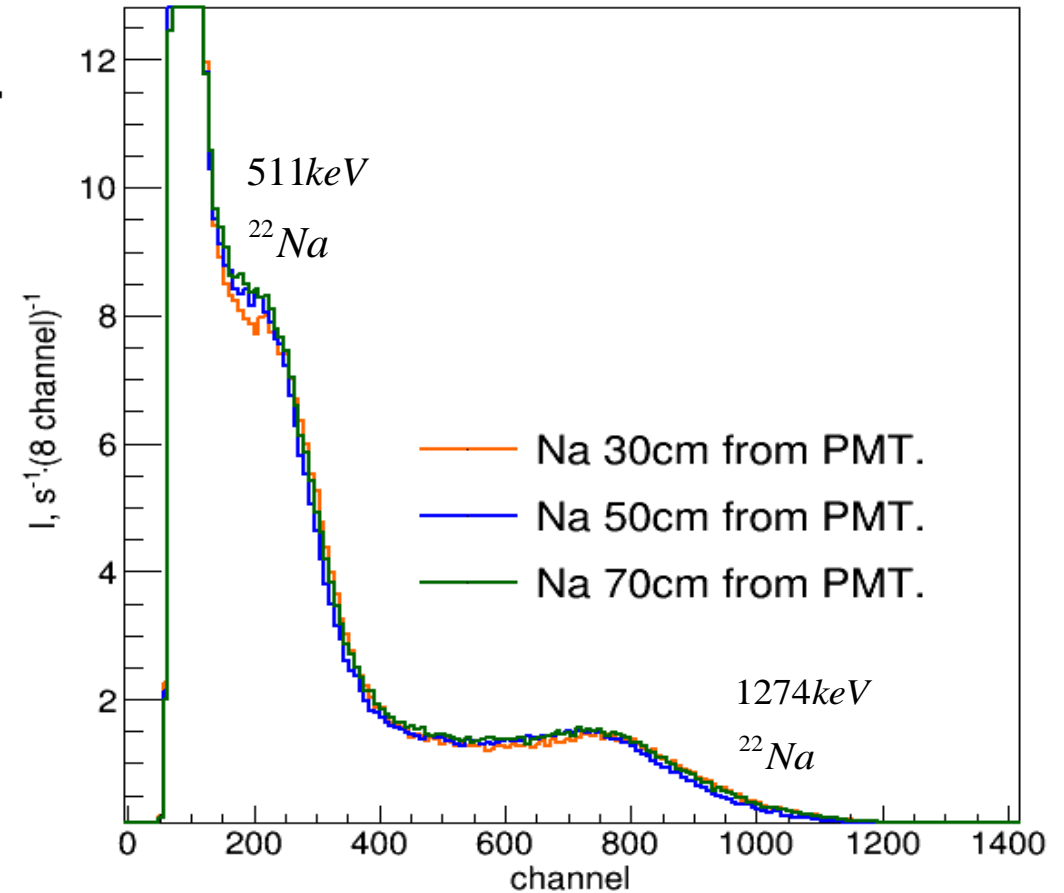
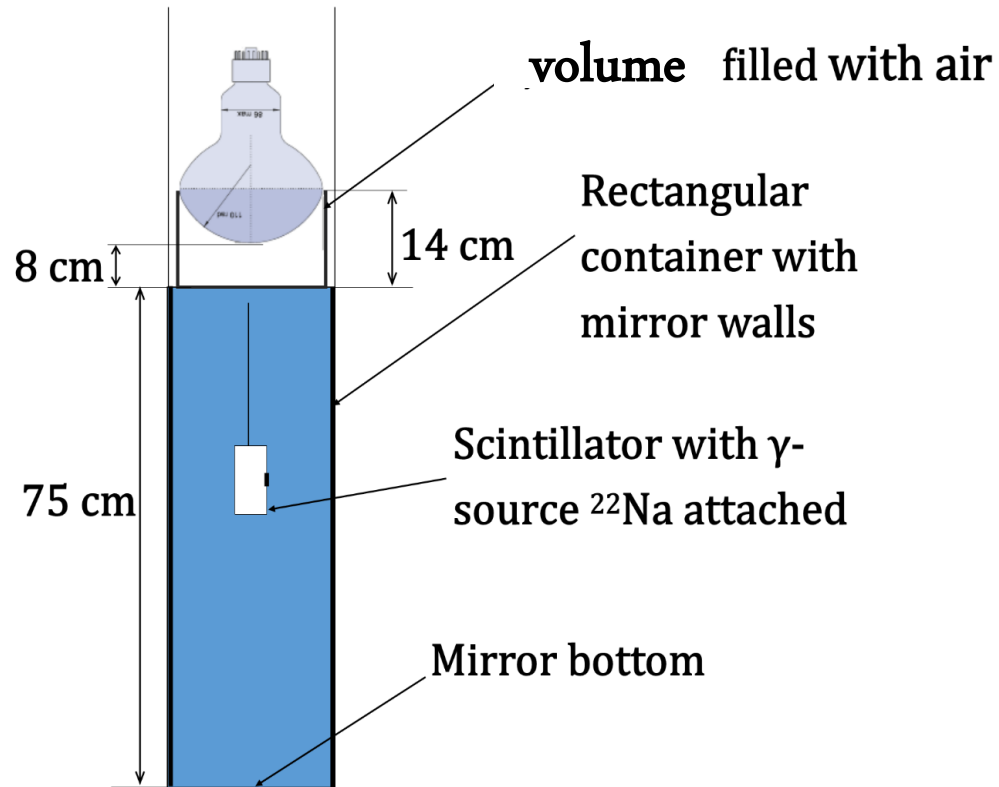
central cell	side cell	angular cell	in all cells
0.42	0.29	0.19	0.37

Тест с источником быстрых нейтронов

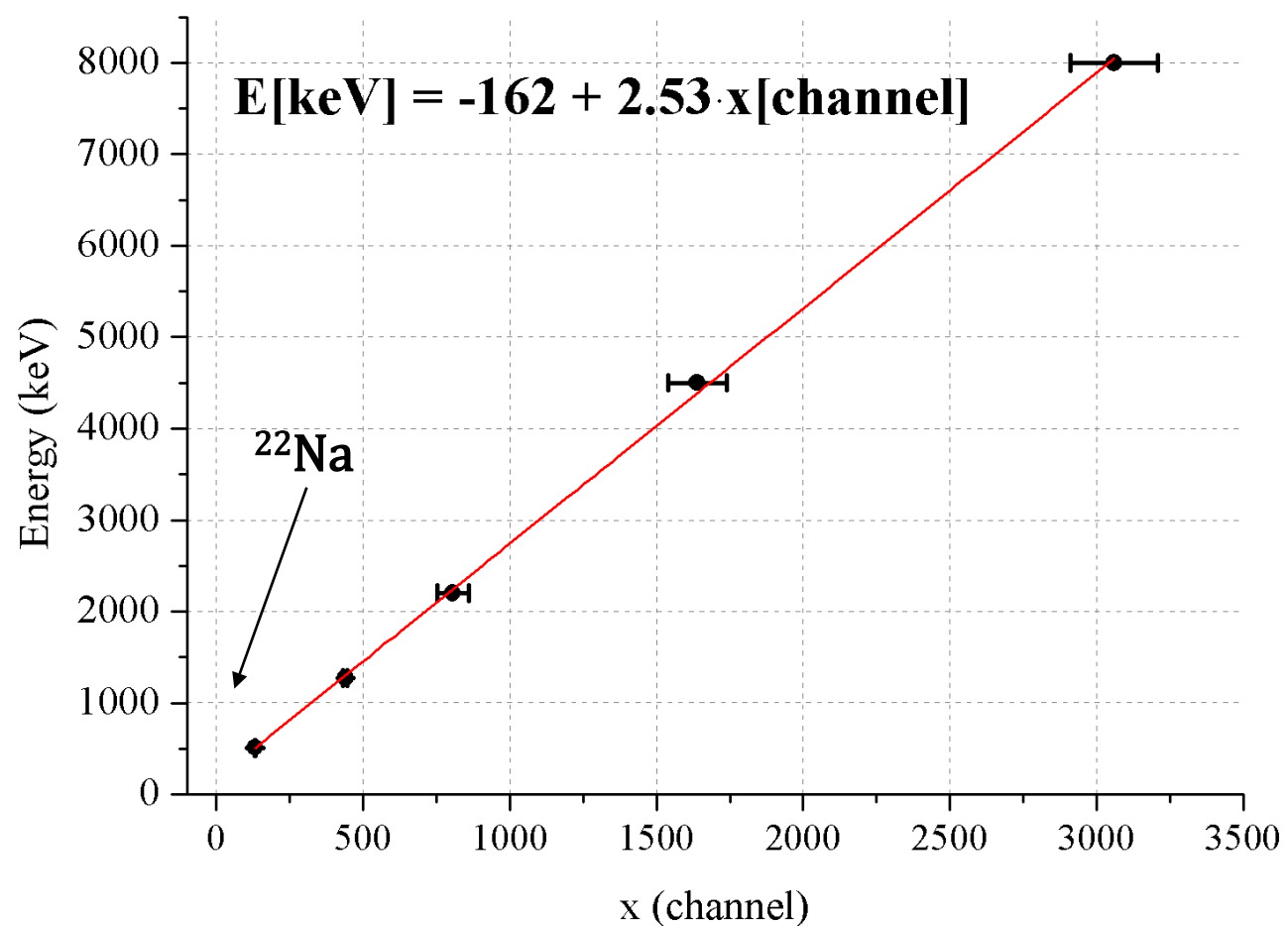
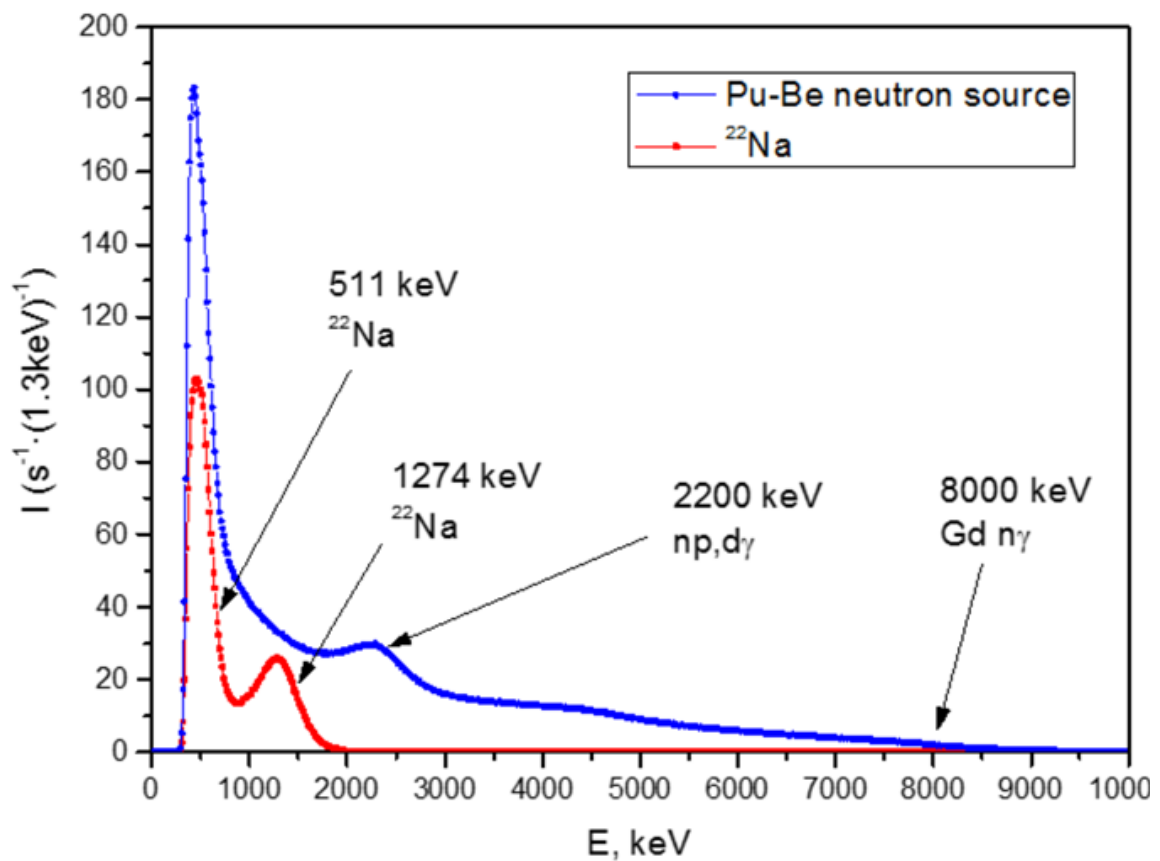


**Average ratio
multi/every for full-scale
detector (0.37 ± 0.04)**

Энергетическая калибровка на модели одной секции



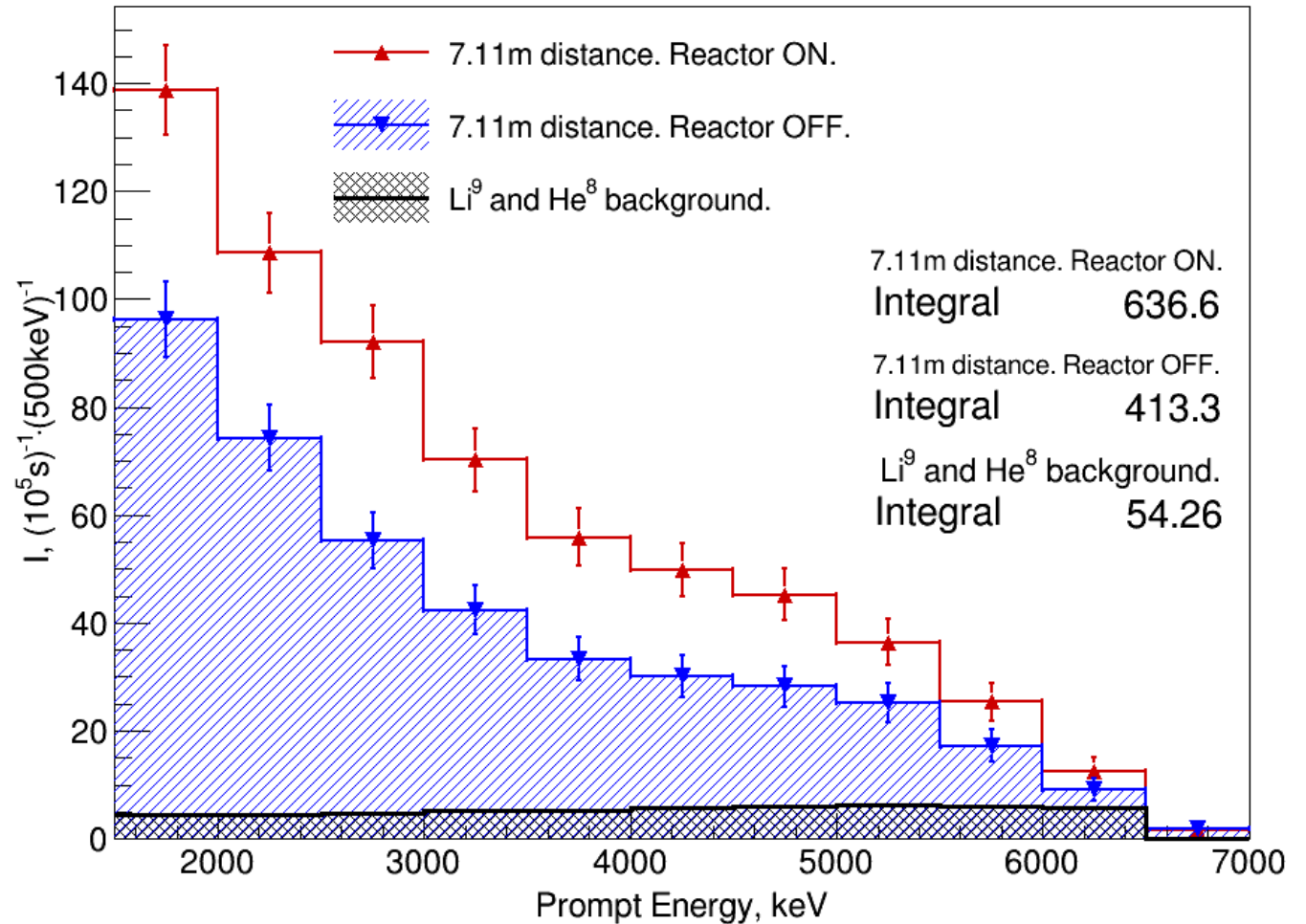
Энергетическая калибровка полномасштабного детектора



Энергетический спектр и отношение сигнал фон

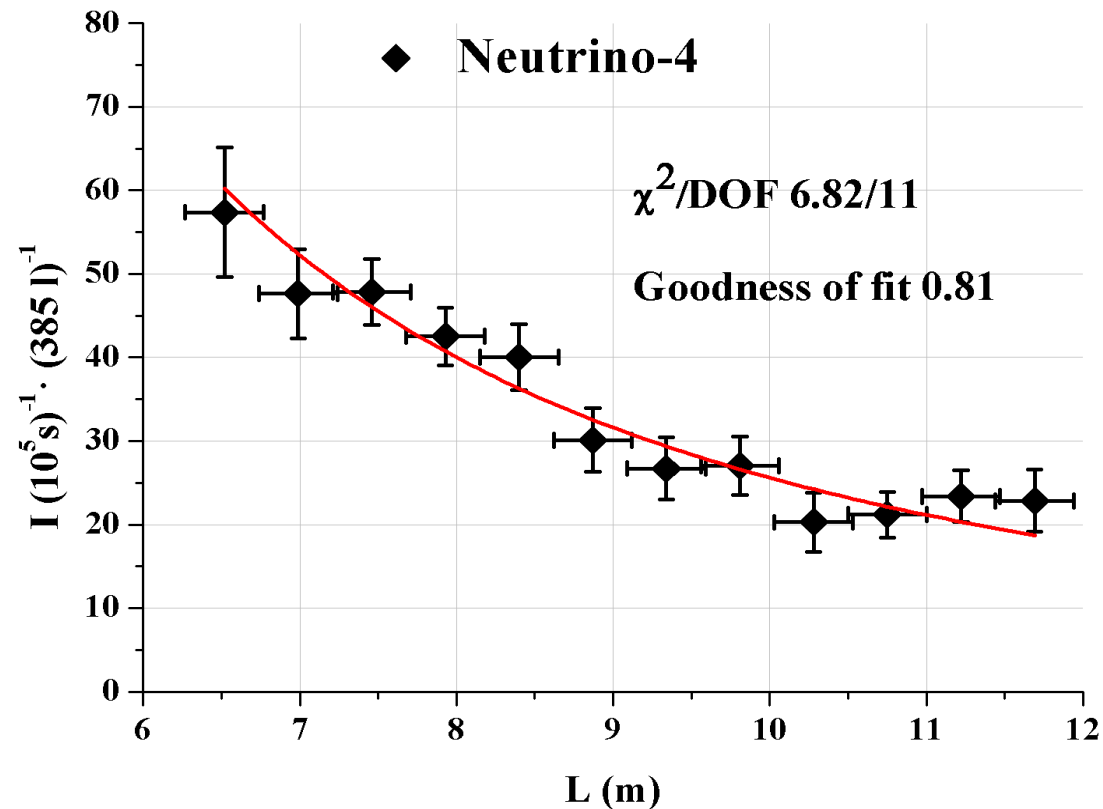
Reactor ON and OFF spectra
after 2 months exposition at
7.11m
 $213 \text{ nu}/10^5$ (ON - OFF).
 $S/B = 0.54$

Unavoidable background of
 Li^9 and He^8 is $54 \text{ events}/10^5\text{s}$



**Измерения с полномасштабном
детектором были начаты в июне
2016 года. Измерения с включённым
реактором проводились в течение
480 дней, а с выключенным
реактором в течение 278 дней. Всего
реактор был включён и выключен
58 раз.**

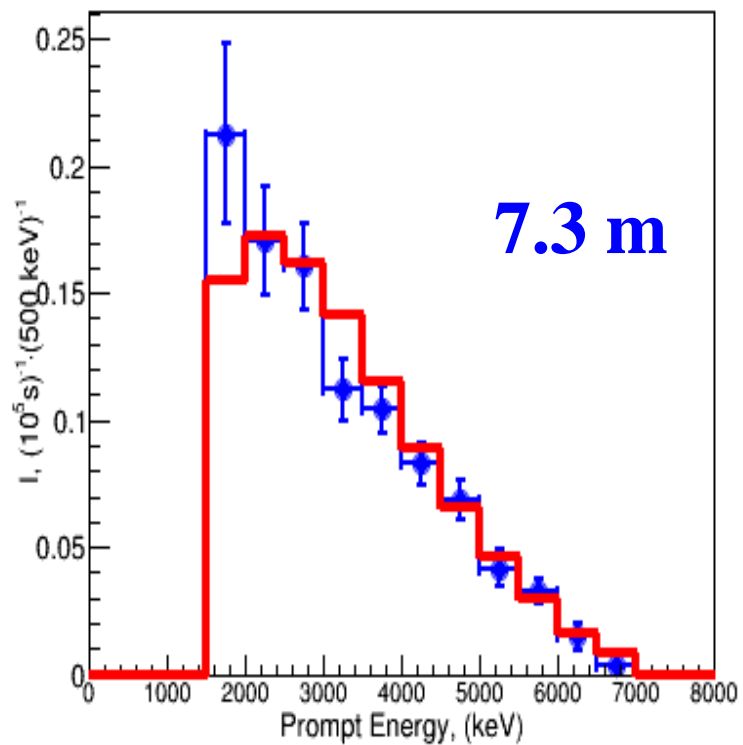
Результаты измерений разности скорости счёта нейтриноподобных событий для полномасштабного детектора как зависимость потока антинейтрино от расстояния до центра активной зоны реактора.



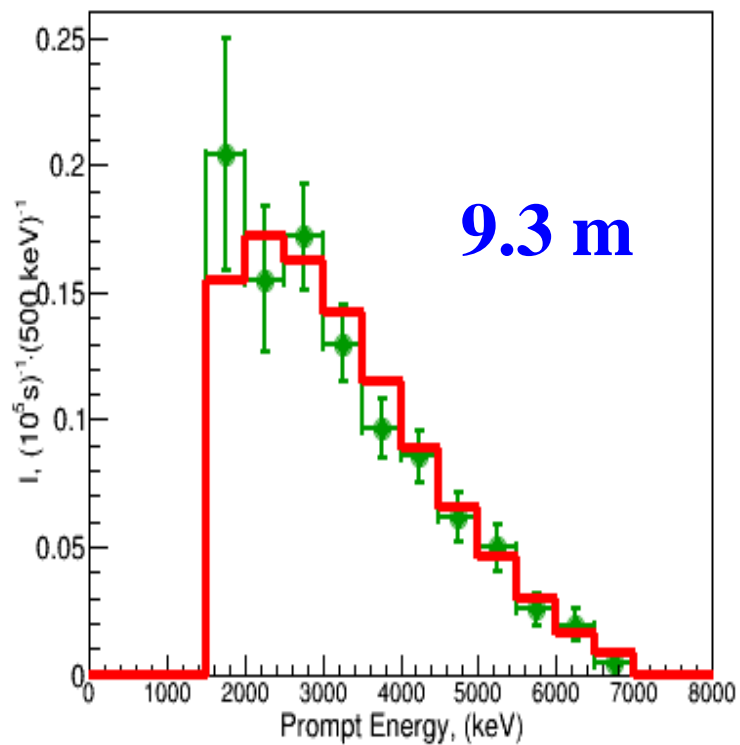
Аппроксимация экспериментальной зависимости функцией A/L^2 даёт удовлетворительный результат. Значимость подгонки функцией A/L^2 составляет 81%. Поправка на конечные размеры активной зоны реактора и размера детекторных секций является незначительной – 0.3%, а поправка на несовпадение оси перемещения детектора и направления на центр активной зоны реактора также незначительна и составляет 0.6%.

Энергетический спектр на разных расстояниях

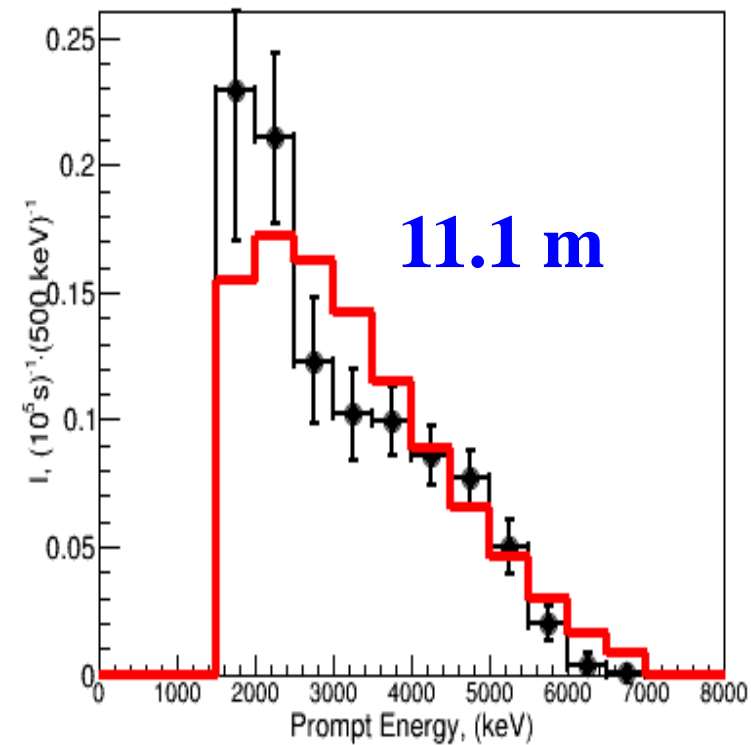
Front (7.3m) spectrum



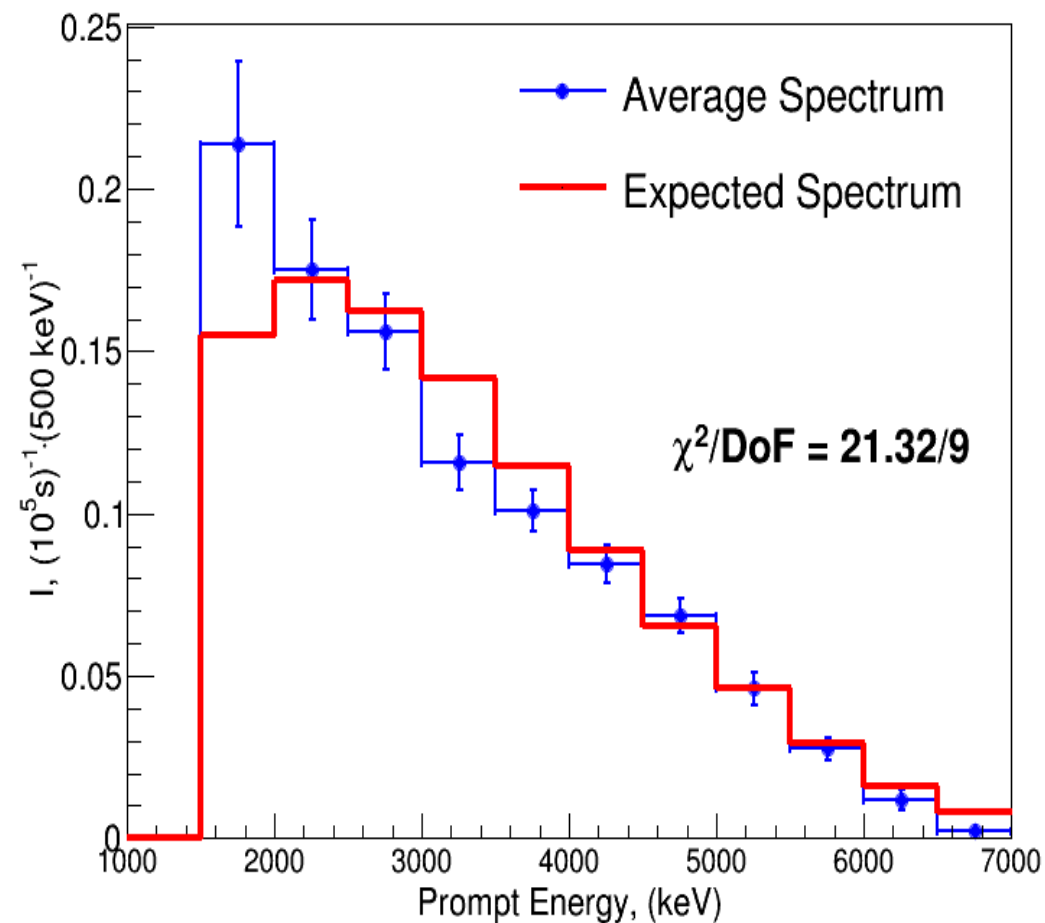
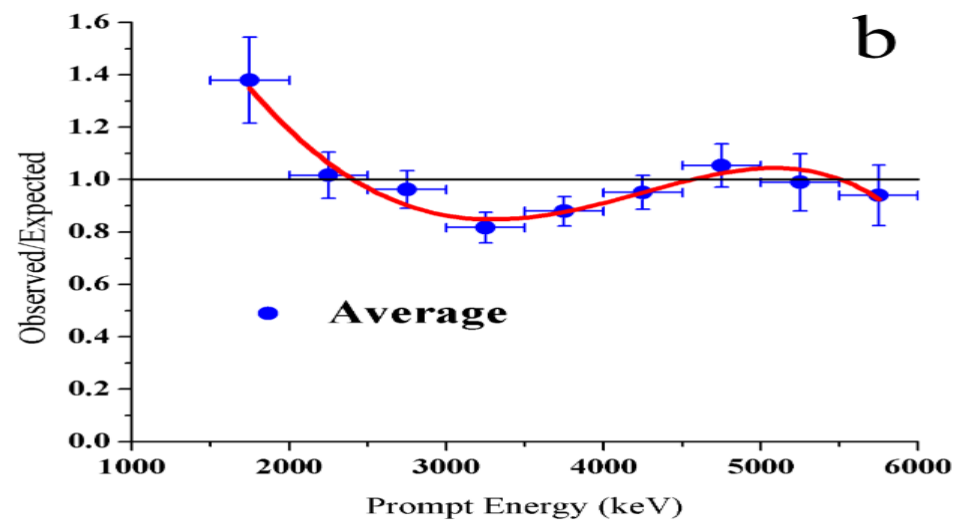
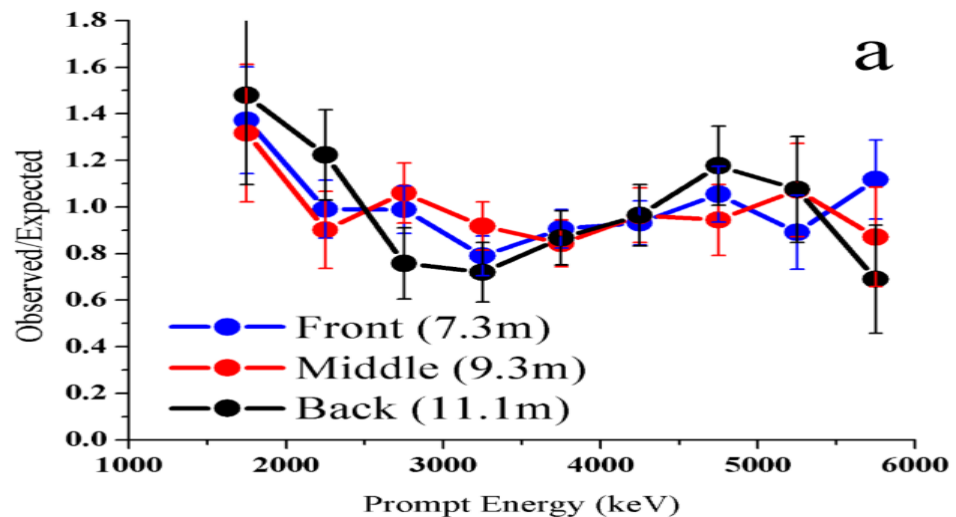
Middle (9.3m) spectrum



Back (11.1m) spectrum



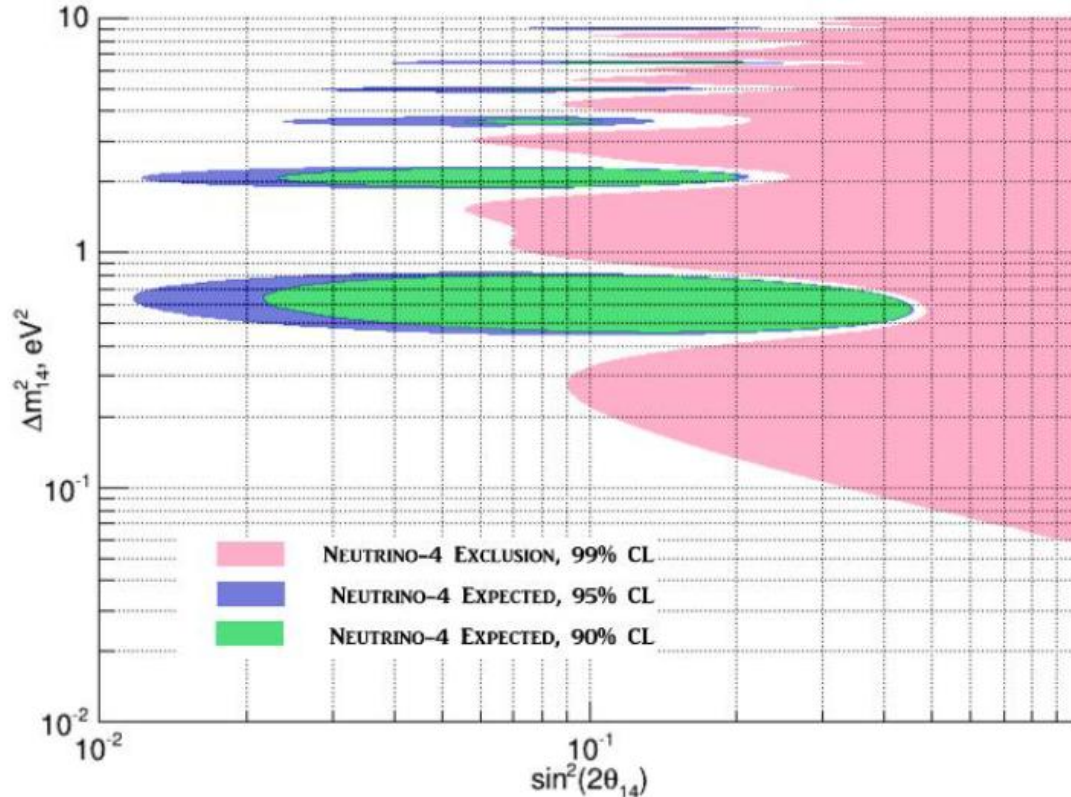
а) Отношение экспериментальных спектров мгновенных сигналов к расчетным спектрам из Монте Карло вычислений для трёх расстояний: 7.3м, 9.3м и 11.1м, б) усреднённая по всем расстояниям кривая с подгонкой этой зависимости полиномом (красная кривая).



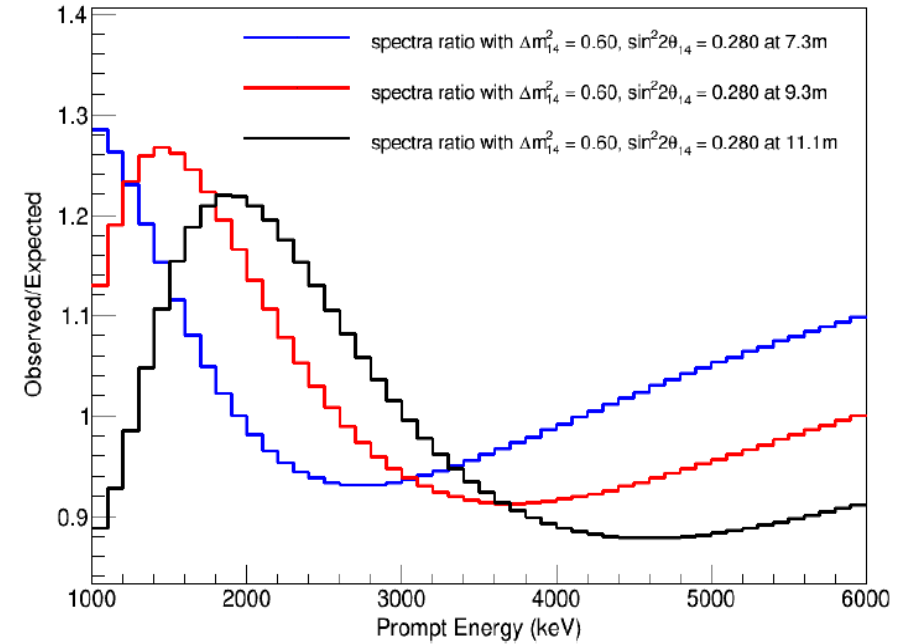
Спектр мгновенных сигналов для всего цикла измерений, объединенный для всех расстояний (среднее расстояние 8.6 м), красной гистограммой показан спектр, полученный в результате Монте-Карло моделирования при использовании антинейтринного спектра от осколков деления ^{235}U [1], так как реактор СМ-3 работает на высокообогащенном топливе.

Область ограничений на $\sin^2(2\theta_{14}), \Delta m_{14}^2$
при использовании реакторного расчётного спектра

Вывод: расчётный реакторный спектр нельзя использовать



Анализ экспериментальных данных в предположении, что искажение экспериментального спектра по отношению к расчётному вызвано осцилляциями в стерильное состояние. Розовая область ограничивает параметры осцилляций с вероятностью 99%. Синяя и зелёная области соответствуют возможным параметрам осцилляций с вероятностью 95% и 90% соответственно.

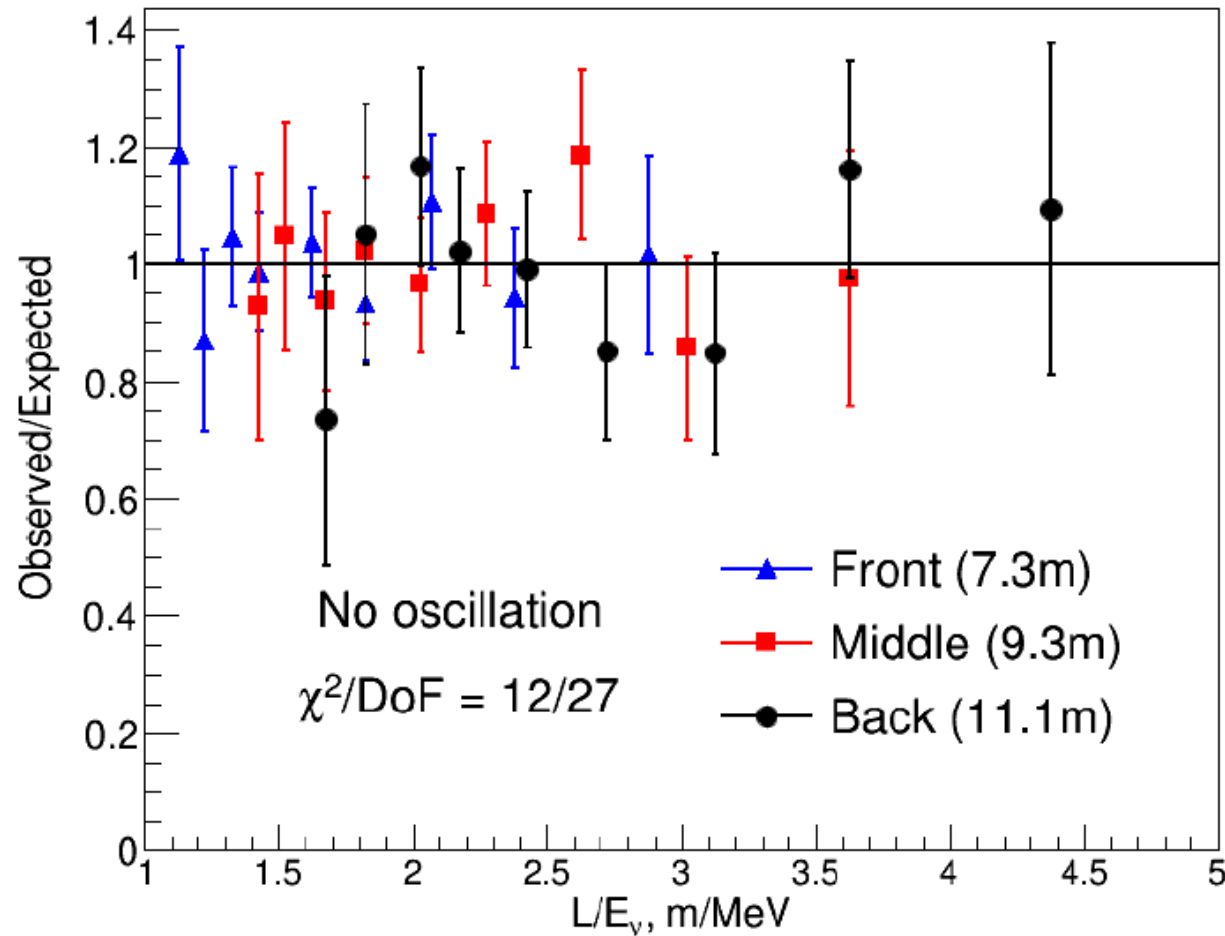


Расчёт ожидаемых эффектов для спектра мгновенных сигналов на разных расстояниях при наличии осцилляций с параметрами:

$$\Delta m_{14}^2 = 0.6 \text{eV}^2 \quad \sin^2 2\theta_{14} = 0.14$$

Анализ нейтринных осцилляций как функция отношения L/E с скорректированным спектром (под экспериментальный)

интервал 2 метра,
3 позиций по
расстоянию

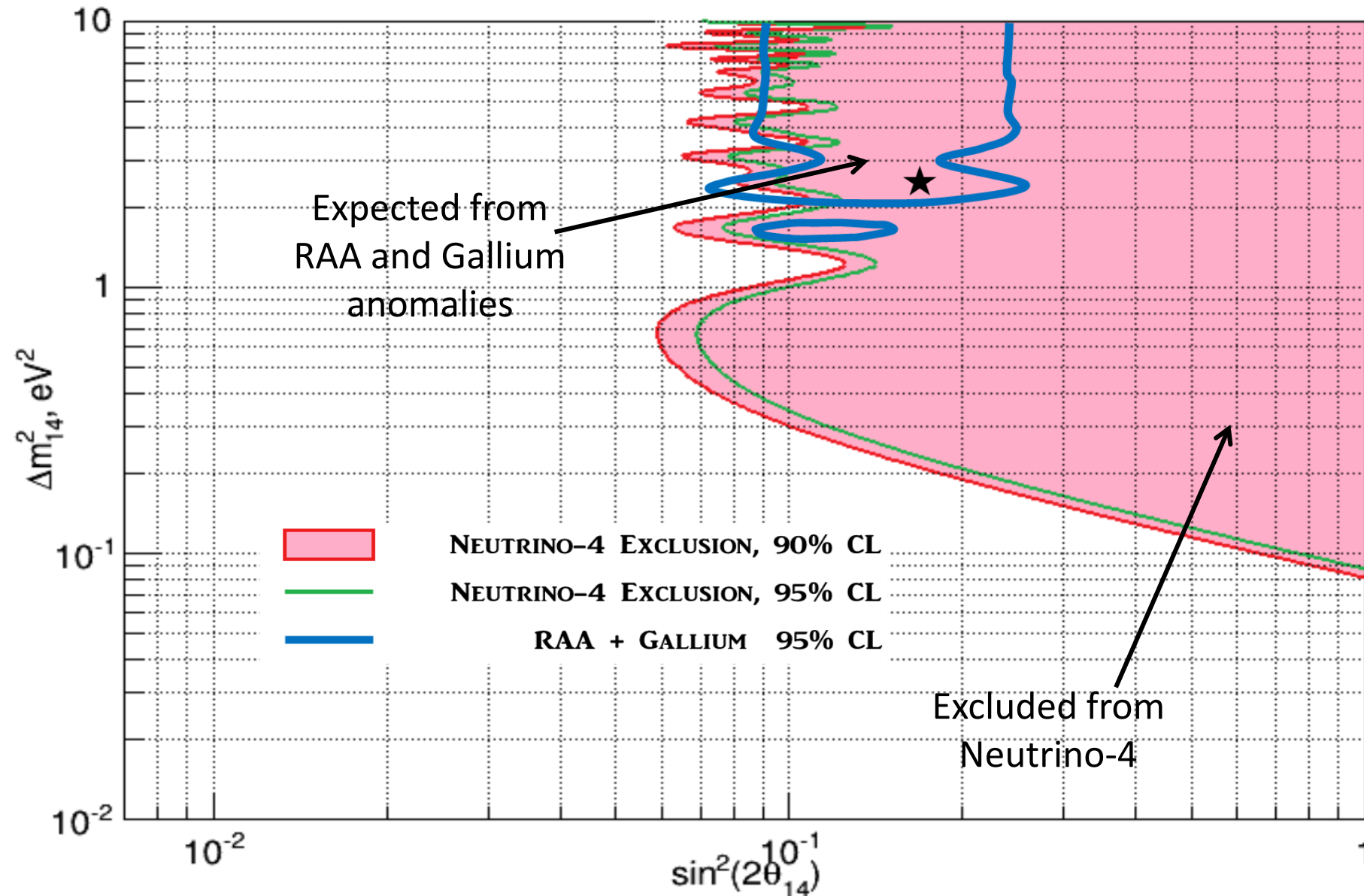


Есть опасность
усреднить эффект
частых осцилляций

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

Область ограничений на $\sin^2(2\theta_{14}), \Delta m_{14}^2$

При усреднении данных по интервалу 2 метра,
3 позиций по расстоянию



Новый этап

Детальный анализ данных

с интервалом 0.5 метра, 12 позиций по расстоянию

и

с интервалом 0.25 метра, 24 позиций по расстоянию

Метод обработки данных

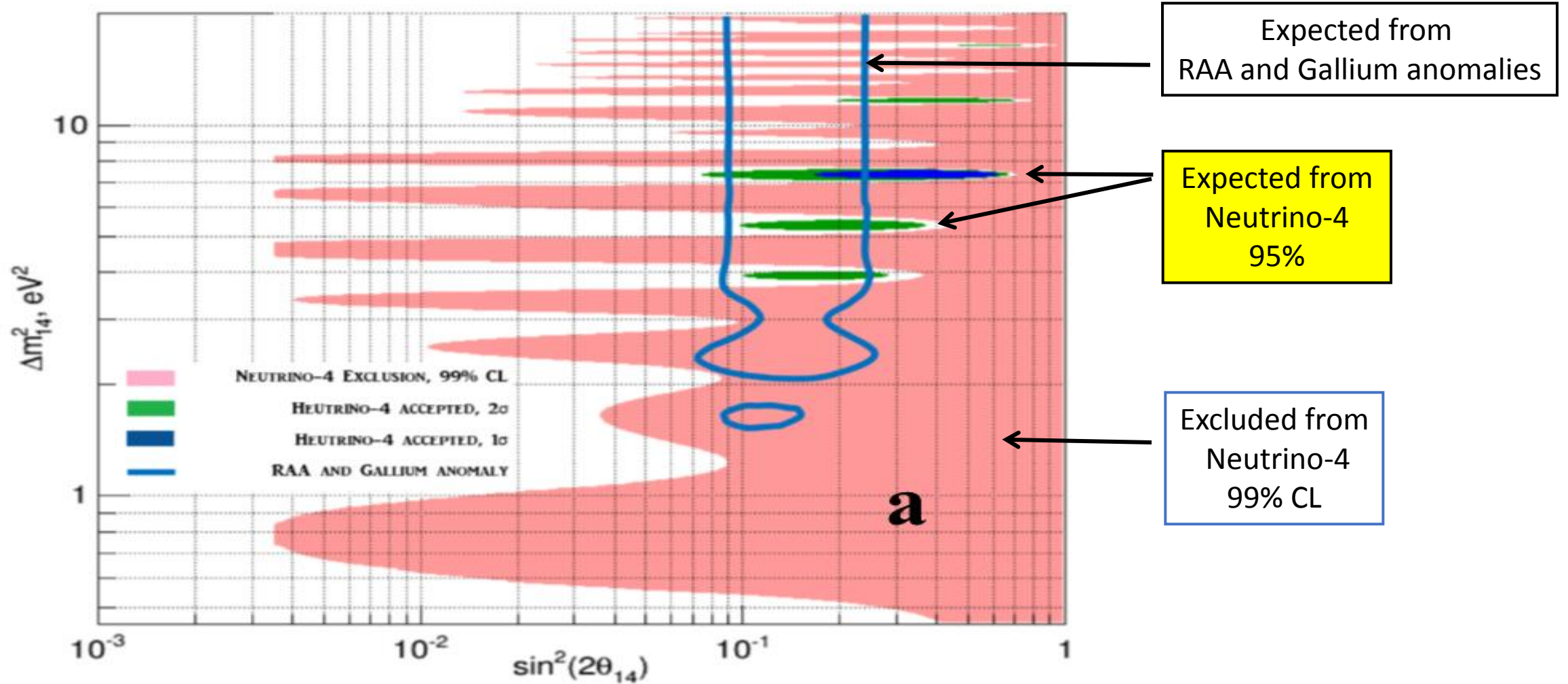
Анализ экспериментальных данных следует проводить без использования расчётного спектра. Можно сделать модельно независимый анализ, используя отношение , где в числителе стоит счёт антинейтринных событий с коррекцией на геометрический фактор $1/L^2$, а в знаменателе его среднее значение по всему диапазону расстояний:

$$\frac{(N_{i,k} \pm \Delta N_{i,k}) L_k^2}{K^{-1} \sum_k (N_{i,k} \pm \Delta N_{i,k}) L_k^2} = \frac{[1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 (1.27 \Delta m_{14}^2 L_k / E_i)]}{K^{-1} \sum_k [1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 (1.27 \Delta m_{14}^2 L_k / E_i)]}$$

В правой части стоит такое же отношение, ожидаемое при наличии осцилляций. В обоих случаях произведена нормировка на спектр, усреднённый по всем расстояниям, поэтому в знаменателе эффект осцилляций усредняется в значительной степени, если осцилляции достаточно частые для данного интервала расстояний. Следует заметить, что форма спектра не оказывает значительного влияния, т.к. в формуле используется отношение.

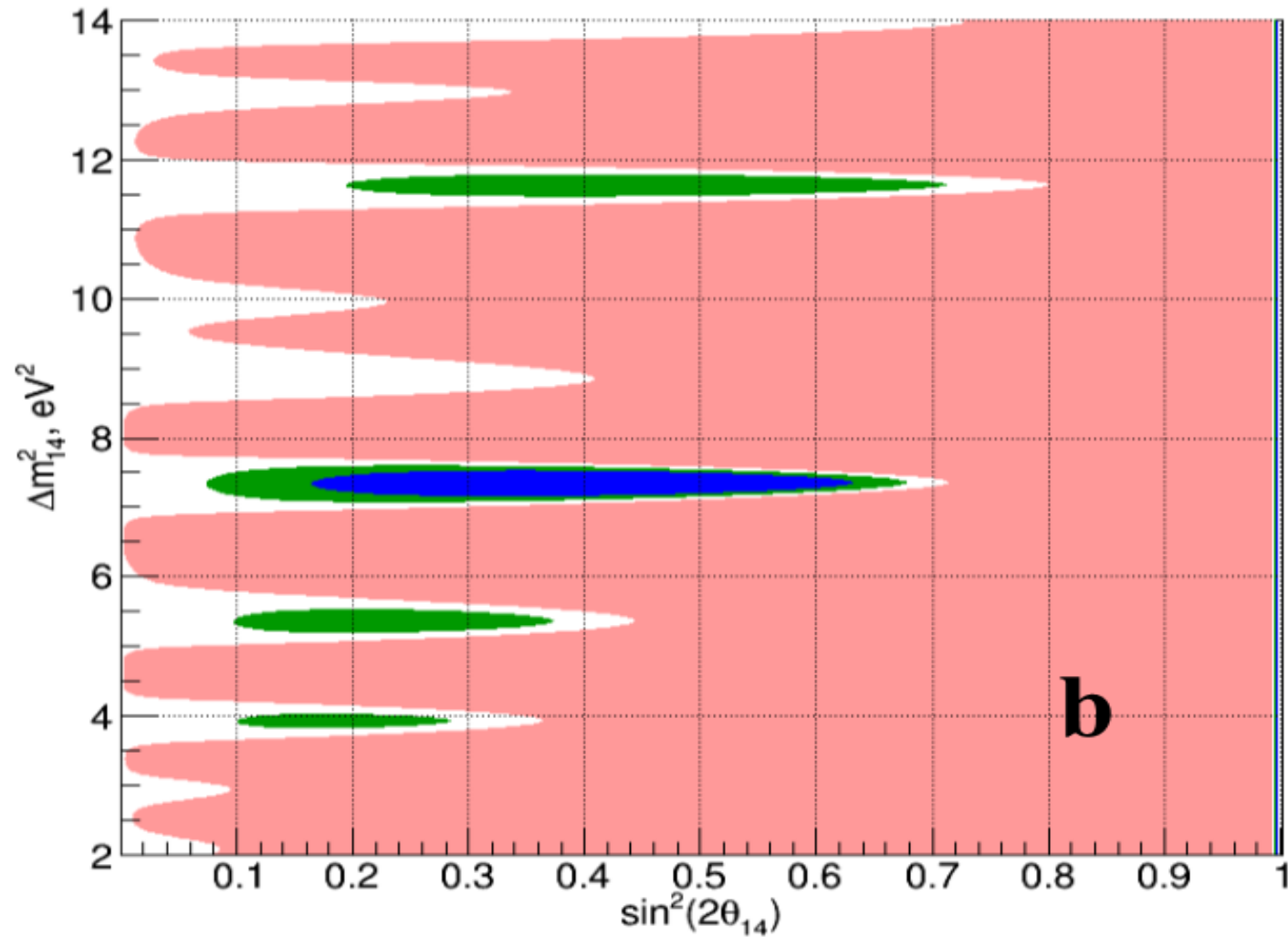
Результаты анализа на оптимальные параметры Δm_{14}^2 и $\sin^2 2\theta_{14}$ методом χ^2

интервал 0.25 метра, 24 позиций по расстоянию



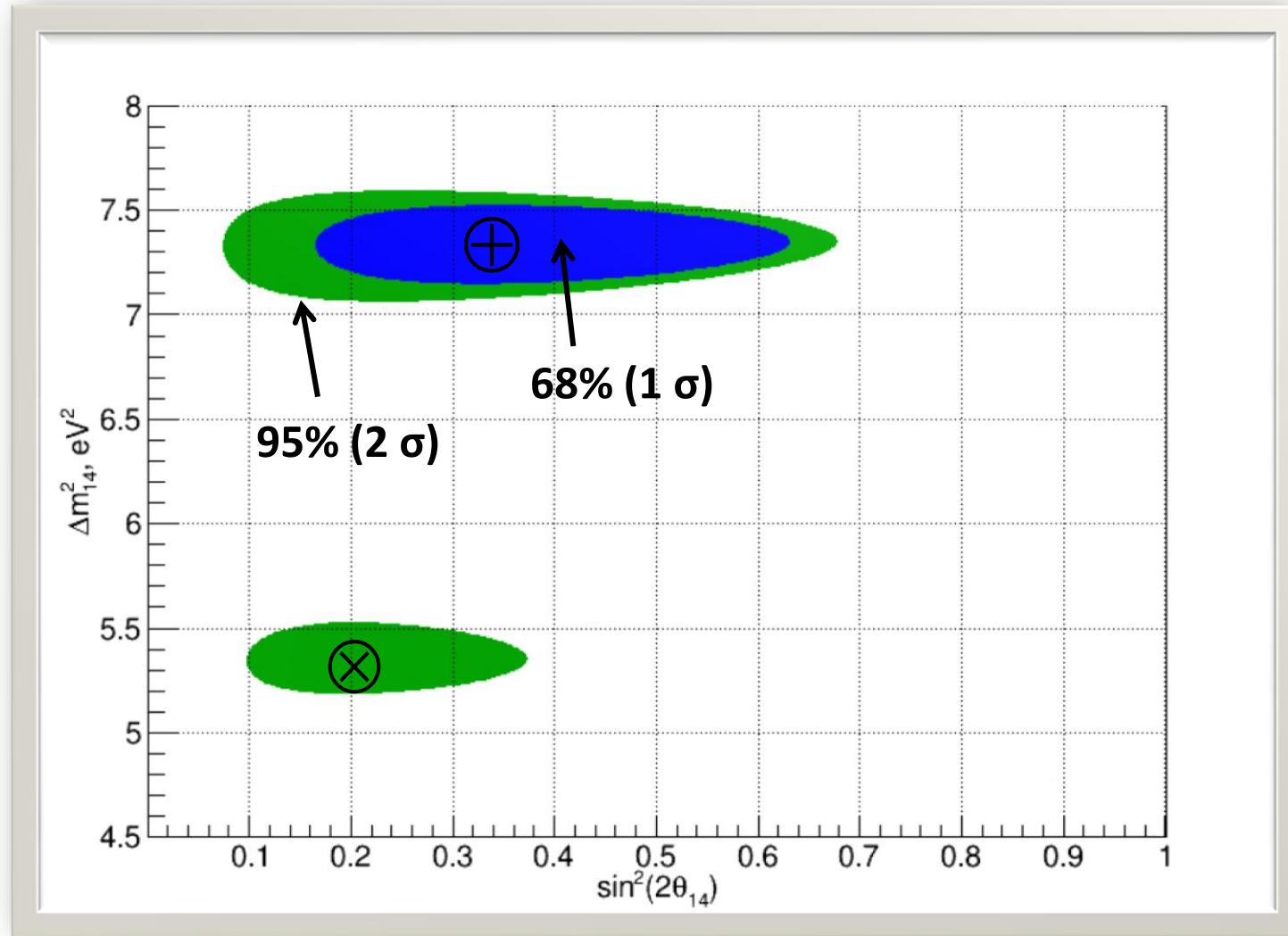
Ограничения на параметры осцилляций в стерильное состояние с 99% CL (розовый), область допустимых с 95% CL значений параметров (зелёный)

Результаты анализа на оптимальные параметры Δm_{14}^2 и $\sin^2 2\theta_{14}$ методом χ^2



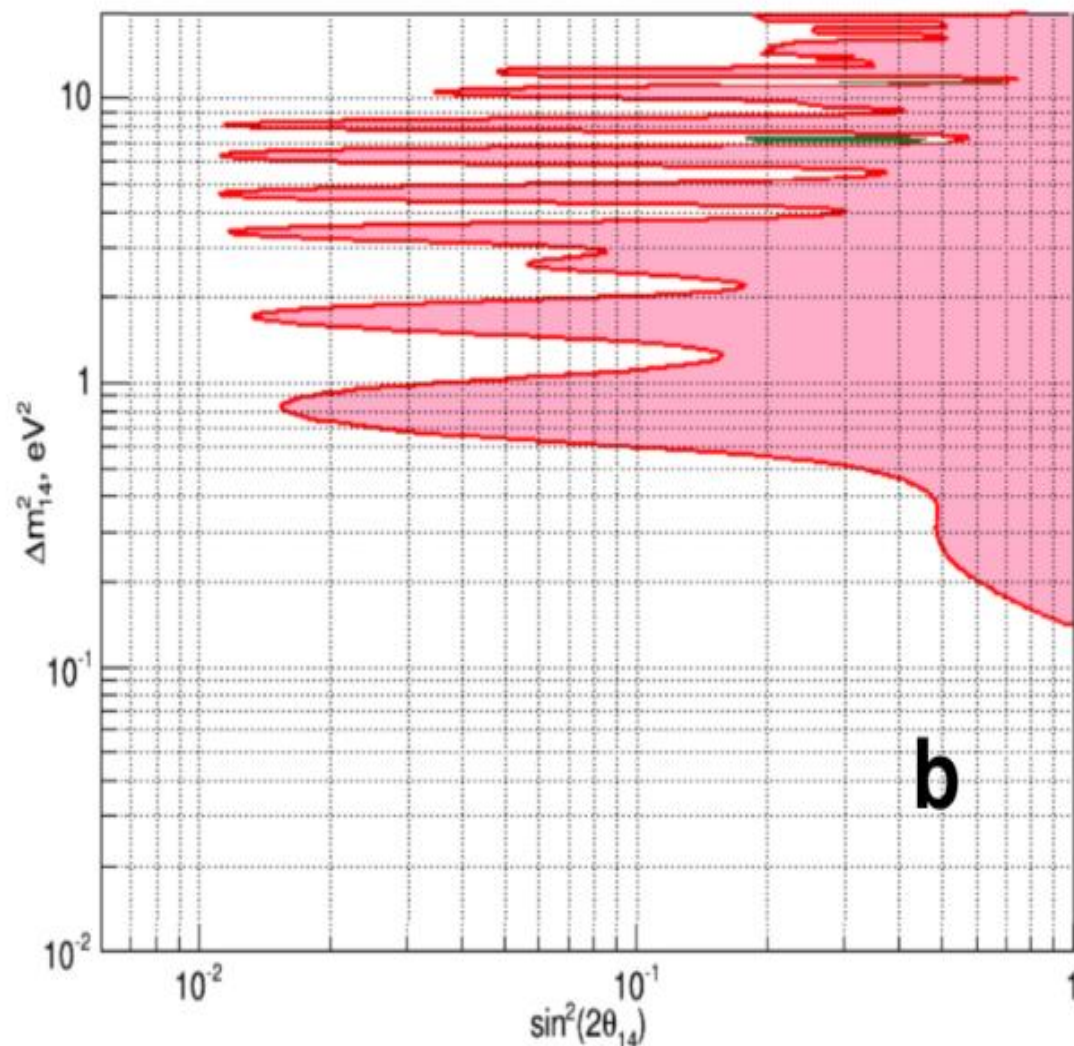
b - область вокруг центральных значений в линейном масштабе и с большим увеличением

Результаты анализа на оптимальные параметры Δm_{14}^2 и $\sin^2 2\theta_{14}$ методом χ^2



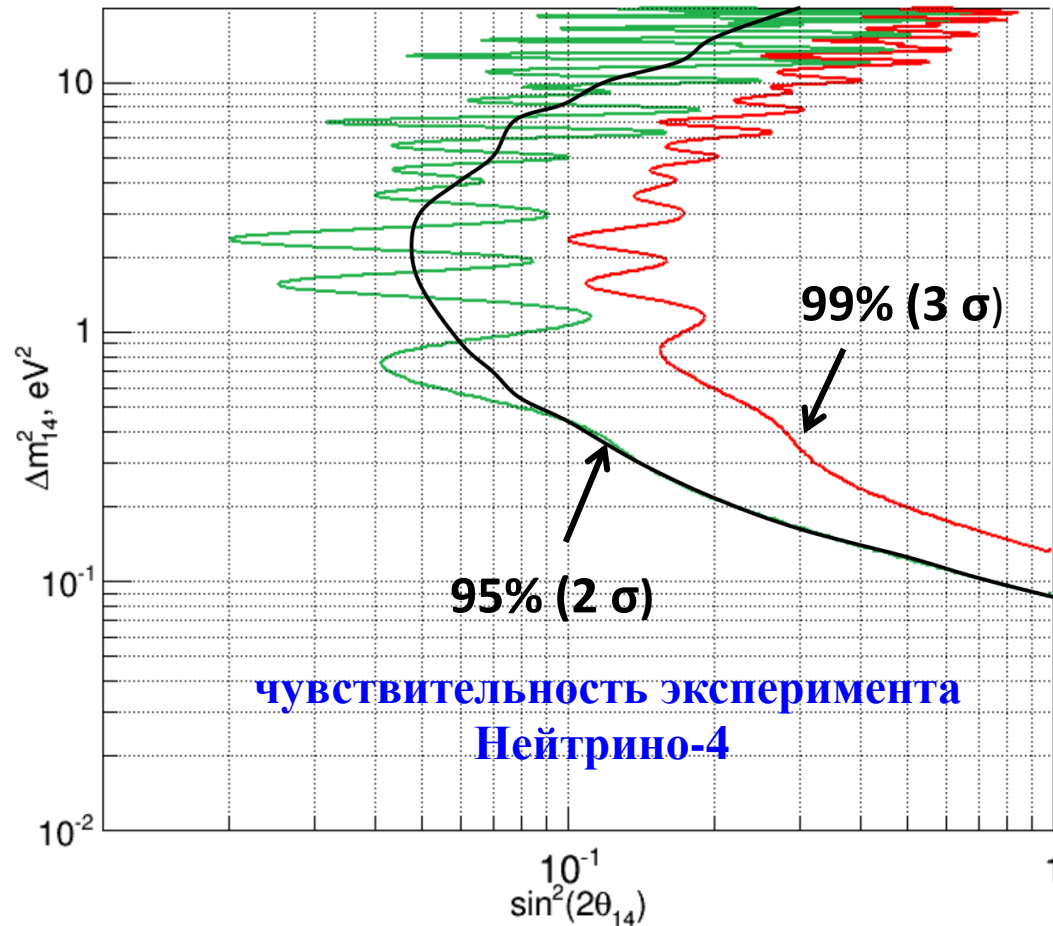
центральная область с ещё большим увеличением.

Анализ результата на устойчивость



Результаты проведённого анализа могут быть проверены на устойчивость. С этой целью экспериментальные данные ($N_{i,k} \pm \Delta N_{i,k}$) можно разыграть по гауссову распределению вокруг значения $N_{i,k}$ в пределах ошибки $\Delta N_{i,k}$. Таким способом было наиграно 60 условных экспериментов, которые могли бы состояться в пределах имеющейся экспериментальной точности. Для этих условных экспериментов можно провести анализ, подобный, указанному выше анализу и усреднить все распределения. Было показано, что результат ограничений (розовая область) воспроизводится, а область эффекта осцилляций сосредотачивается вокруг значения $\Delta m^2_{14} \approx 7.2 \text{eV}^2$

Определение чувствительности эксперимента Нейтрино-4



Симуляция экспериментальных данных, с такой же точностью, но заведомо без эффекта осцилляций.

Было показано, что большой размах возмущений по горизонтальной оси, пропадает. Это указывает на то, что большой размах возмущений свидетельствует о наличие эффекта.

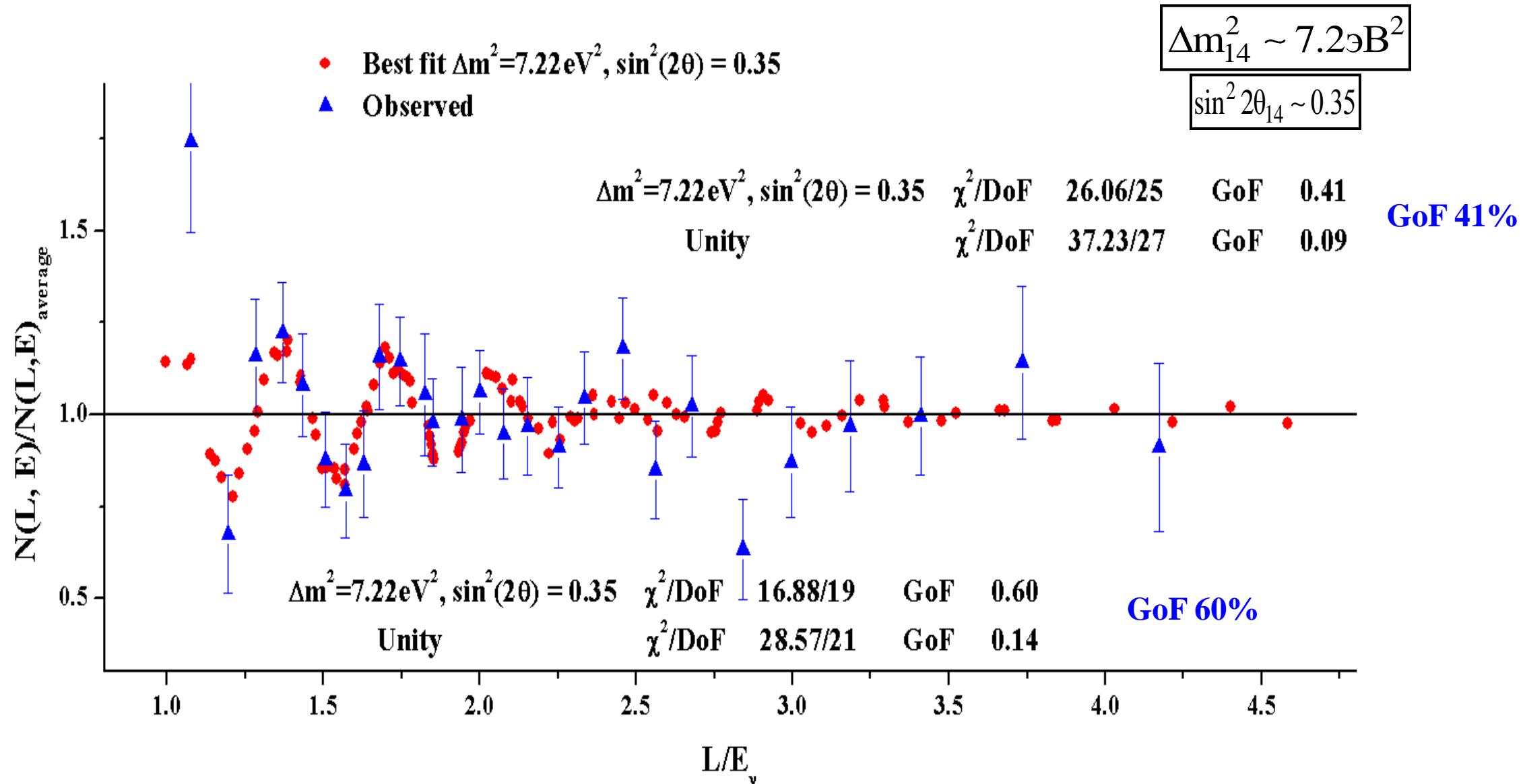
**Метод когерентного сложения
результатов измерений
для прямого наблюдения
антинейтринных осцилляций**

Метод когерентного сложения результатов измерений для прямого наблюдения антинейтринных осцилляций

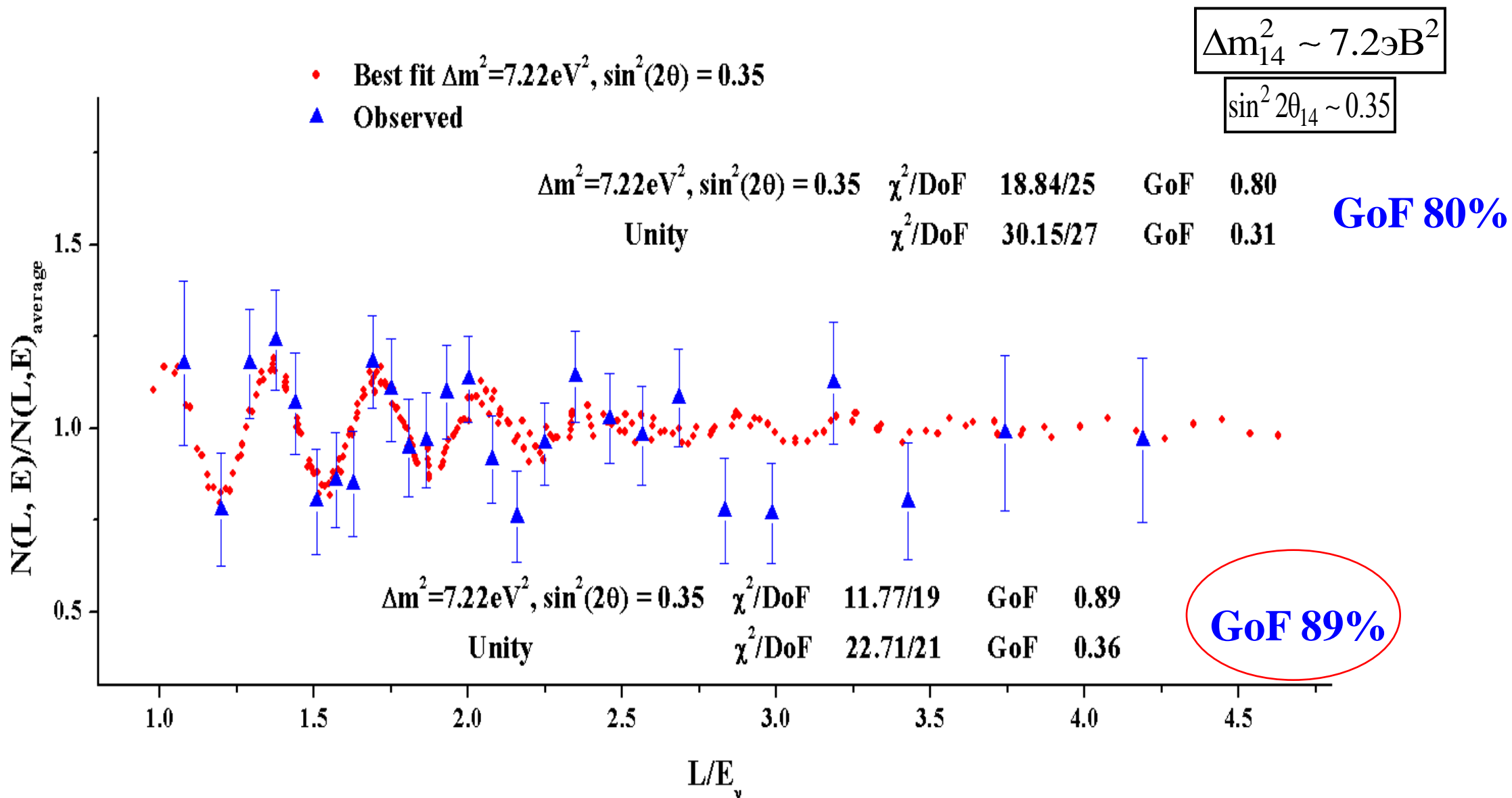
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_{\bar{\nu}} [\text{MeV}]} \right)$$

Поскольку эффект осцилляций зависит от отношения L/E , как видно из формулы, то целесообразно провести выборку экспериментальных результатов по этому параметру. Этот метод так называемого когерентного сложения результатов измерений, благодаря выборке данных по переменной L/E , даёт возможность прямого наблюдения антинейтринных осцилляций.

Метод когерентного сложения результатов измерений для прямого наблюдения антинейтринных осцилляций (0.5 метра, 12 позиций по расстоянию, 0.5 MeV по энергии)

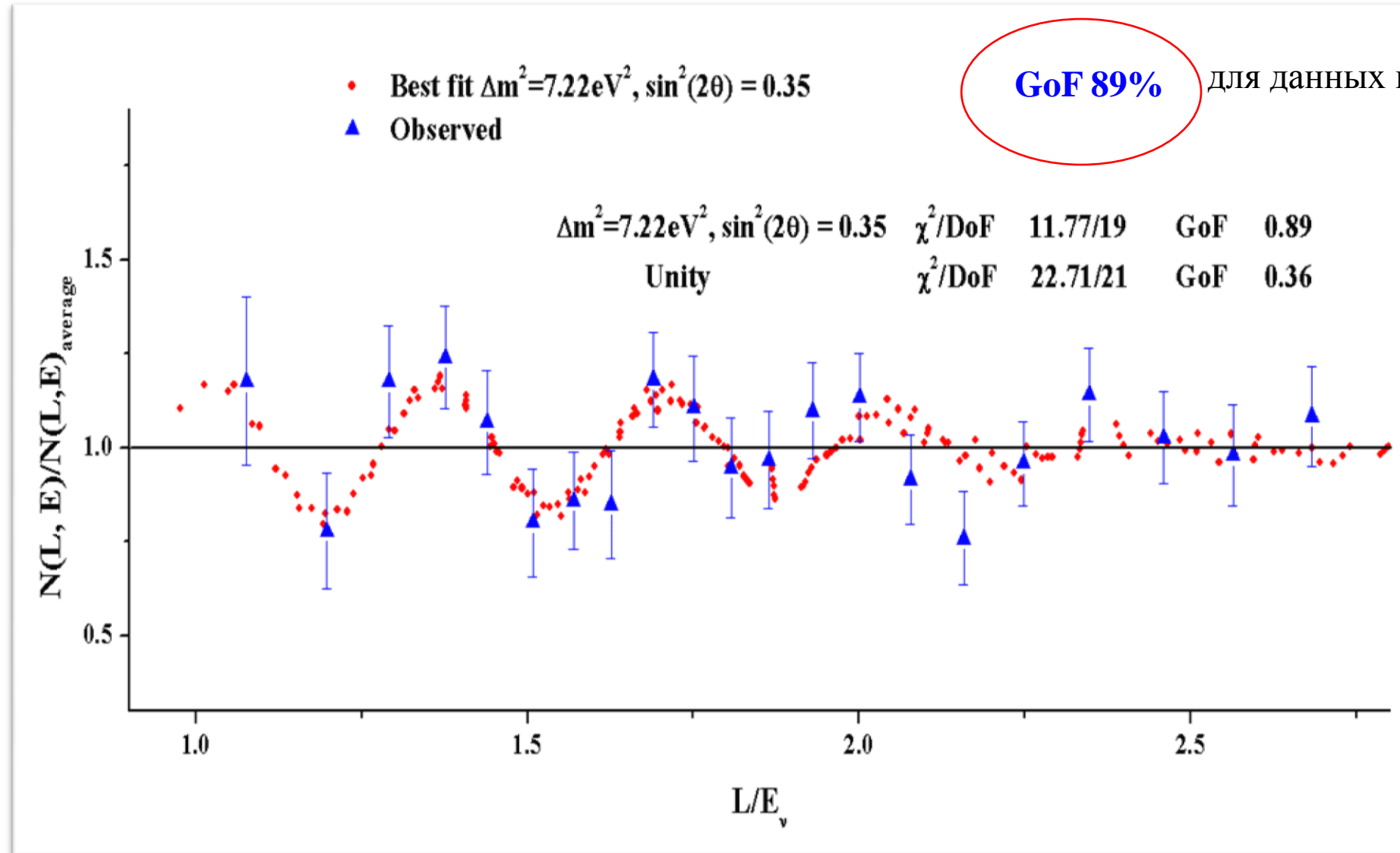


Метод когерентного сложения результатов измерений для прямого наблюдения антинейтринных осцилляций (интервал 0.25 метра, 24 позиции по расстоянию 0.5 MeV по энергии)



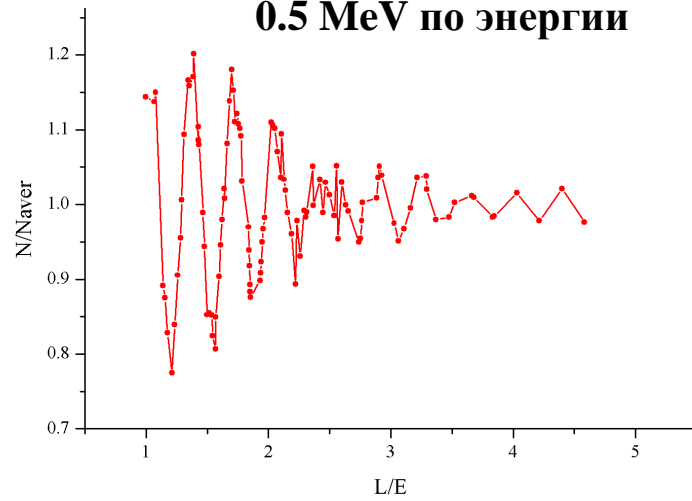
Наблюдение эффекта осцилляций

0.25 метра, 24 позиций,
0.5 MeV по энергии

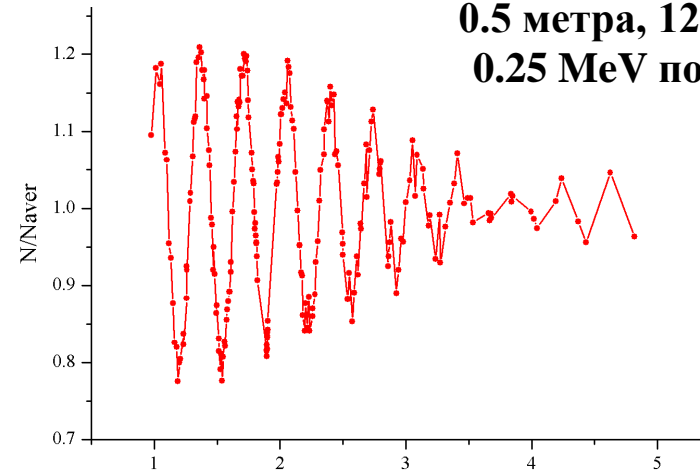


Ожидаемый эффект при различном разрешением по расстоянию и по энергии (правая часть уравнения 2)

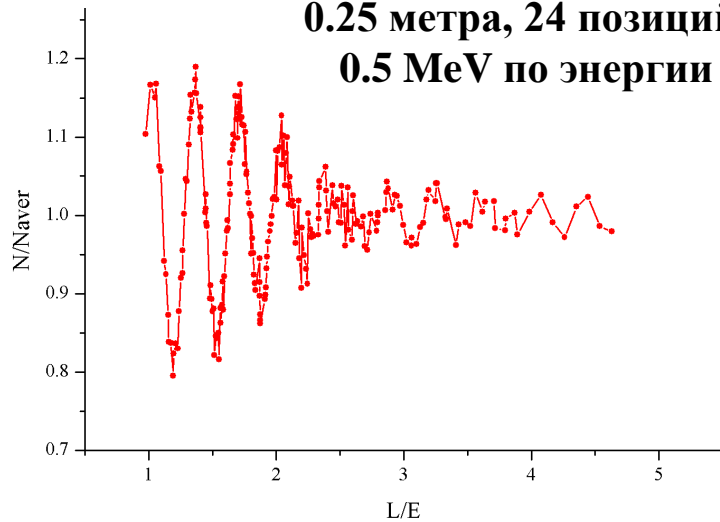
**0.5 метра, 12 позиций,
0.5 MeV по энергии**



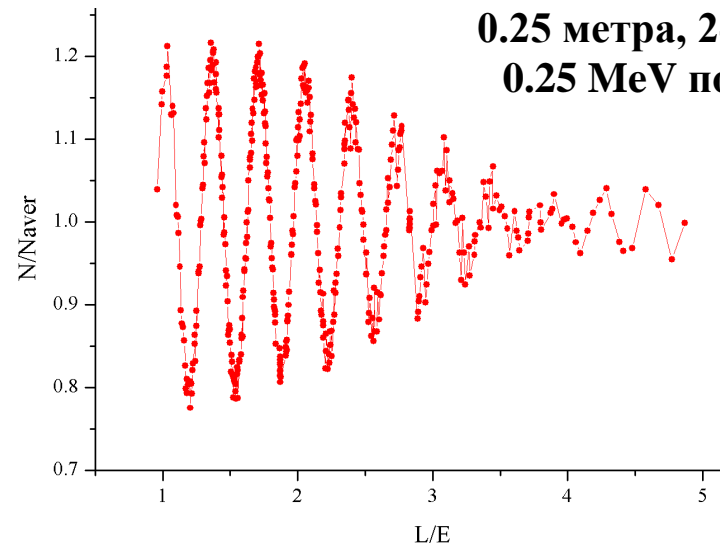
**0.5 метра, 12 позиций,
0.25 MeV по энергии**



**0.25 метра, 24 позиций,
0.5 MeV по энергии**



**0.25 метра, 24 позиций,
0.25 MeV по энергии**

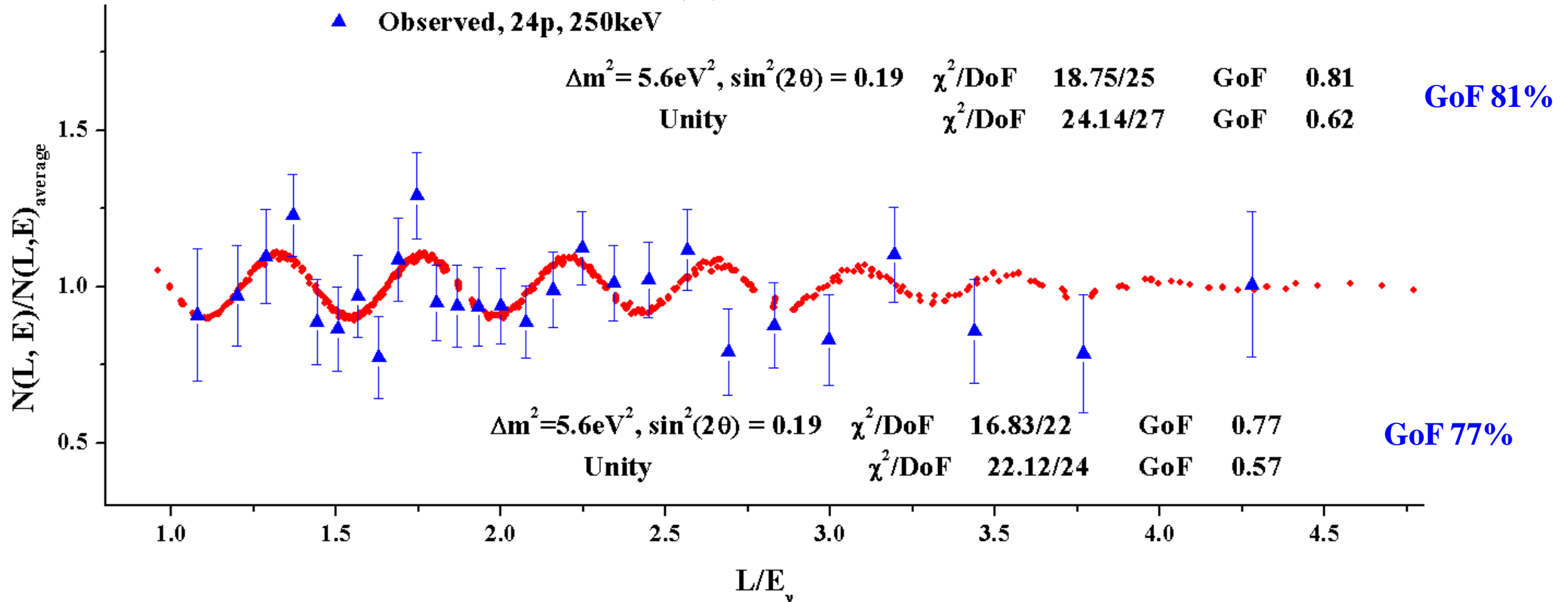


**0.25 метра, 24 позиций,
0.25 MeV по энергии**

$$\Delta m_{14}^2 \sim 5.6 \text{eV}^2$$

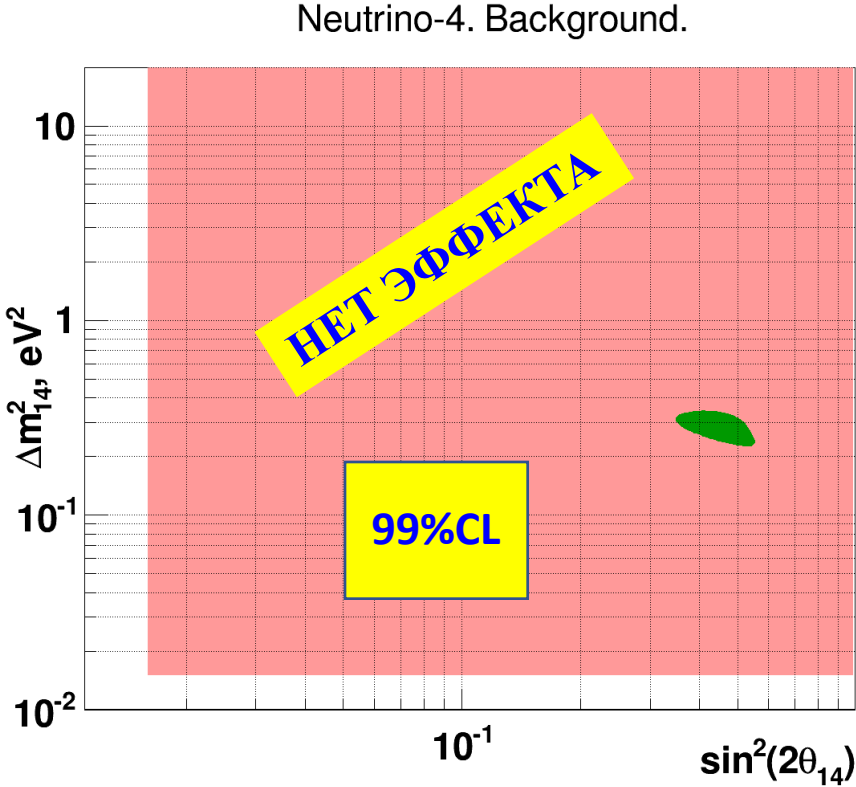
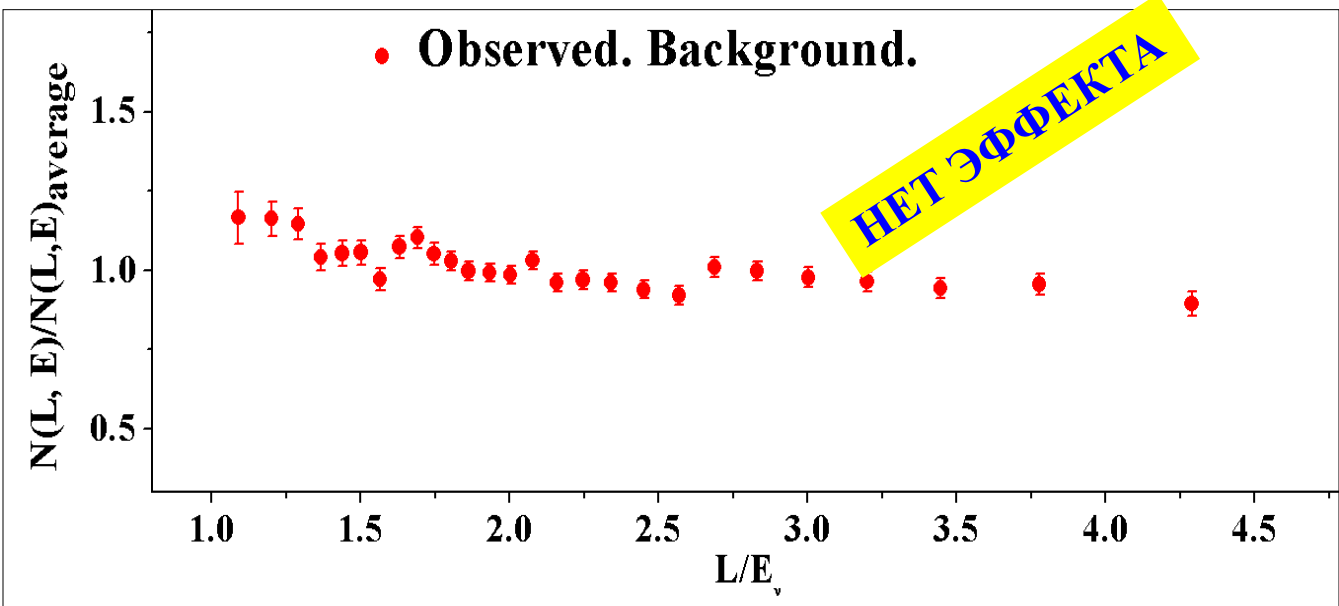
$$\sin^2 2\theta_{14} \sim 0.19$$

- Best fit $\Delta m^2 = 5.6 \text{eV}^2$, $\sin^2(2\theta) = 0.19$
- ▲ Observed, 24p, 250keV



Проверка на систематические эффекты

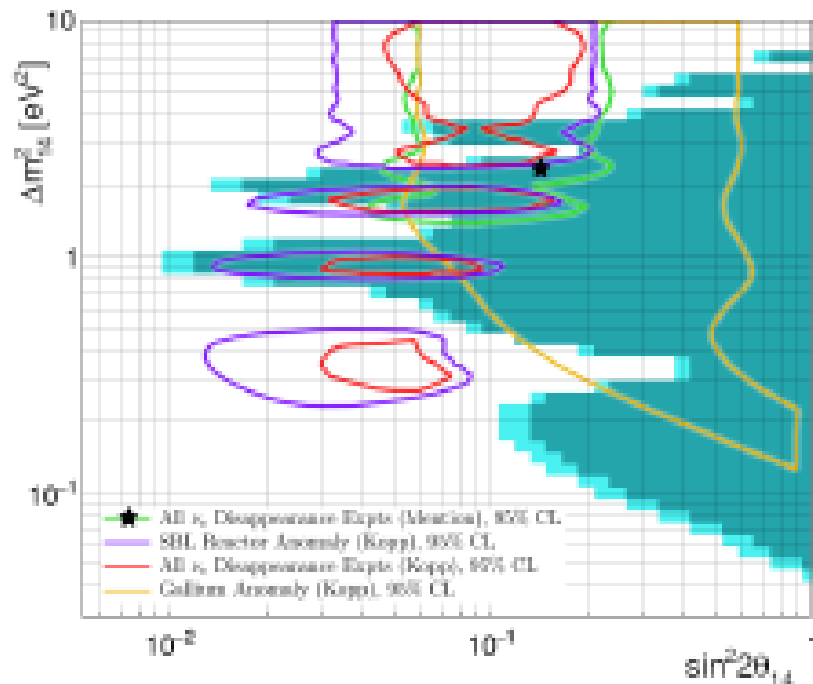
Для проверки на систематические эффекты надо выключить поток антинейтрино (реактор) и провести такую же обработку измерений, используя быстрые нейтроны космического фона.



Фон коррелированных событий (быстрые нейтроны космического фона) немного уменьшается с расстоянием.

NET ЭФФЕКТА ОСЦИЛЛЯЦИЙ – NET АППАРАТУРНЫХ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

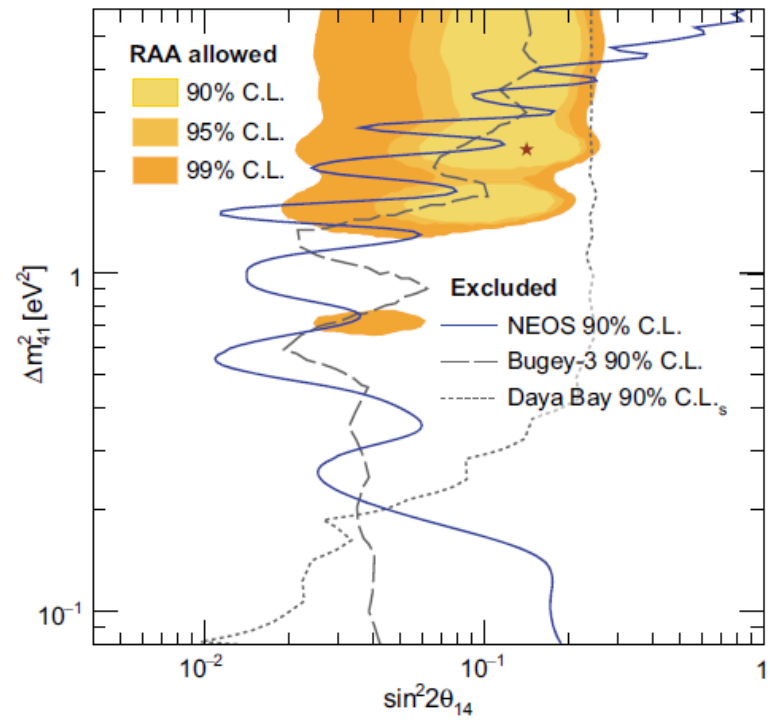
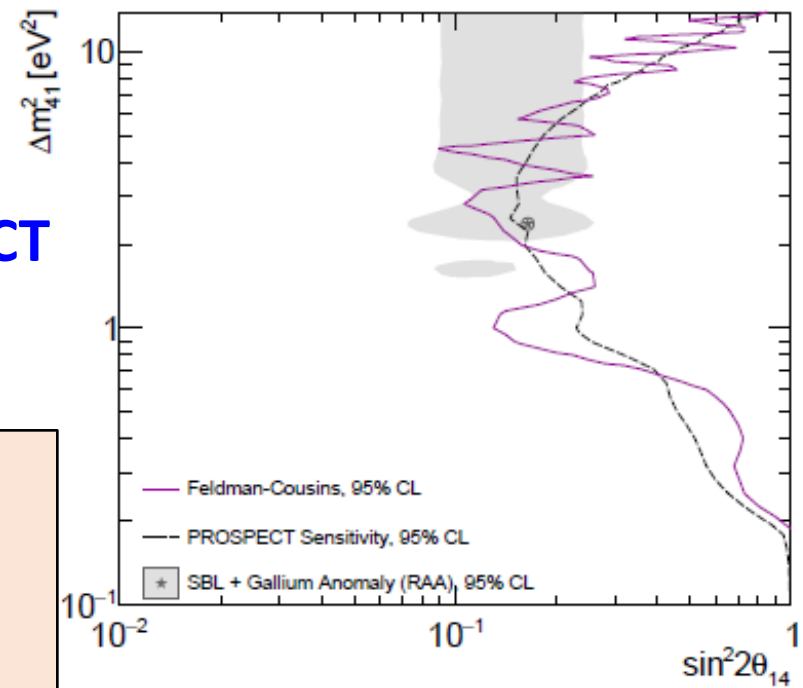
Сравнение результатов эксперимента Нейтрино-4 с результатами других экспериментов



DANSS
90%

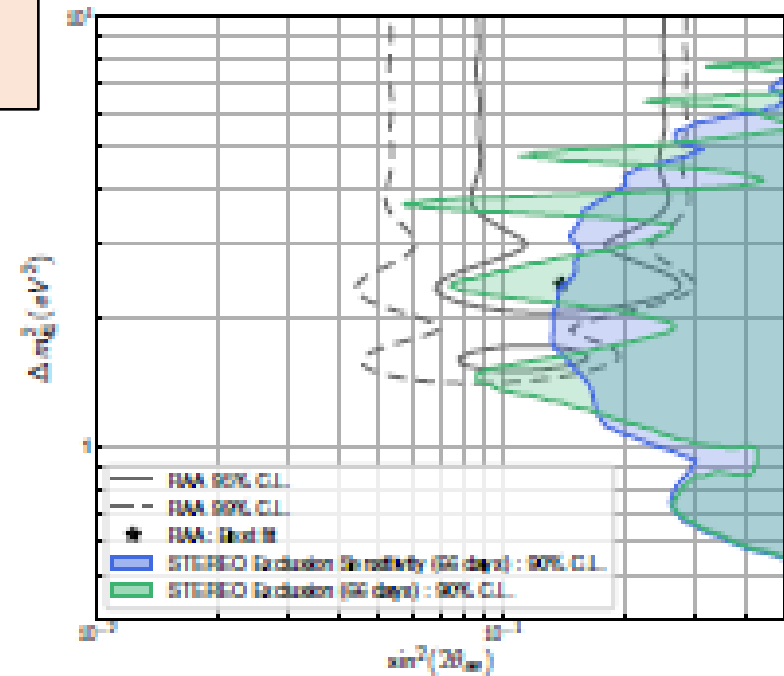
PROSPECT
95%

иллюстрация чувствительности экспериментов: NEOS, DANSS, STEREO и PROSPECT

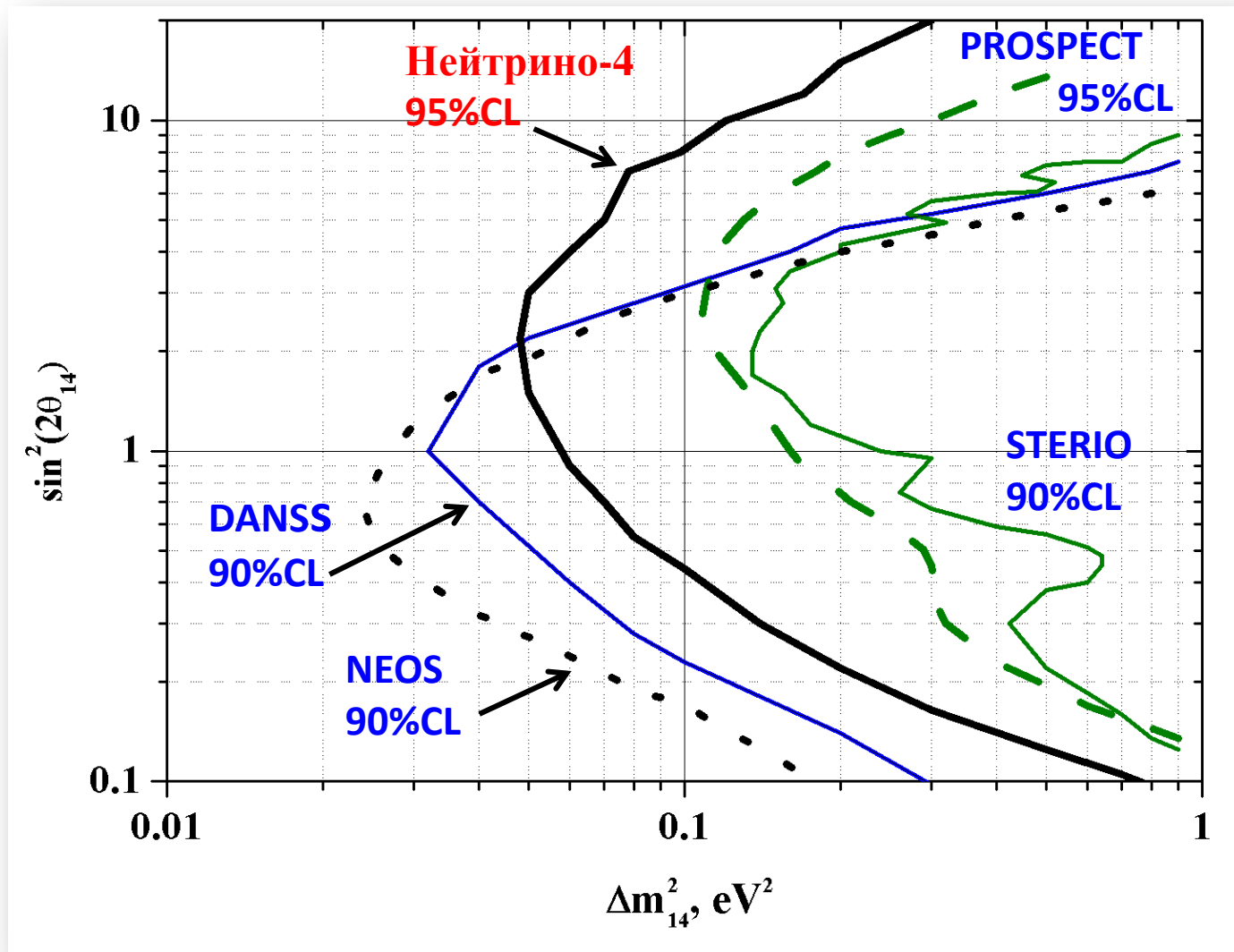


NEOS
90%

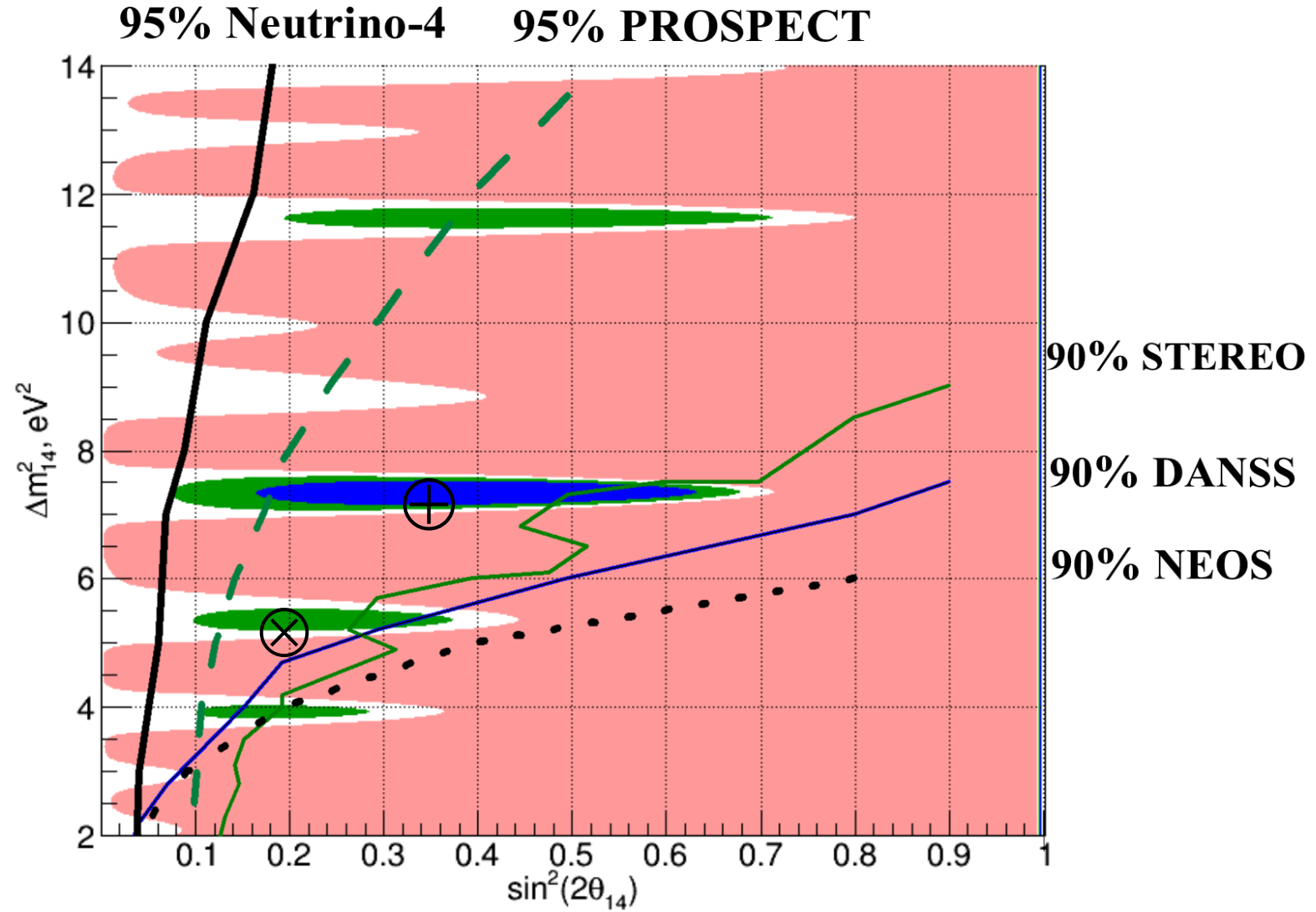
STEREO
90%



Сравнение чувствительности эксперимента Нейтрино-4 с чувствительностью других экспериментов

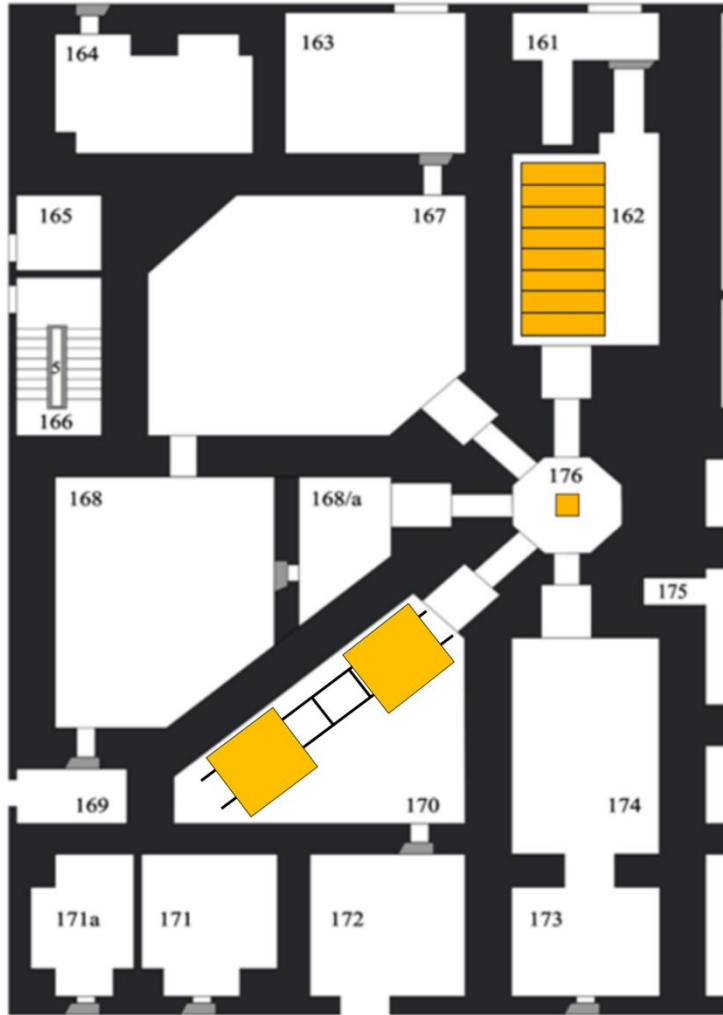


Сравнение чувствительности эксперимента Нейтрино-4 с чувствительностью других экспериментов (линейный масштаб, область эффекта)



Перспективы эксперимента Нейтрино-4

Future plans: Experiment Neutrino-6



Neutrino laboratory on the SM-3 reactor in room №170

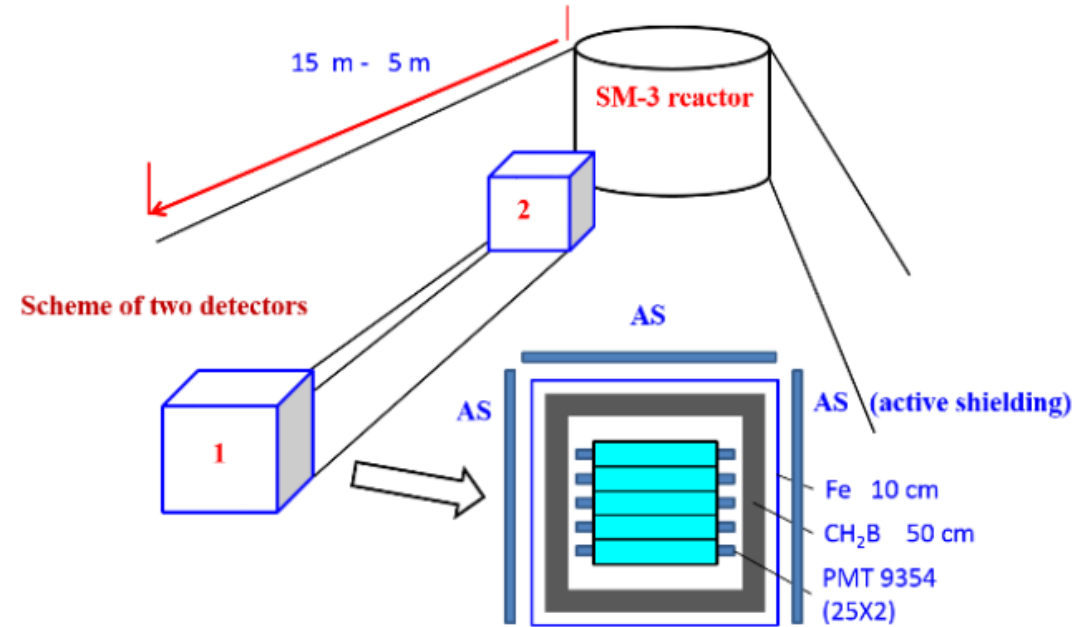
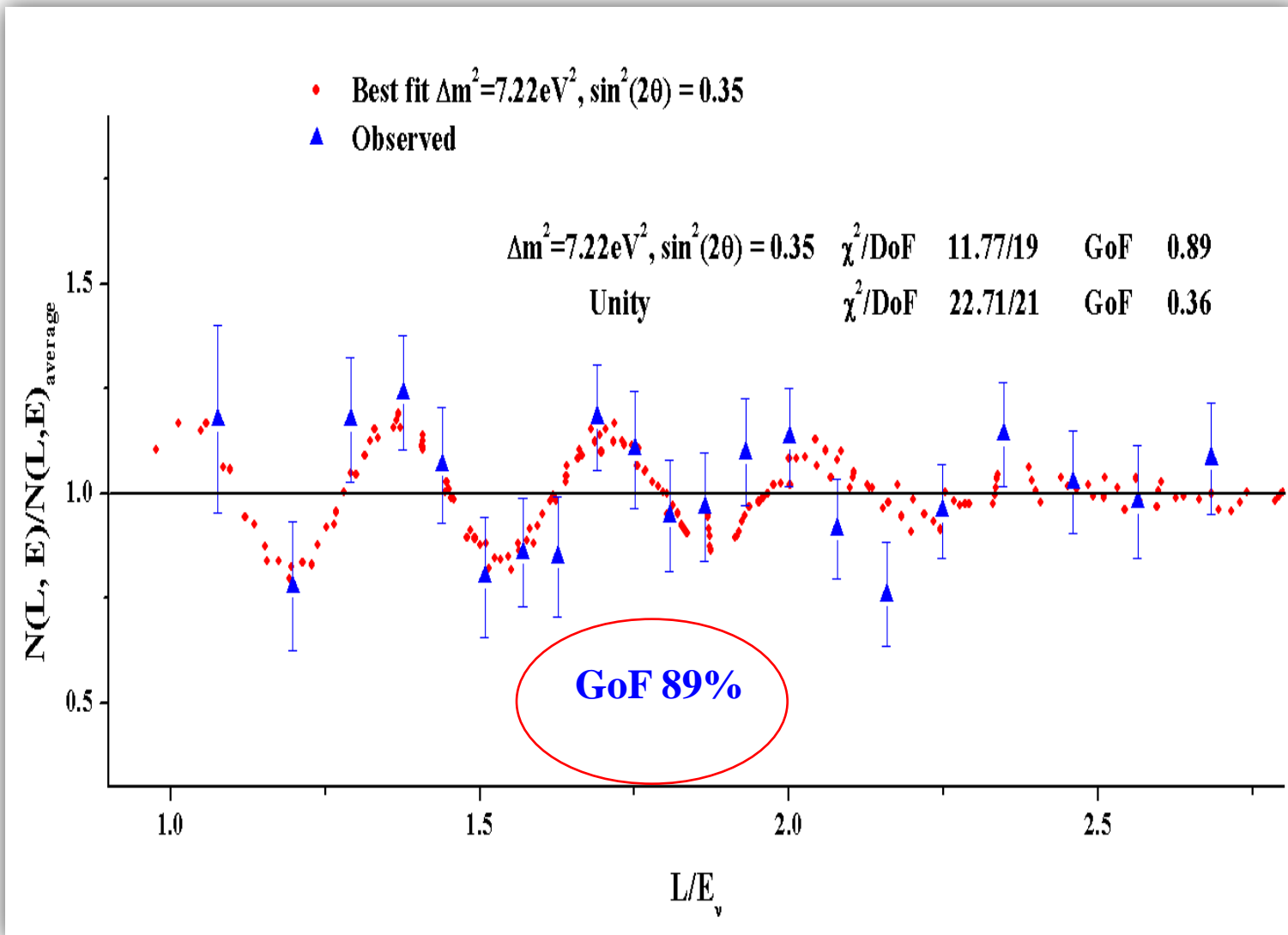


FIG. 22. Scheme of a new experiment on search for neutrino oscillations in room No. 170 of the SM-3 reactor.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ



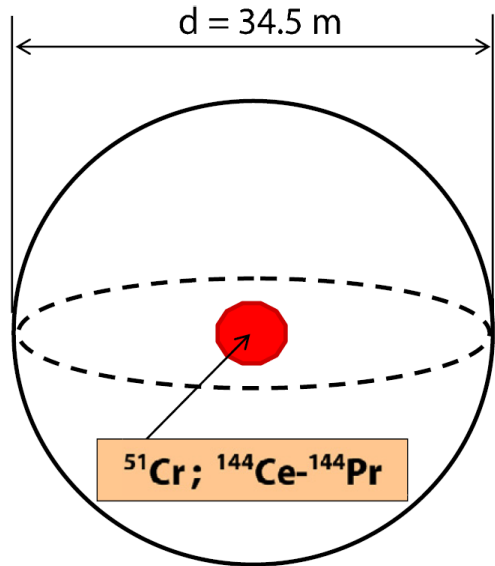
В целом складывается впечатление, что подтверждается эффект, предсказанный в галлиевом и реакторном экспериментах, но при достаточно больших значениях

$$\Delta m_{14}^2 \approx 6 \div 7 \text{eV}^2$$
$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.2 \div 0.3$$

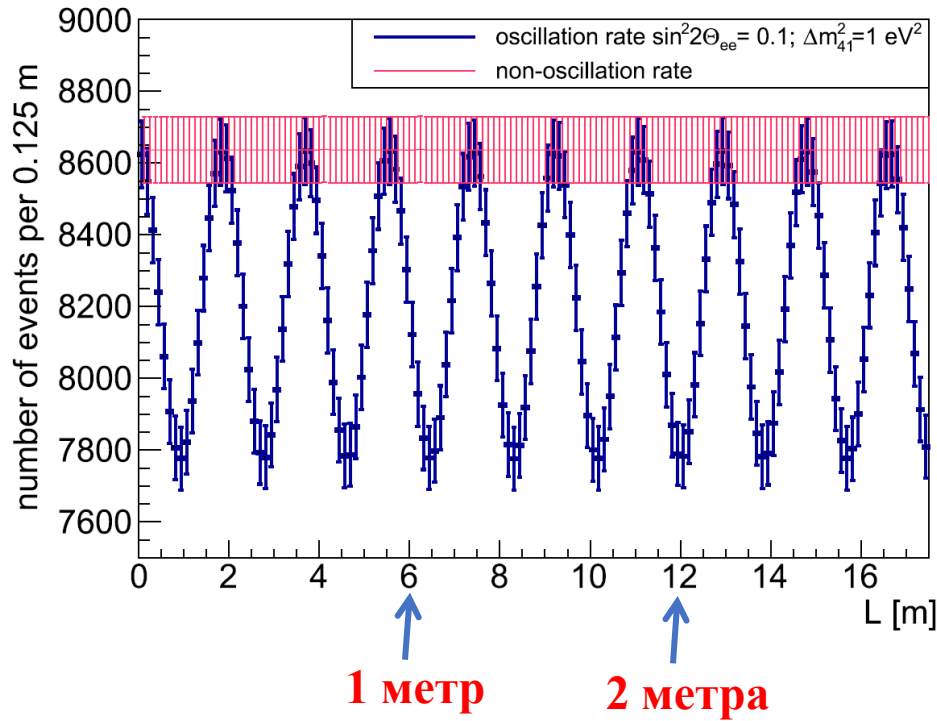
Однако, уровень достоверности недостаточен, требуется увеличение точности эксперимента и дополнительный анализ возможных систематических ошибок эксперимента.

Спасибо за внимание

**Анализ возможности наблюдения осцилляций с
параметрами $\Delta m_{14}^2 \approx 6 \div 7 \text{эВ}^2$ $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.2 \div 0.3$
на нейтринных источниках**



51Cr source



Проблема будет в том, что осцилляции будут в 6 раз чаще, чем на этих картинках

$$\sin^2(2\theta_{14}) = 0.1, \Delta m_{14}^2 = 1 \text{ eV}^2$$

144Ce–144Pr source

