

Эксперимент «НЕЙТРИНО-4» на реакторе СМ-3

**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, В. П. Мартемьянов²,
В. Г. Тарасенков², В. И. Алёшин², А. Л. Петелин³, А. Л. Ижутов³,
А. А. Тузов³, С. А. Сазонтов³, Д. К. Рязанов⁴, М. О. Громов³,
В. В. Афанасьев³, М. Е. Зайцев^{1, 4}, М. Е. Чайковский¹**

*¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова
НИЦ КИ, Гатчина, 188300 Россия*

² НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 123182 Россия

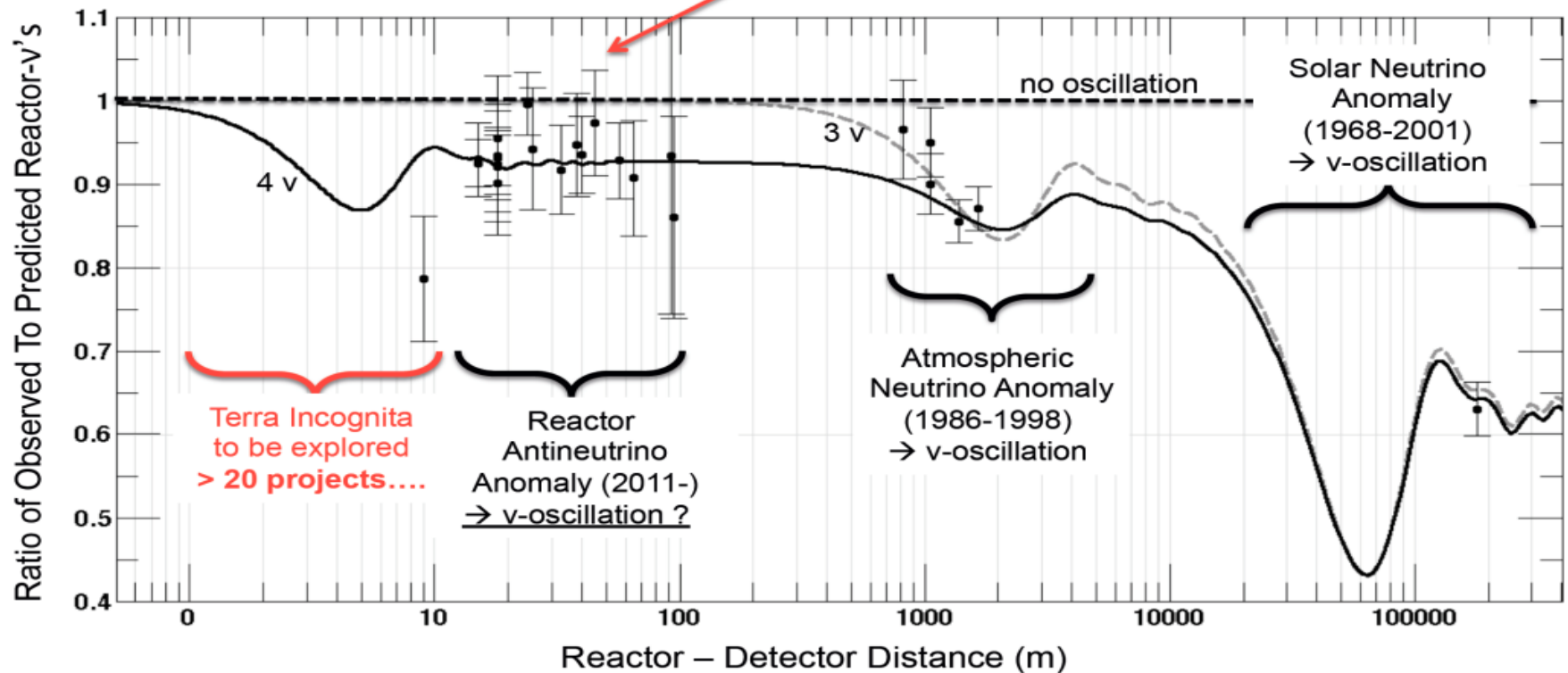
³ ОАО «ГНЦ НИИАР», Димитровград, 433510 Россия

⁴ДИТИ НИЯУ МИФИ Димитровград, 433511 Россия

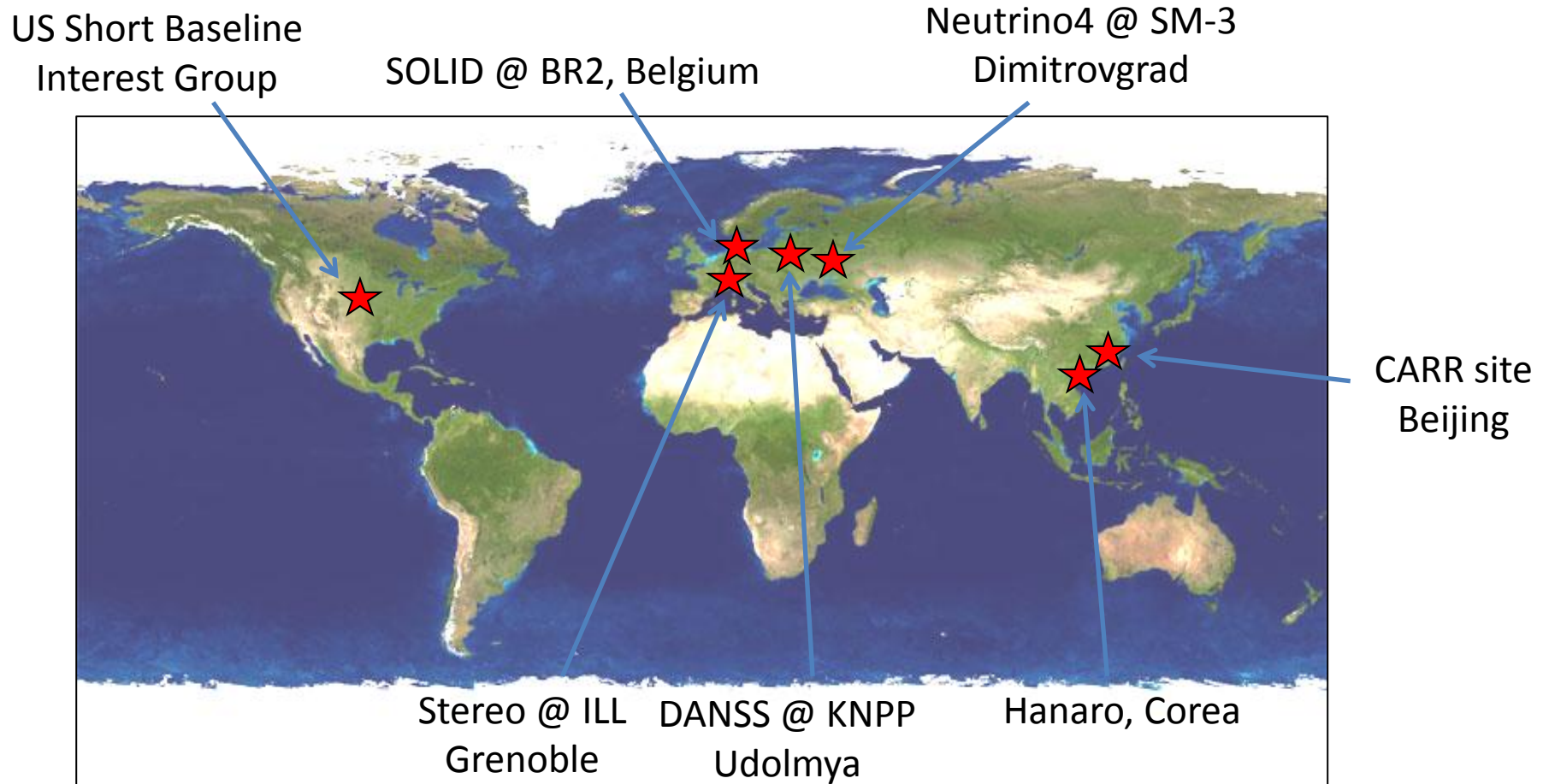
The reactor antineutrino anomaly and sterile neutrino

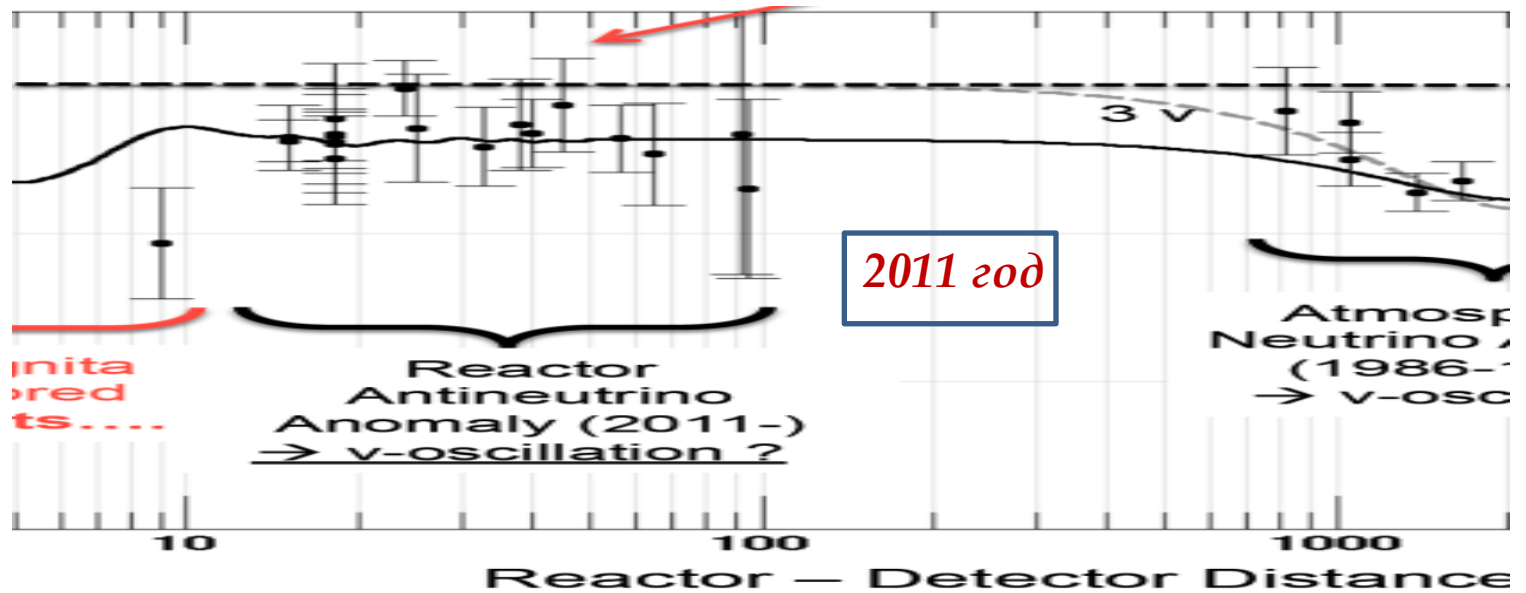
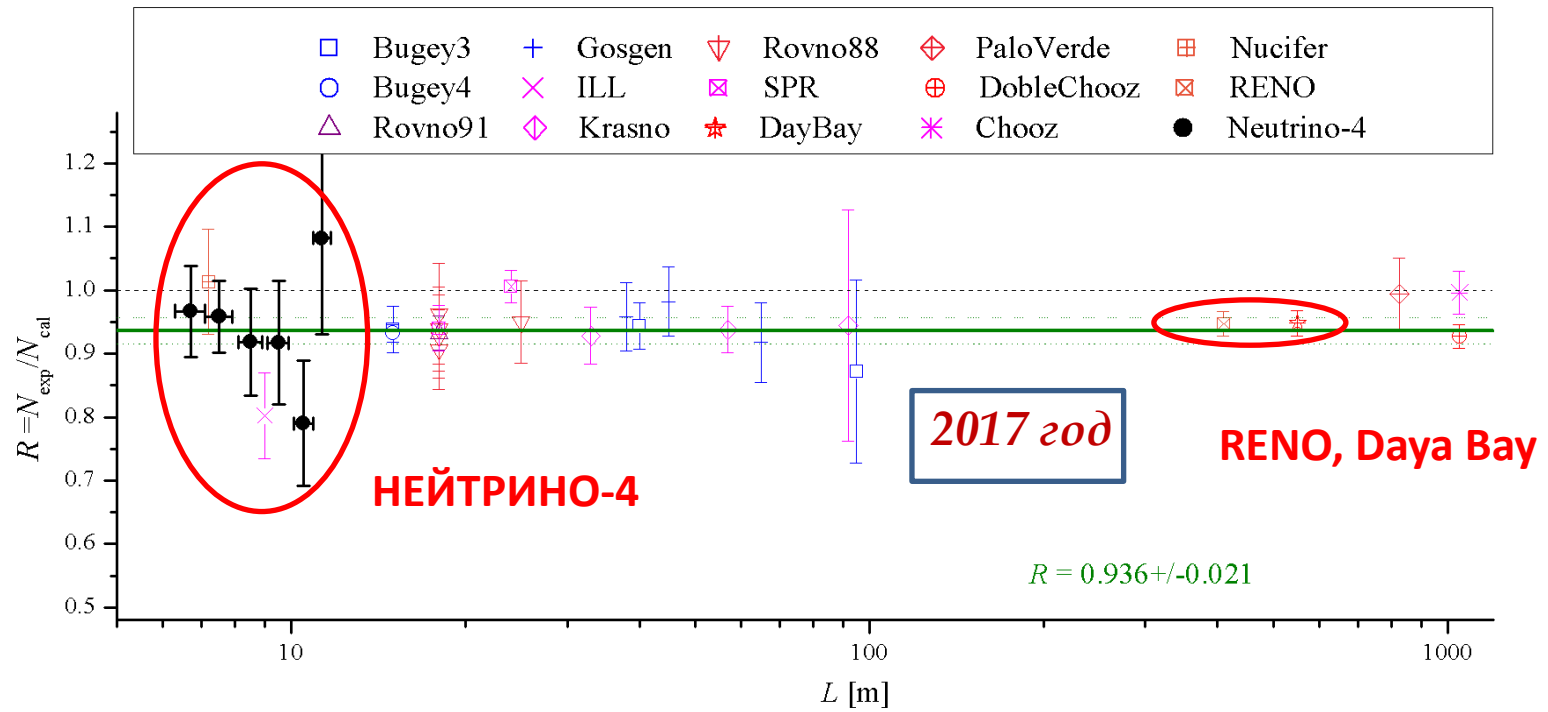
The Reactor Anomaly

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



New Short Baseline Reactor Experiments





Experiment Neutrino-4 at SM-3 reactor

¹ Petersburg Nuclear Physics Institute NRC KI, Gatchina,

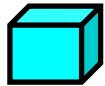
² NRC “Kurchatov institute”, Moscow,

³ JSC “SSC RIAR”, Dimitrovgrad,

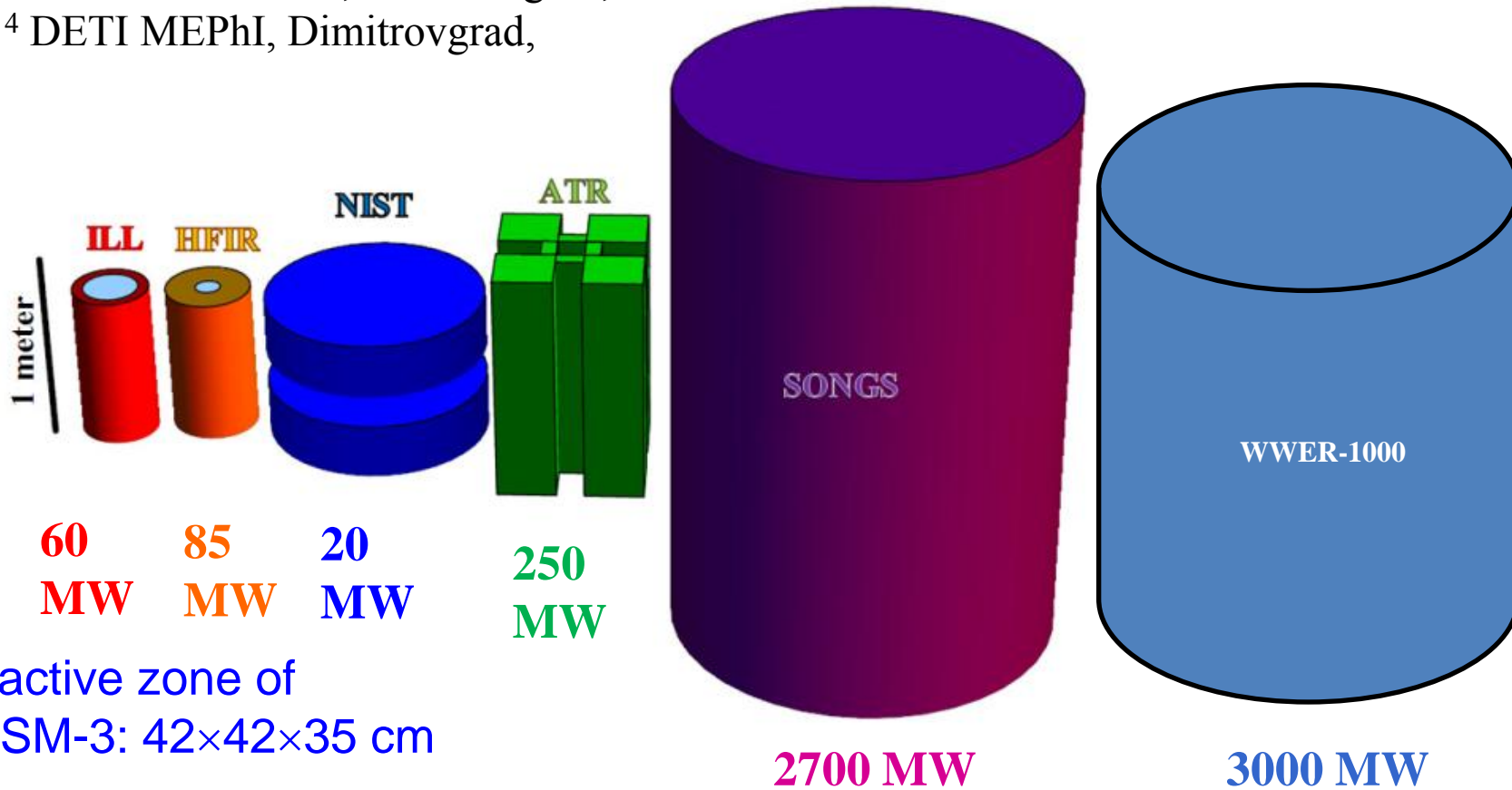
⁴ DETI MEPhI, Dimitrovgrad,



SM-3



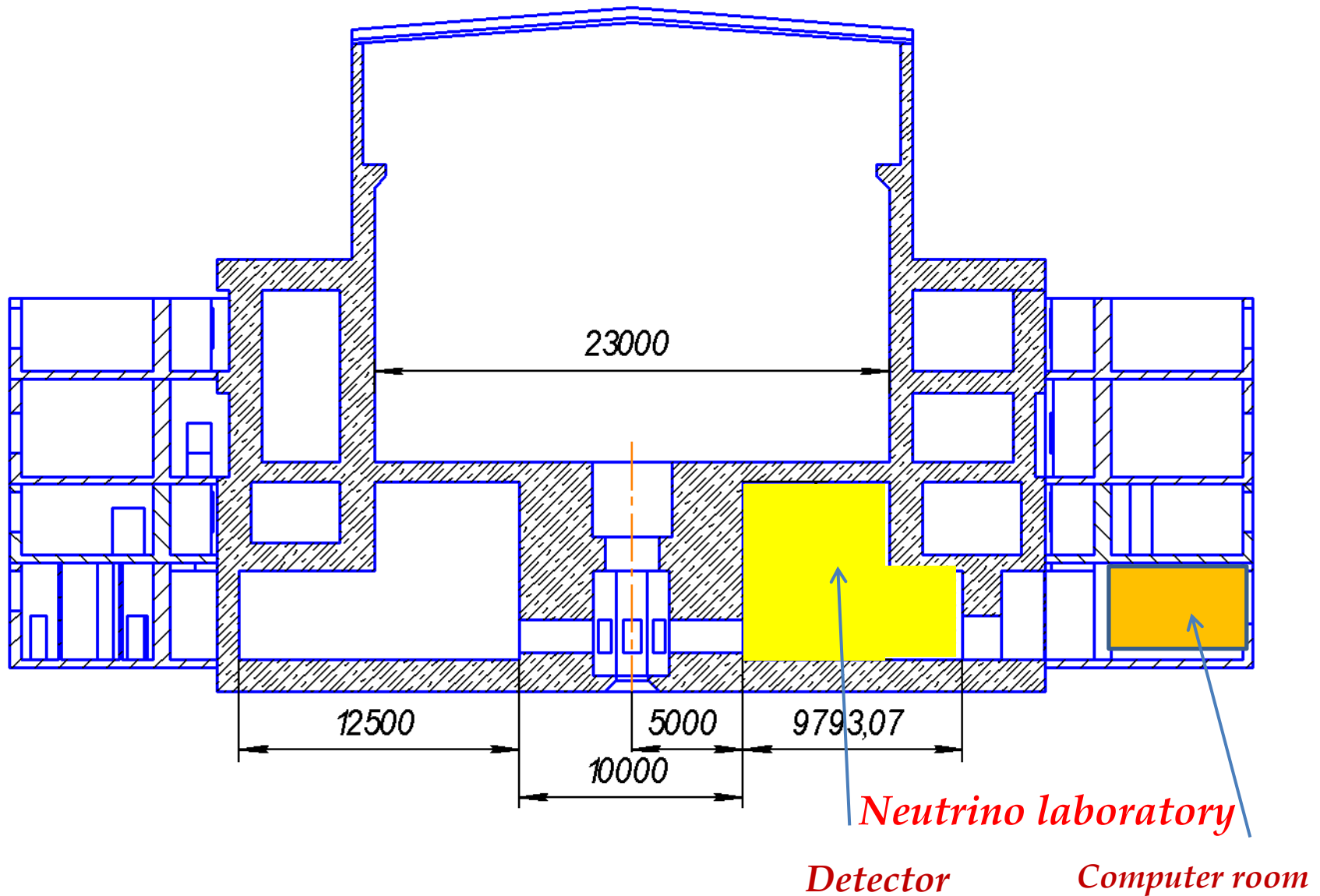
100
MW



Size of active zone of
reactor SM-3: 42×42×35 cm

Core size and power of different reactors

*SM-3 reactor building scheme:
concrete structures distribution*



Neutrino laboratory at SM-3 reactor

Neutrino channel outside and inside



Passive shielding of 60 tons



Range of measurements for the reactor antineutrino flux is 6 – 12 meters from the active reactor core

Нейтринная лаборатория на реакторе СМ-3

Создание лаборатории « Как это было »

Изготовление пассивной защиты детектора (60 тонн) в ЦЭТО ПИЯФ



ЛФН А.Серебров

Транспортировка пассивной защиты в Димитровград, три шаланды по 20 тонн

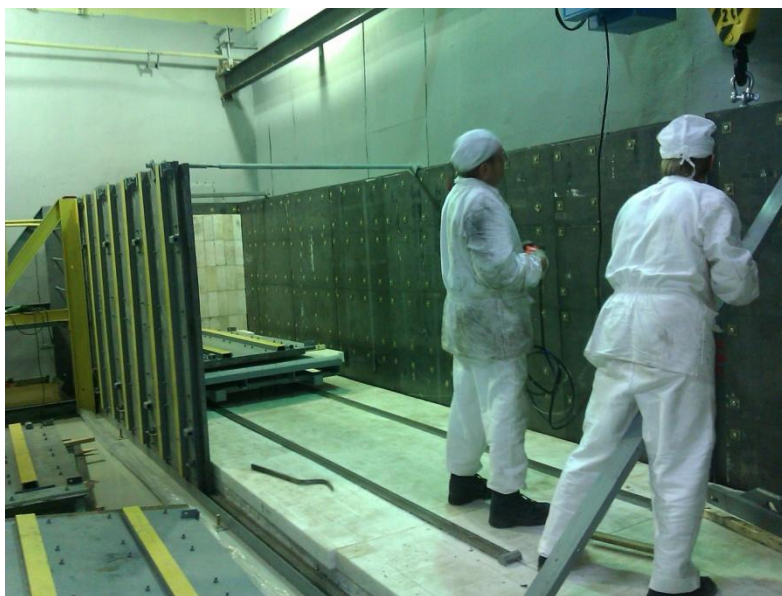


ЛФН А.Серебров

На реакторе СМ-3 подготовлено помещение для нейтринной лаборатории



Начало монтажа пассивной защиты нейтринного детектора



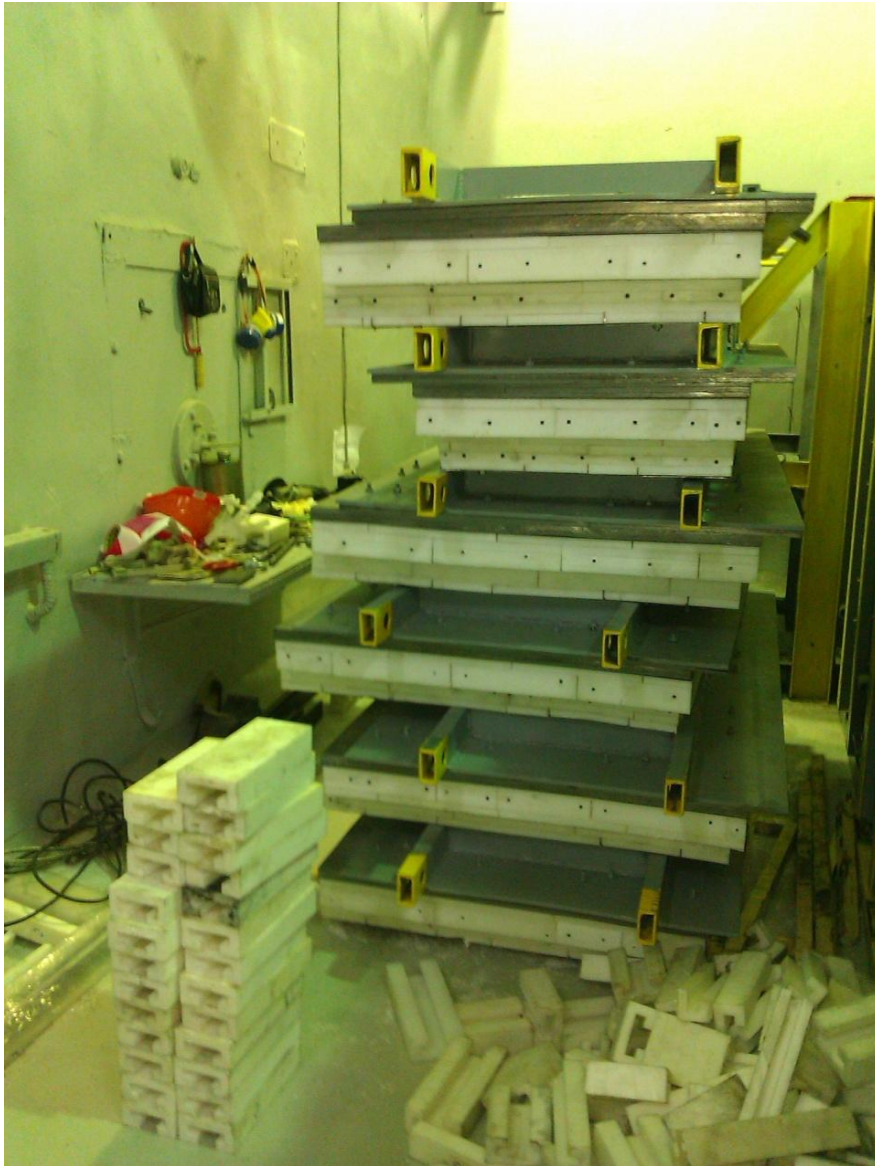
Свинцовые стены установлены



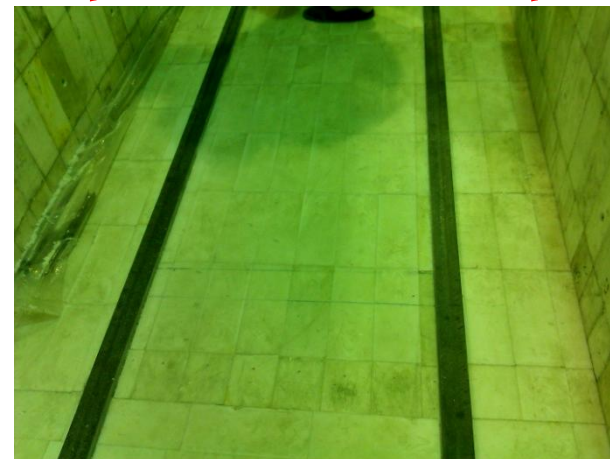
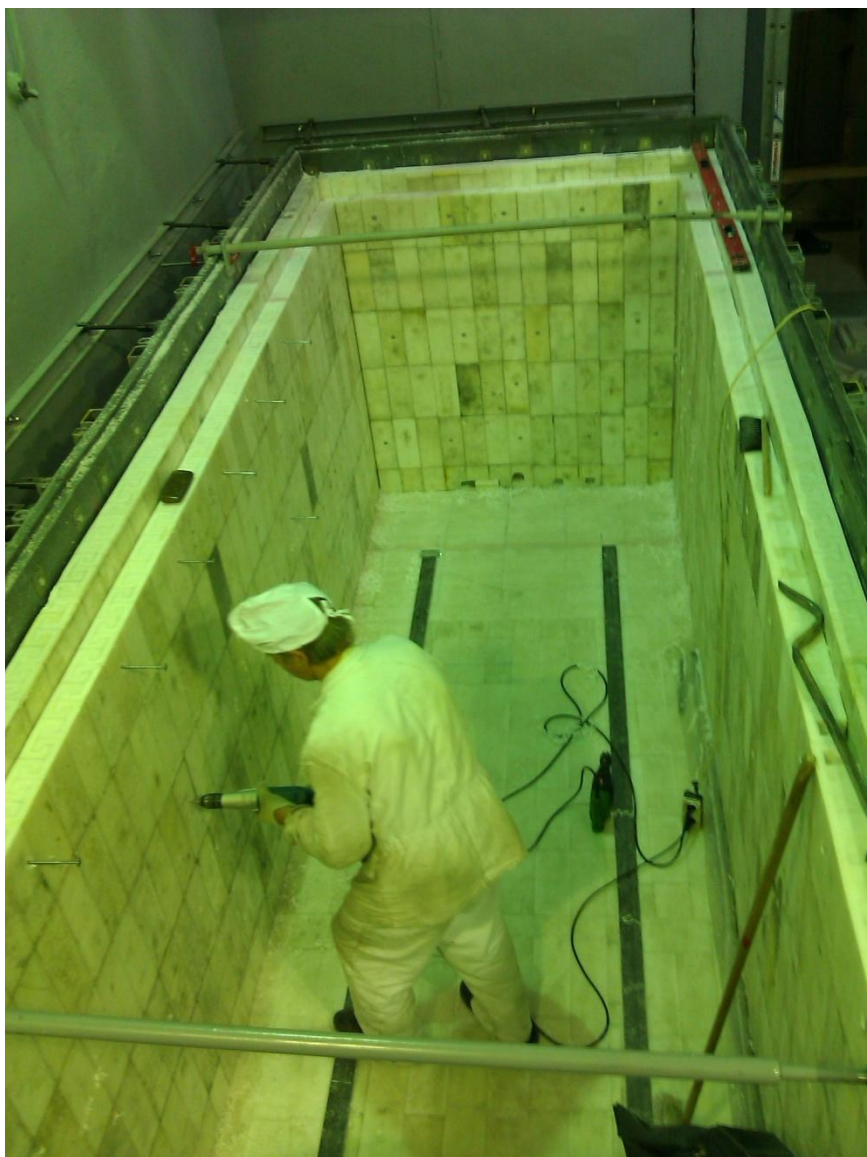
Борированный полиэтилен на стенах и на крыше



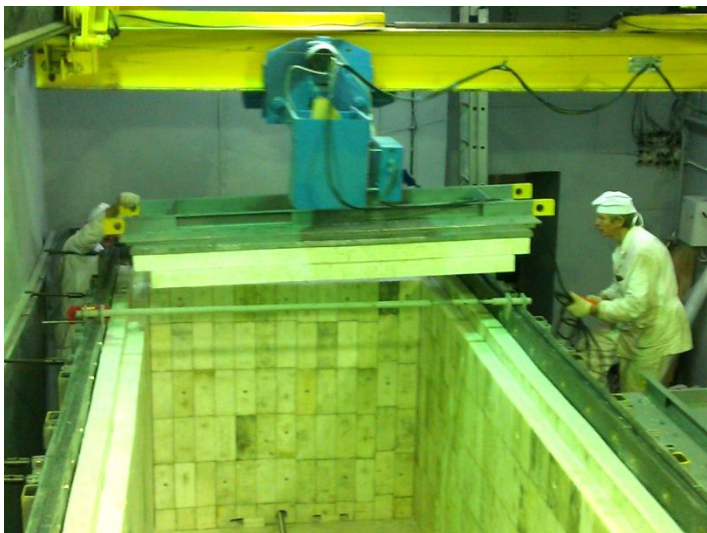
Монтаж пассивной защиты нейтринного детектора



Монтаж пассивной защиты нейтринного детектора



монтаж крыши пассивной защиты нейтринного детектора



Завершение – общий вид



Завершение монтажа пассивной защиты нейтринного детектора

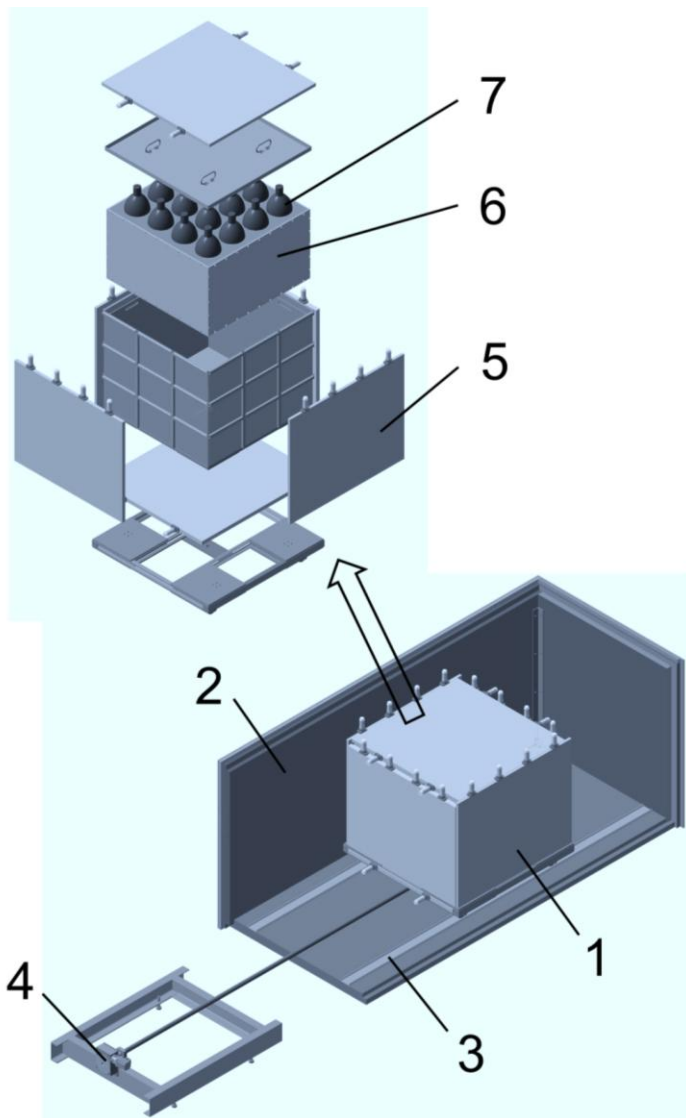


Пьедестал почёта



Монтаж модели нейтринного детектора на реакторе СМ-3

Модель нейтринного детектора 400л

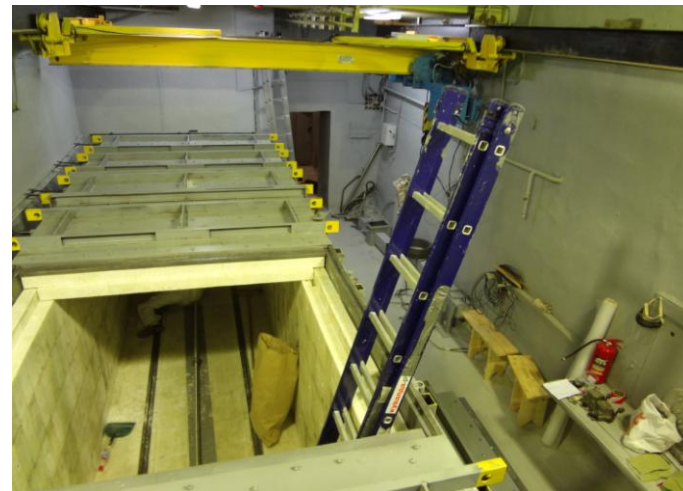


Модель нейтринного детектора,
установленная в пассивную защиту
. 1 – детектор реакторных антинейтрино,
2 – пассивная защита,
3 – рельсы,
4 – двигатель для перемещения
детектора,
5 – сцинтилляционные пластины
внутренней антисовпаденческой защиты
с ФЭУ,
6 – объем со сцинтилляционной
жидкостью (~400 л),
7 – ФЭУ детектора.

Разгрузка оборудования



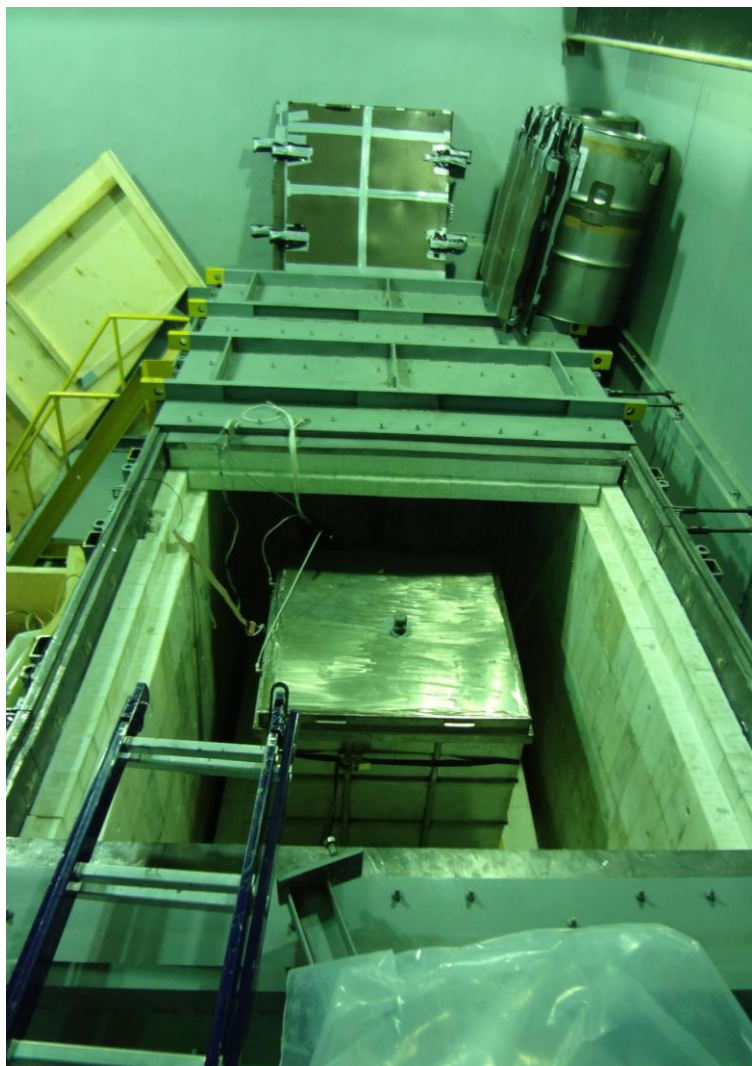
Подготовка места для детектора



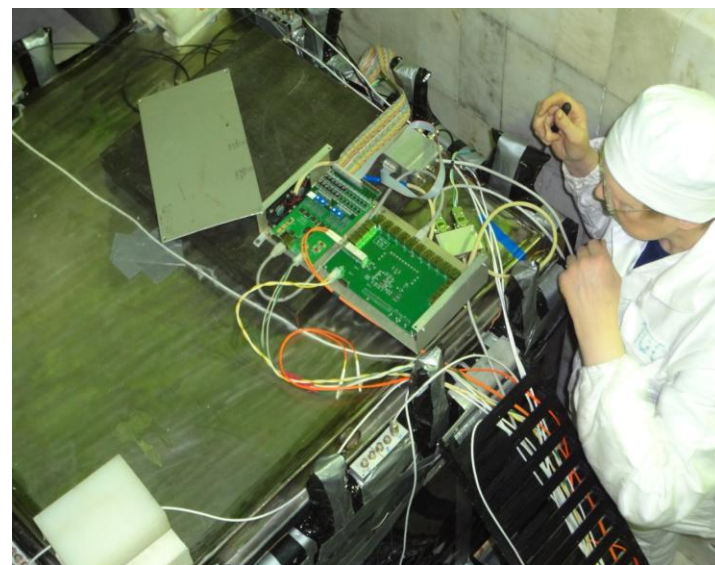
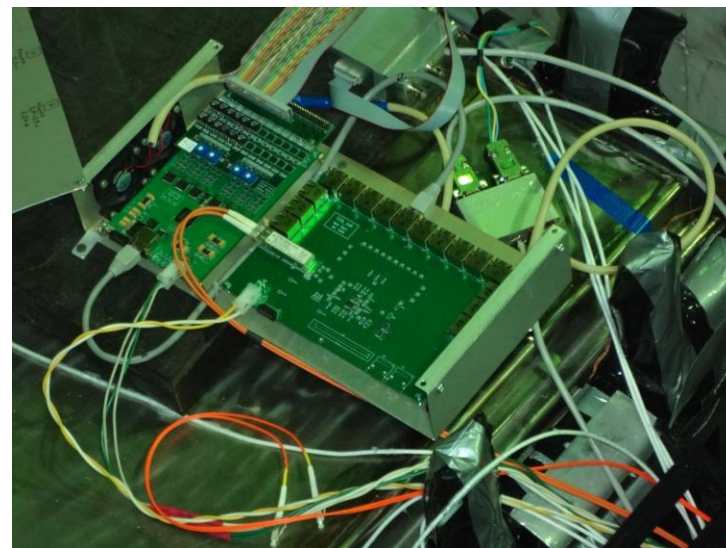
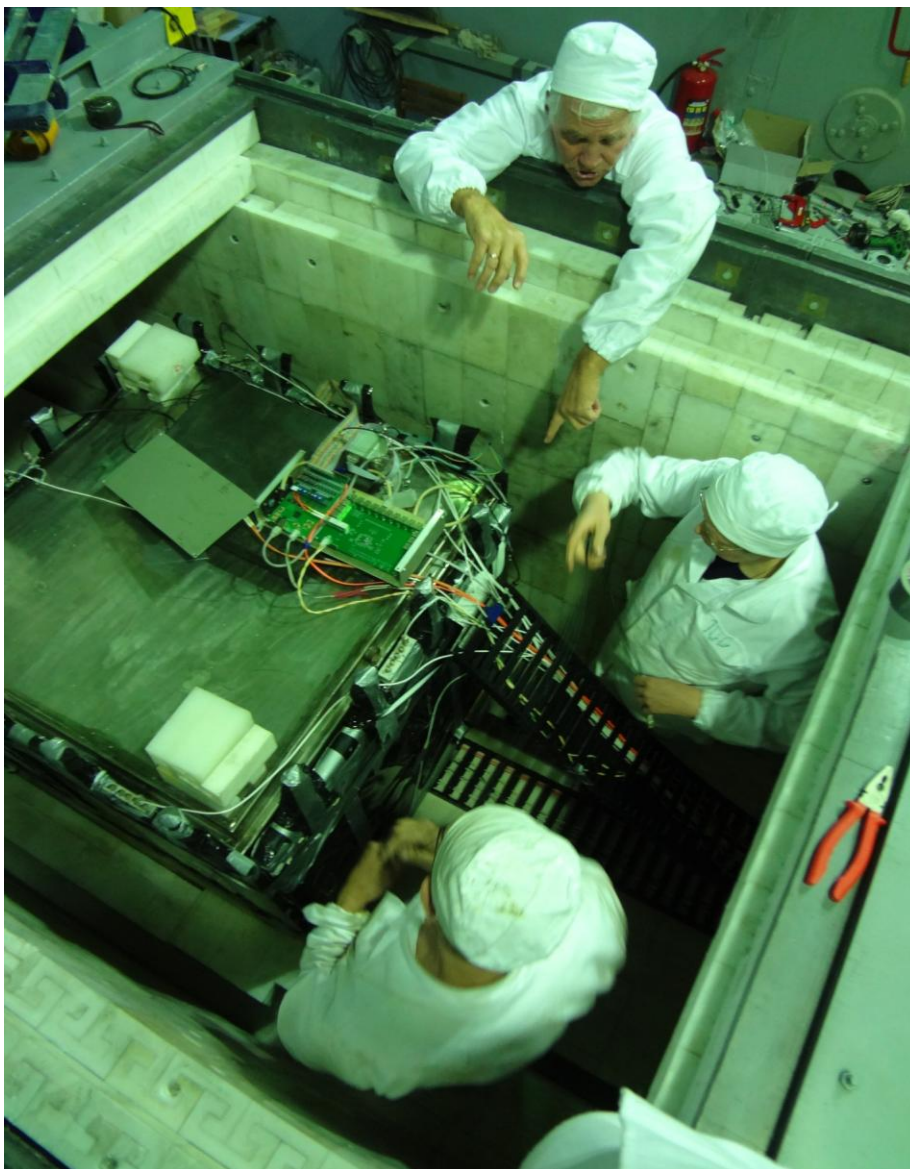
Установка детектора на подвижную платформу



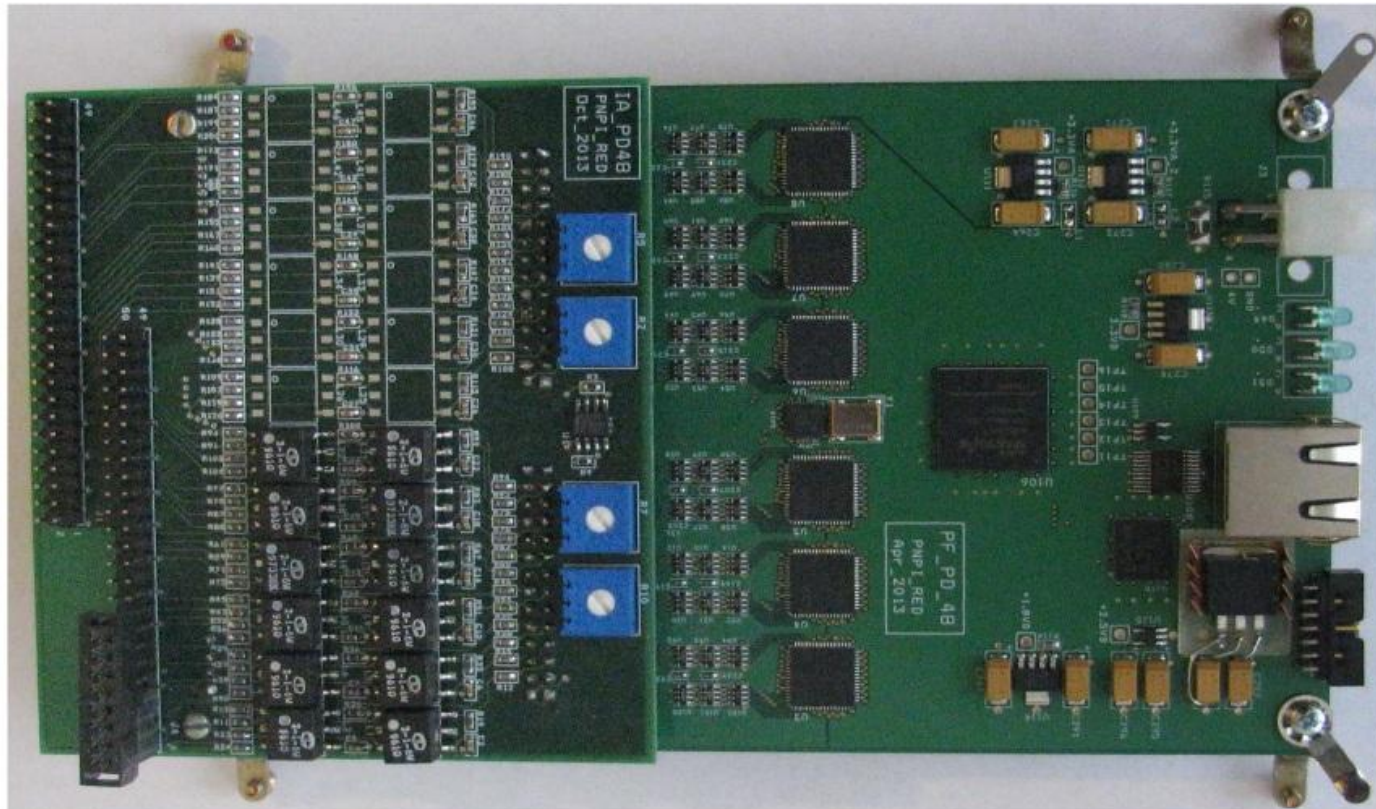
Детектор с пластинами активной защиты



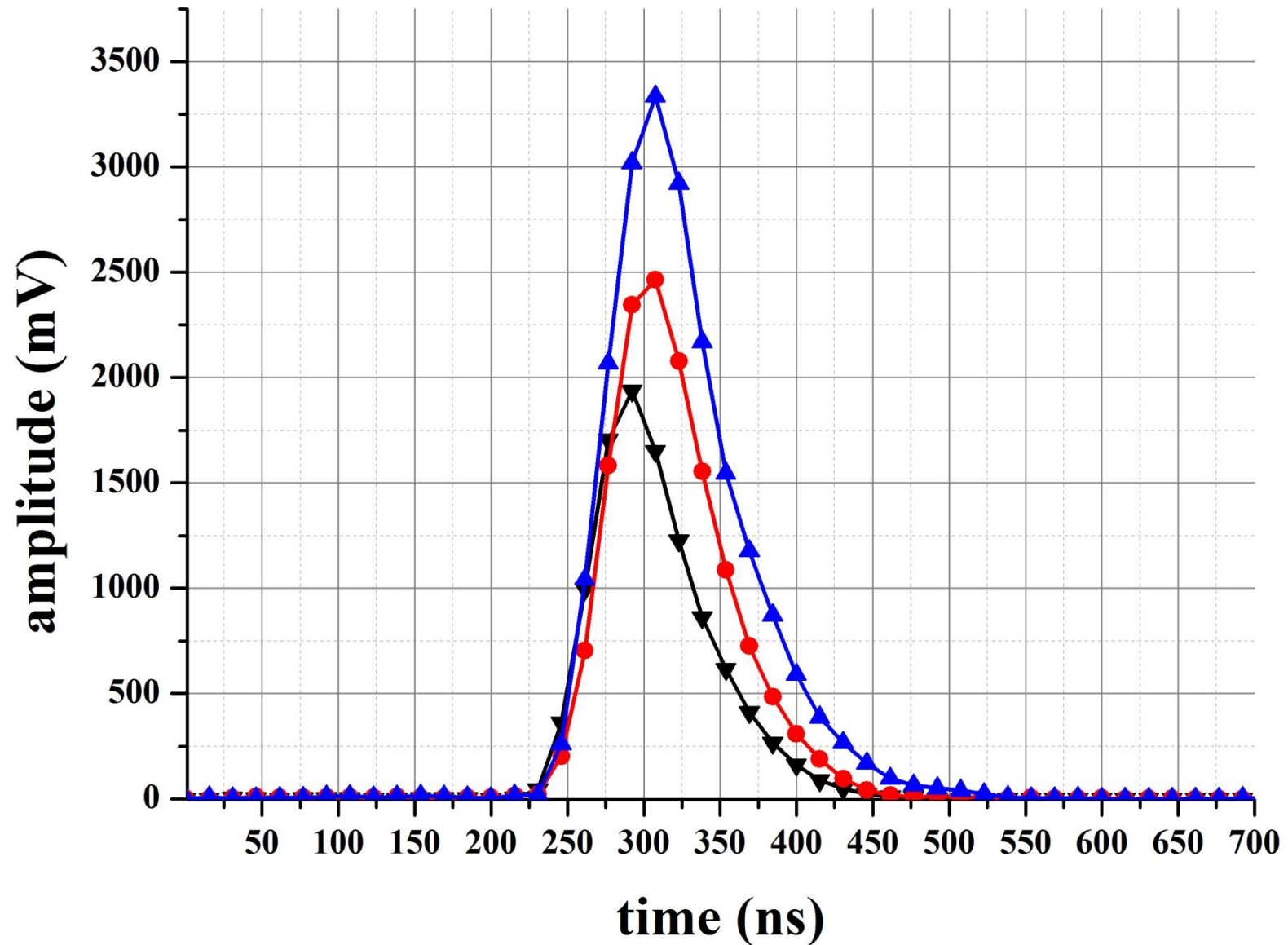
Монтаж многоканальной электроники



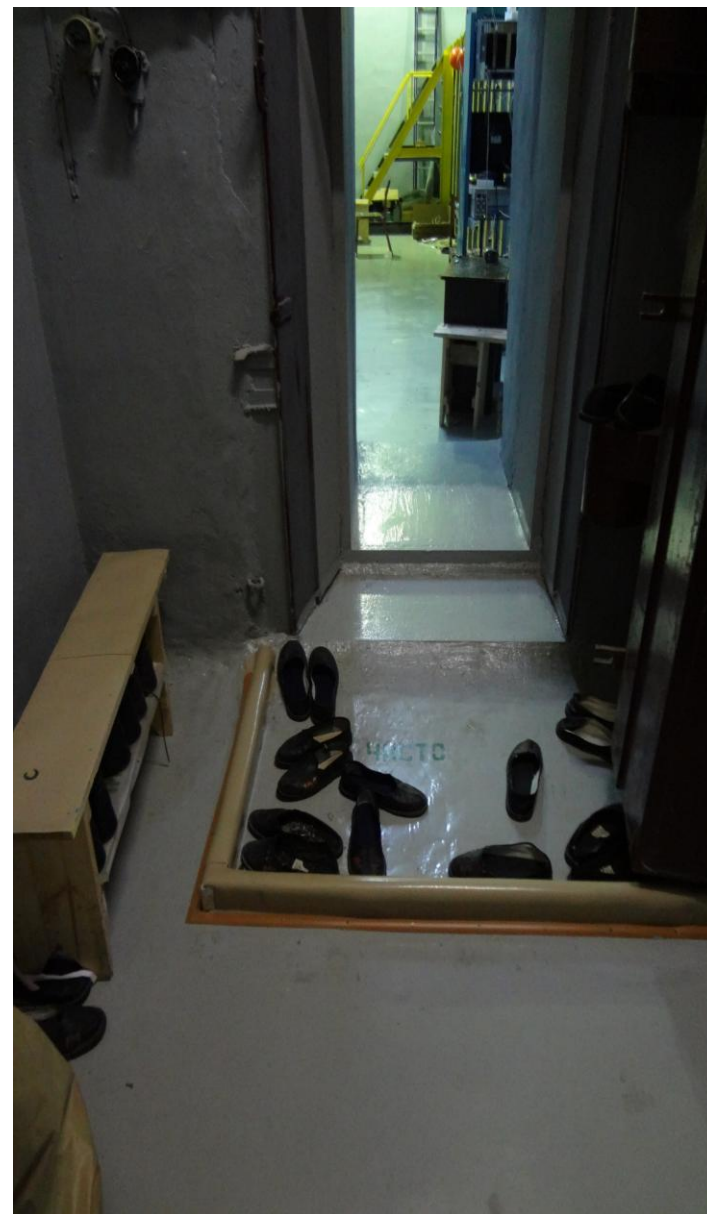
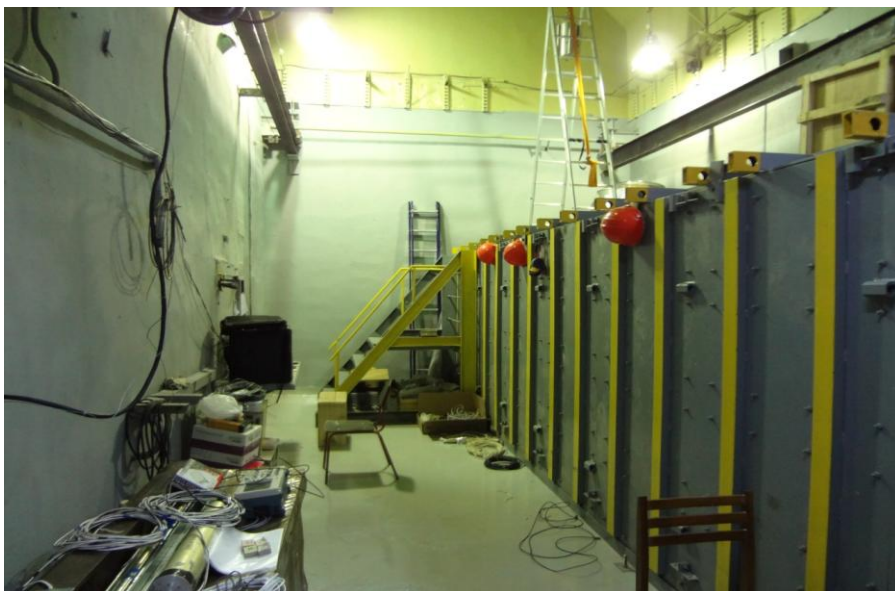
FlashADC:12-Bit Octal-Channel ADS5282.
Sampling Rate:65 MSPS.
Sampling Period:15.38 ns.
Number of Channels:48



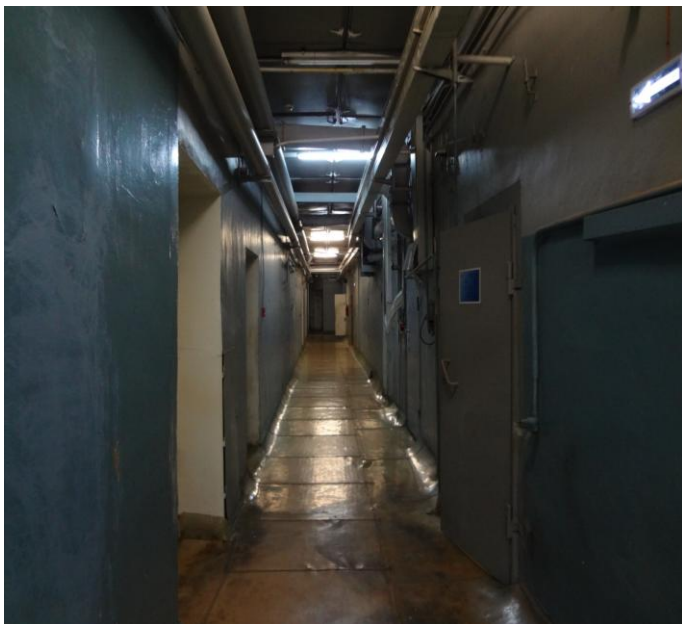
Sampling Rate 65 MSPS, Sampling Period 15.38 ns



Общий вид нейтринной лаборатории



На реакторе СМ-3 создана нейтринная лаборатория

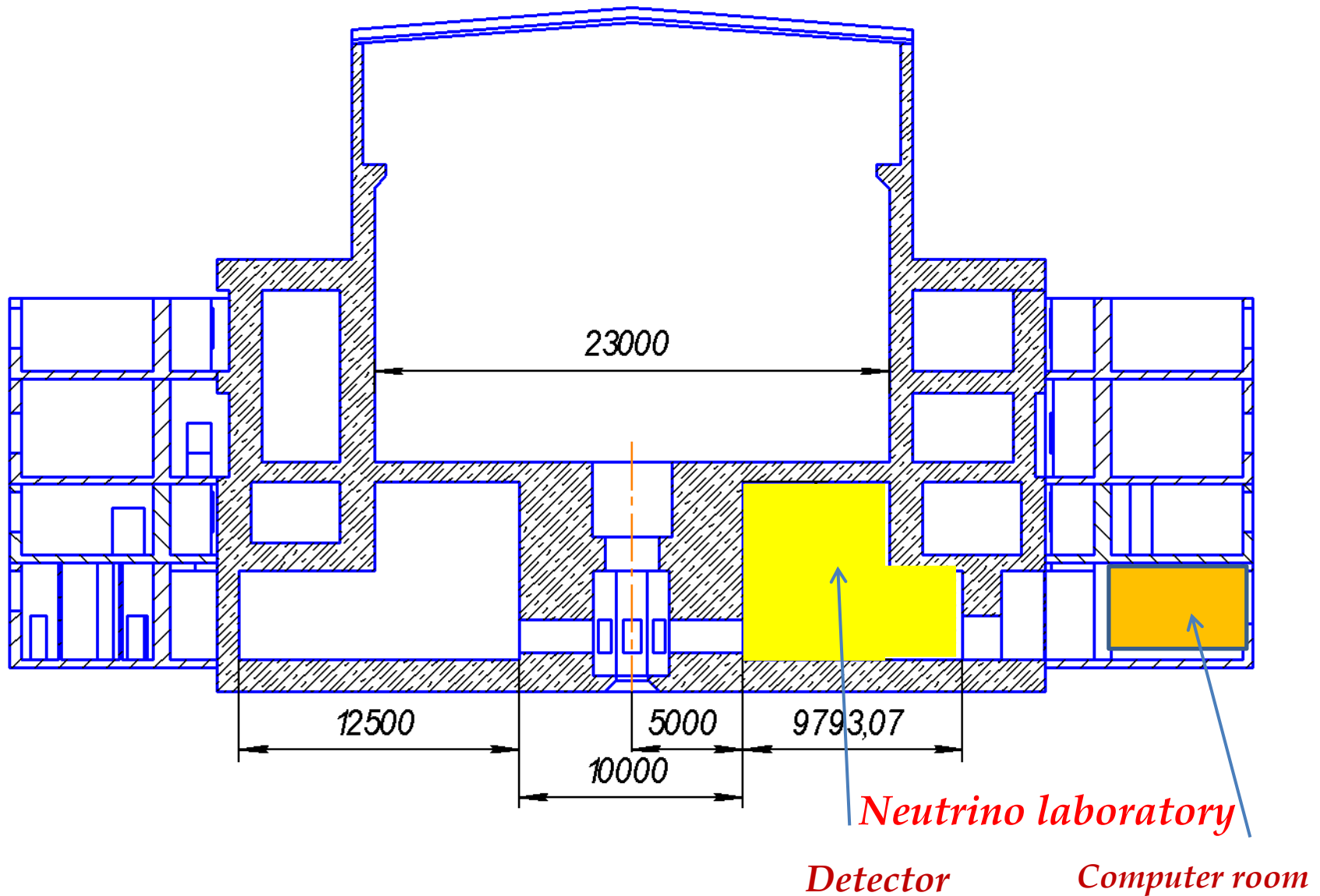


Начинаем первые измерения на модели нейтринного детектора



Исследование фоновых условий

*SM-3 reactor building scheme:
concrete structures distribution*



Проблемы фона

Фон можно разделить на две категории:

1) фон, зависящий от реактора (вкл-выкл), 2) фон, независящий от реактора

Каждый из них подразделяется на:

а) фон случайных совпадений и в) фон задержанных совпадений.

1) фон, зависящий от реактора (вкл-выкл), происходит из-за нейтронов и гамма квантов с энергией до 10 MeV от реакторного ядра. Он может быть устранен посредством пассивной защиты.

2) фон, независящий от реактора, измеряется во время остановок реактора. Следует минимизировать естественную радиоактивность, чтобы уменьшить фон случайных совпадения.

Более серьезный фон происходит от нейтронов, вызванных мюонами.

Сами мюоны эффективно подавляются антисовпаденческой защитой, но нейтроны от мюонов, подавляются только частично.

Особенно опасен быстрый нейтрон, он может произвести протон отдачи затем нейтрон термализуется и захватывается Gd, моделируя событие антинейтрино.

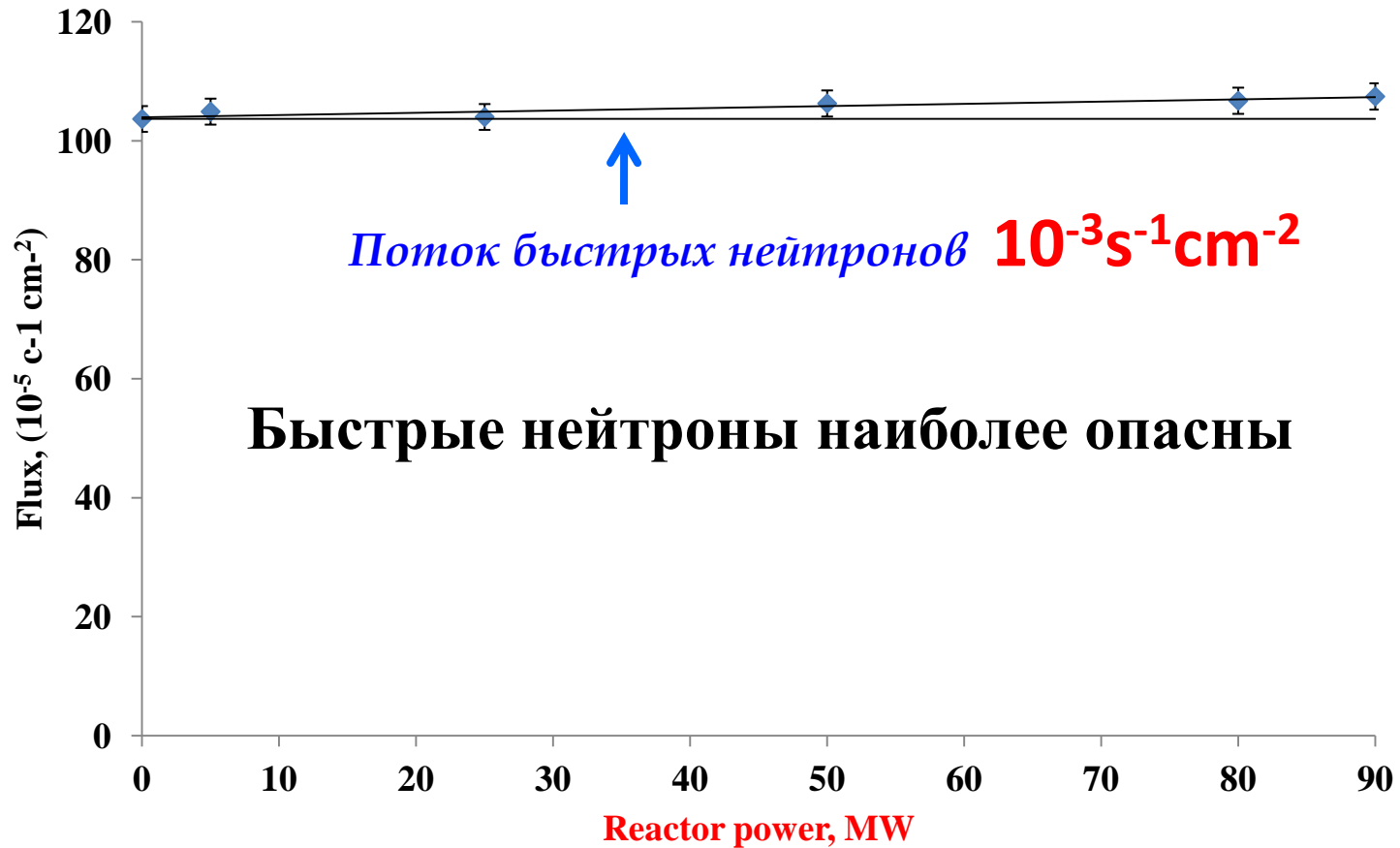
Чтобы подавить этот фон, используется метод дискриминации сигнала по форме пульса (PSD).

Активация мюонами самого детектора с образованием He8 и Li9, которые распадаются с испусканием электрона и нейтрона и имитируют реакцию антинейтрино на протоне.

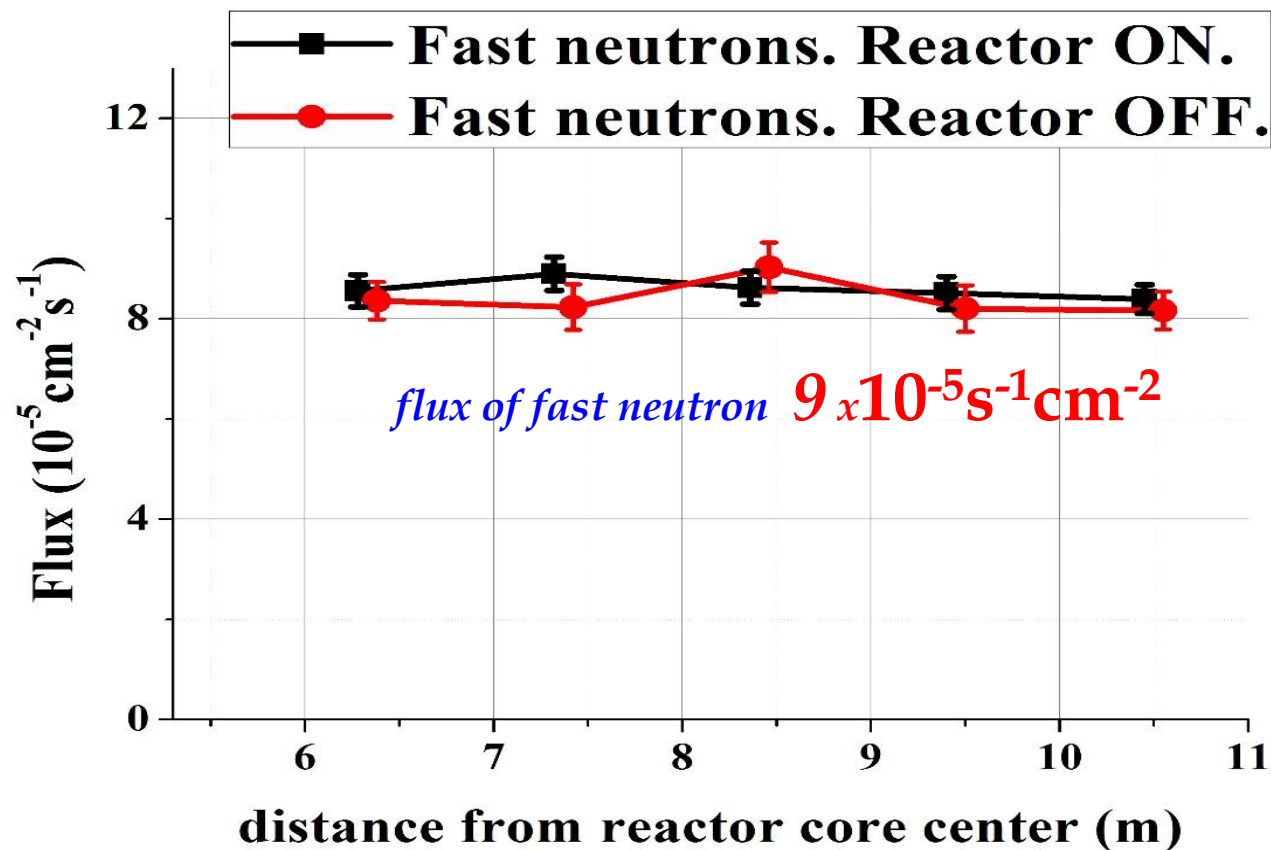
Измерения уровня нейтронного и гамма фона



Измерение потока быстрых нейтронов у реакторной стены (вне пассивной защиты) в зависимости от мощности реактора от 0 MW до 90 MW

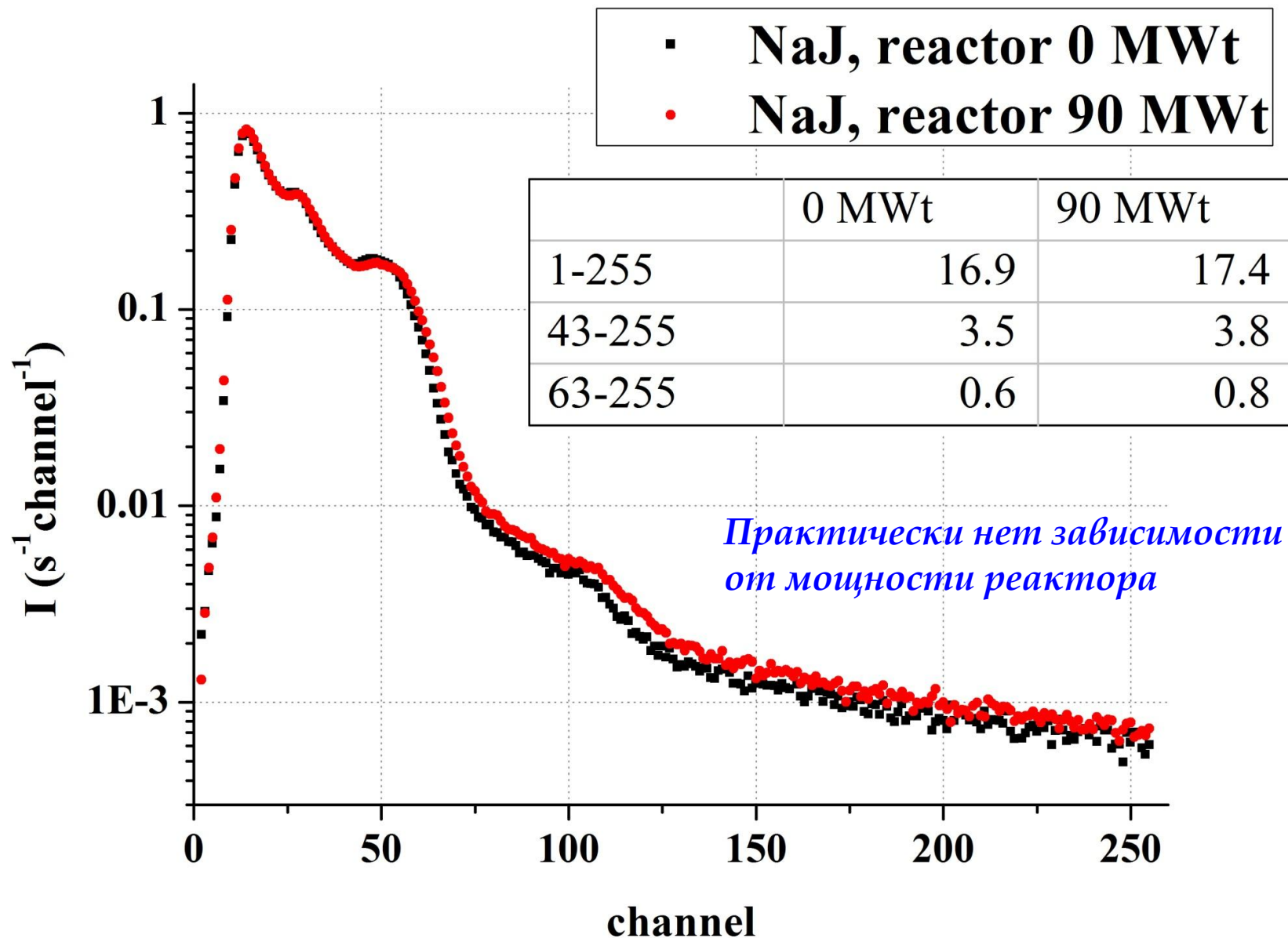


*Измерение потока быстрых нейтронов в зависимости от расстояния
внутри пассивной защиты при мощности реактора 0 MW и 90 MW*

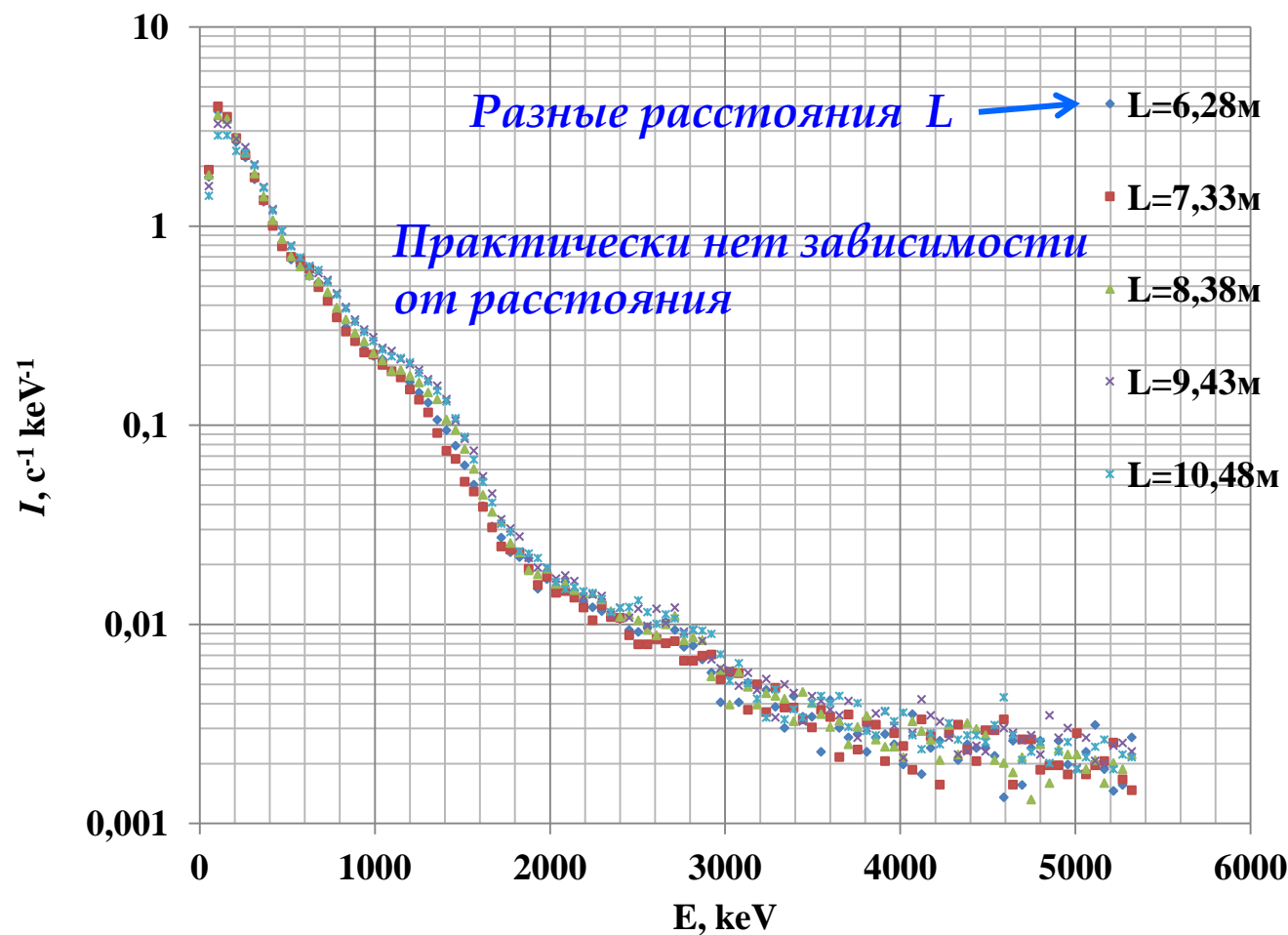


*Фактор подавления быстрых нейтронов 10-12 раз.
Фактор подавления тепловых нейтронов 50-60 раз.*

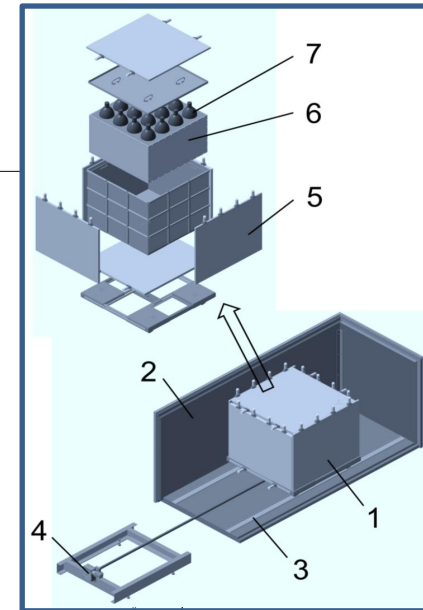
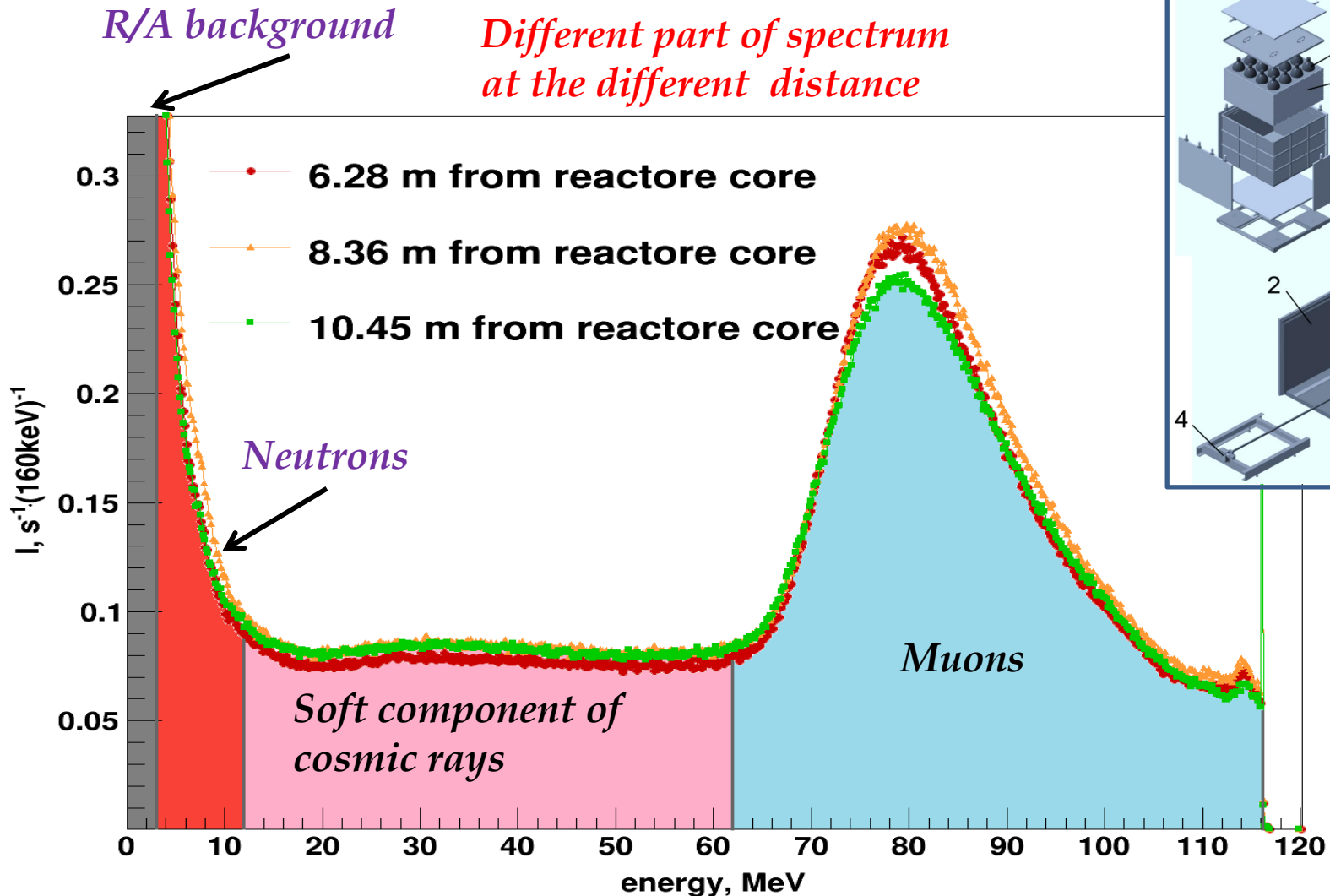
Измерение гамма лучей у реакторной стены (вне пассивной защиты) в зависимости от мощности реактора от 0 MW до 90 MW



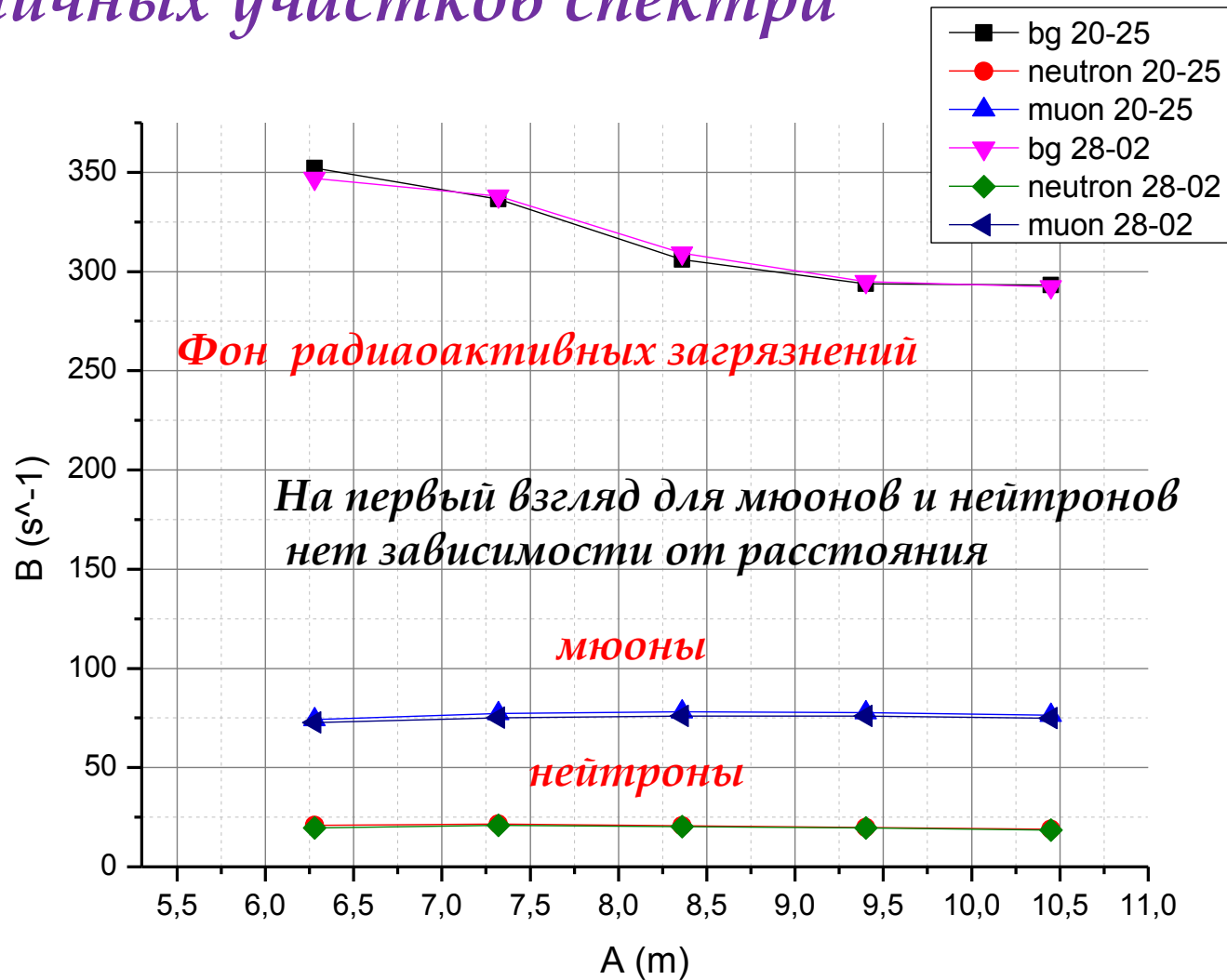
Распределение гамма фона внутри пассивной защиты Reactor on (*Gamma detector NaJ*)



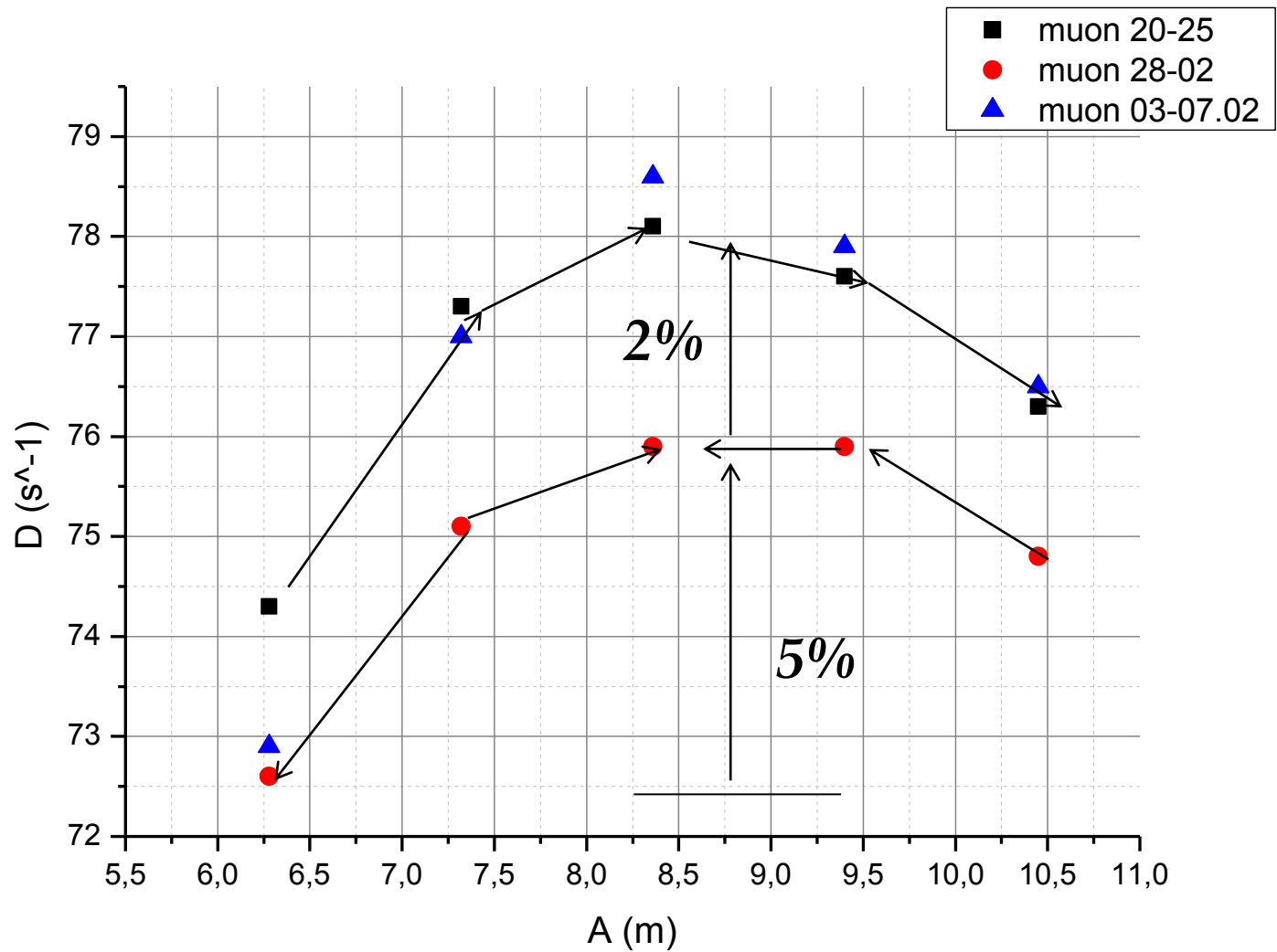
Исследование фоновых условий с моделью нейтринного детектора



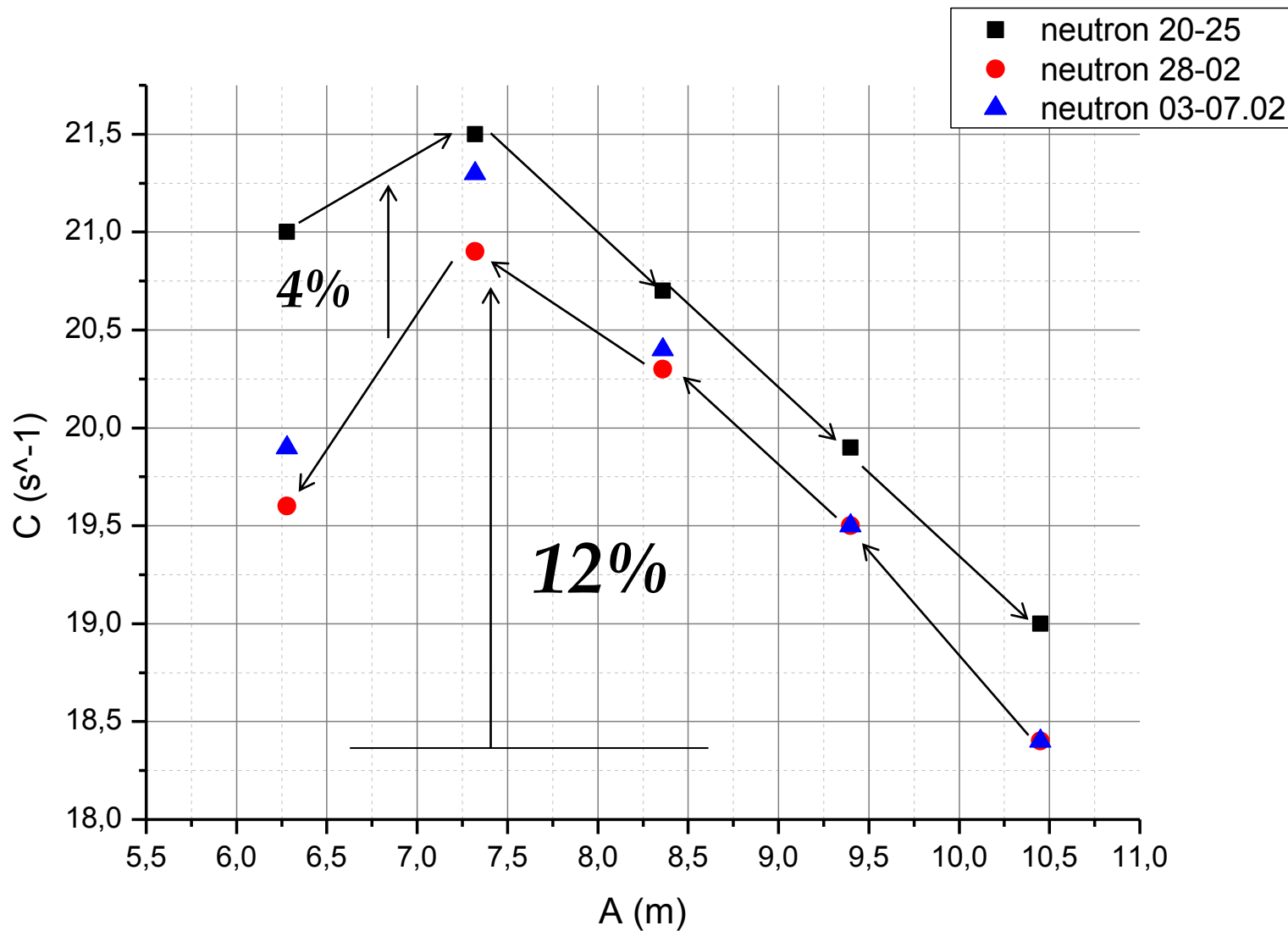
Зависимость от расстояния для различных участков спектра



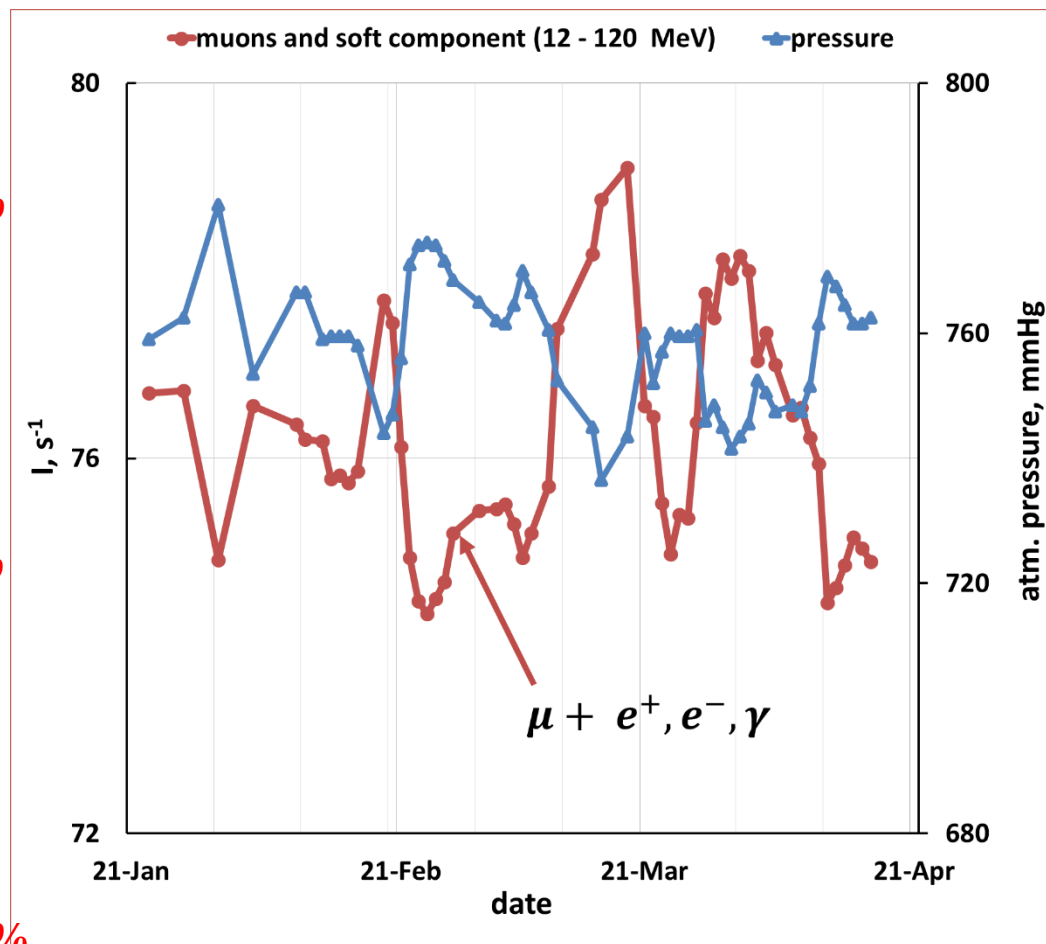
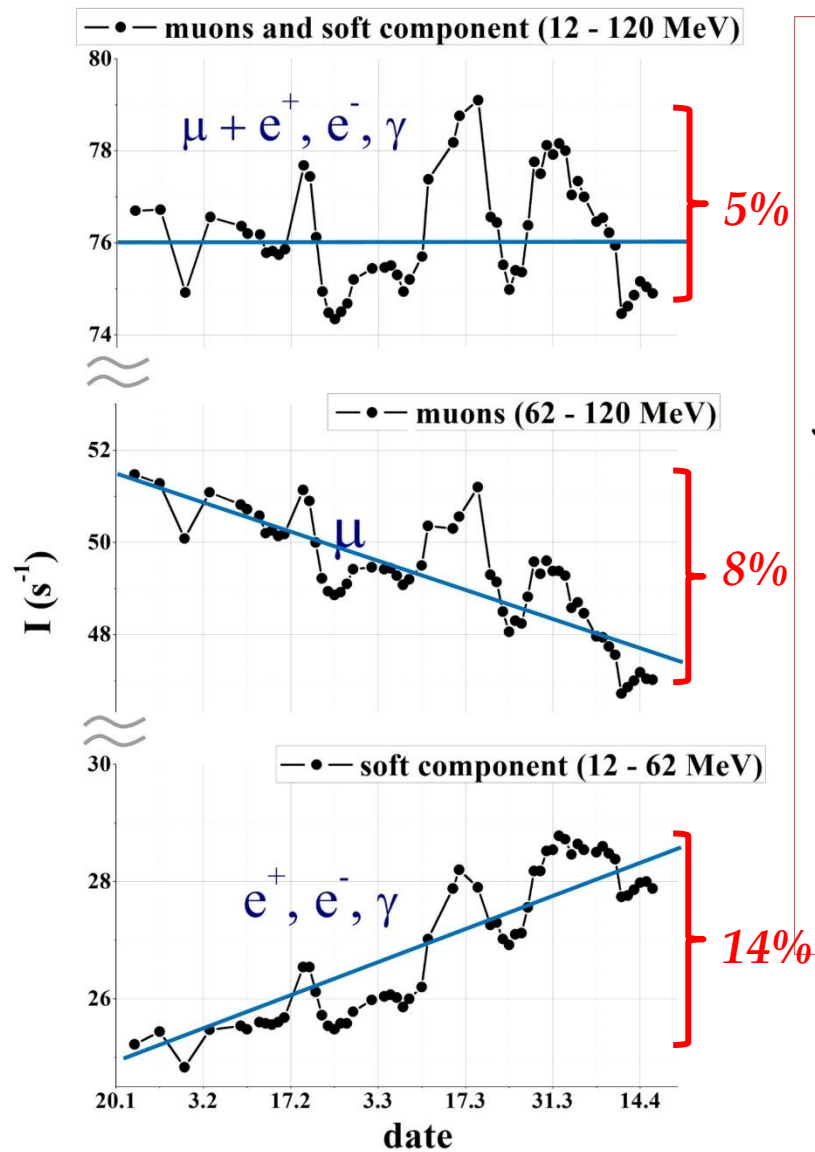
Мюоны: зависимость от расстояния и времени



Нейтроны: зависимость от расстояния и времени

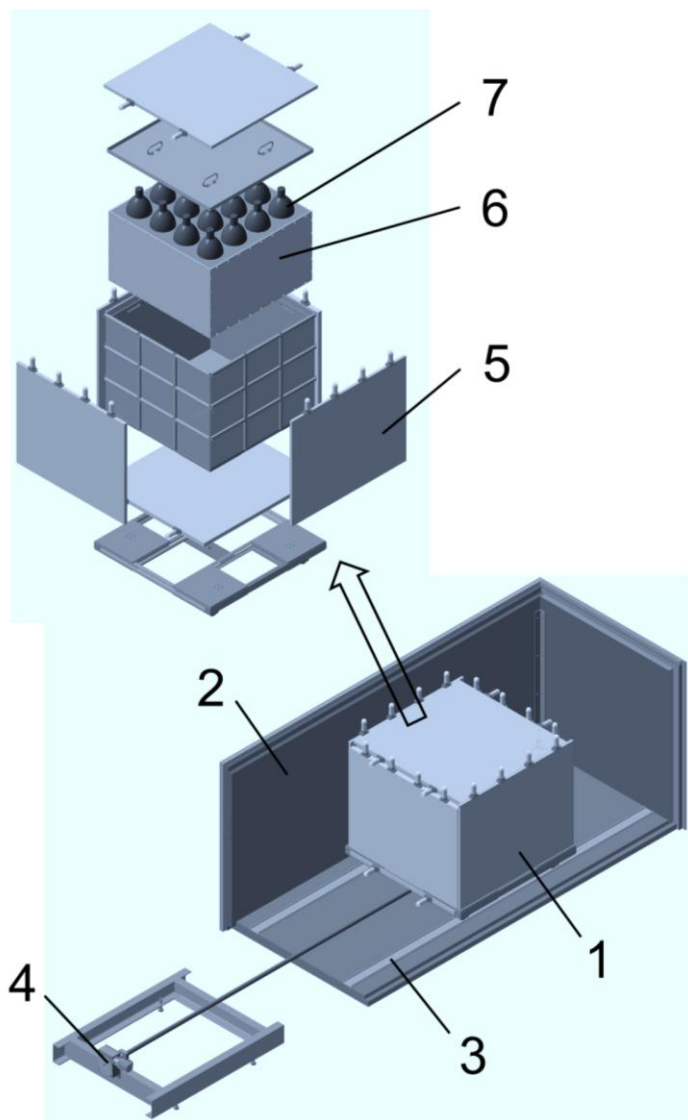


Влияние атмосферного давления и температуры на космические лучи



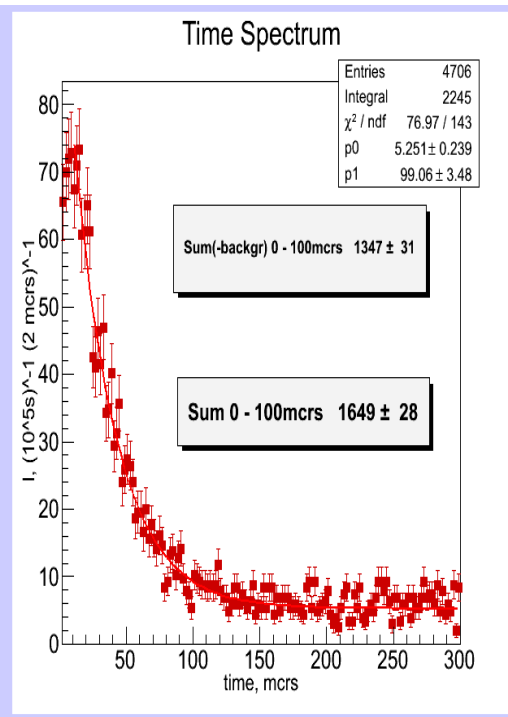
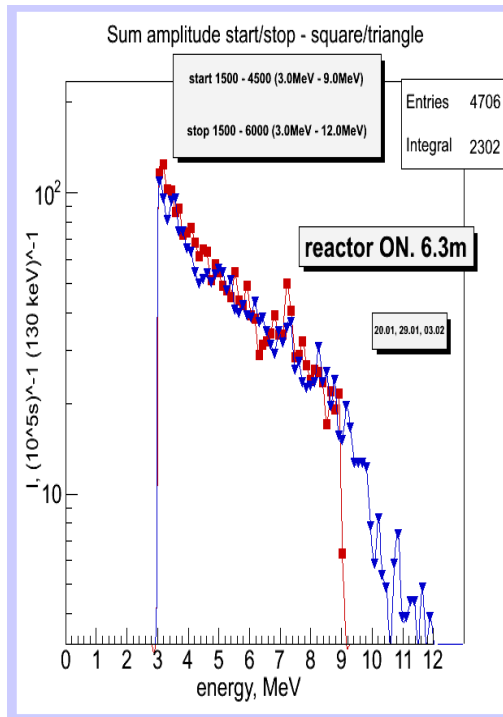
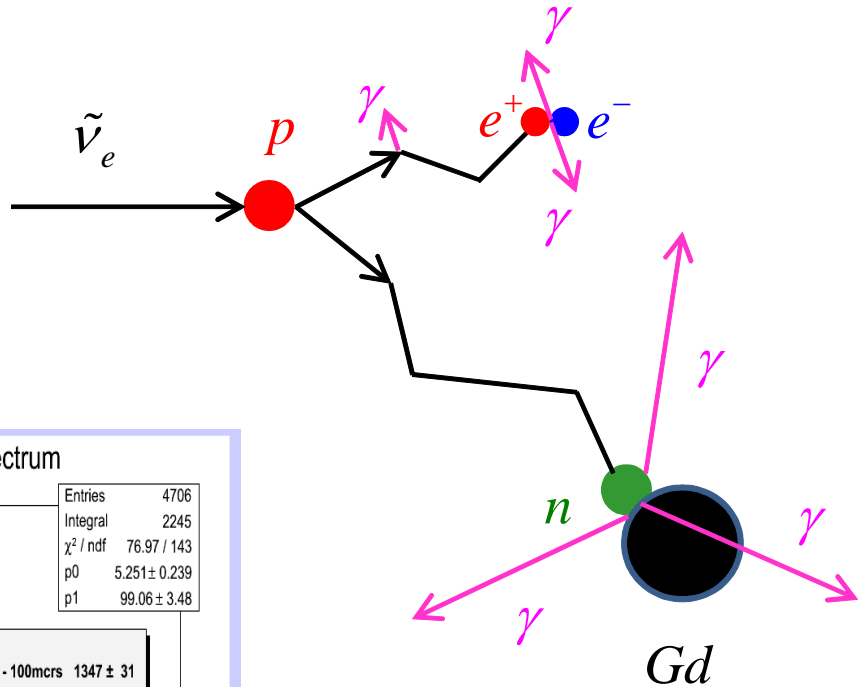
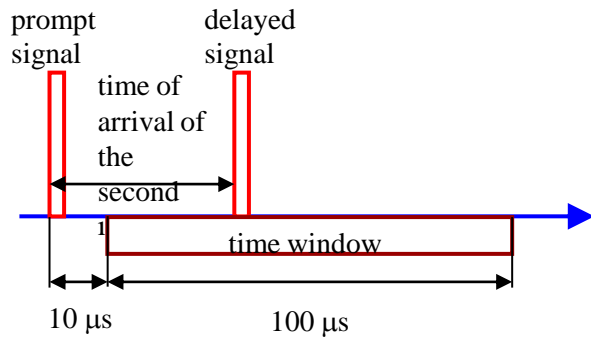
*Измерение коррелированных событий
(поиск реакторных антинейтрино)*

Модель нейтринного детектора



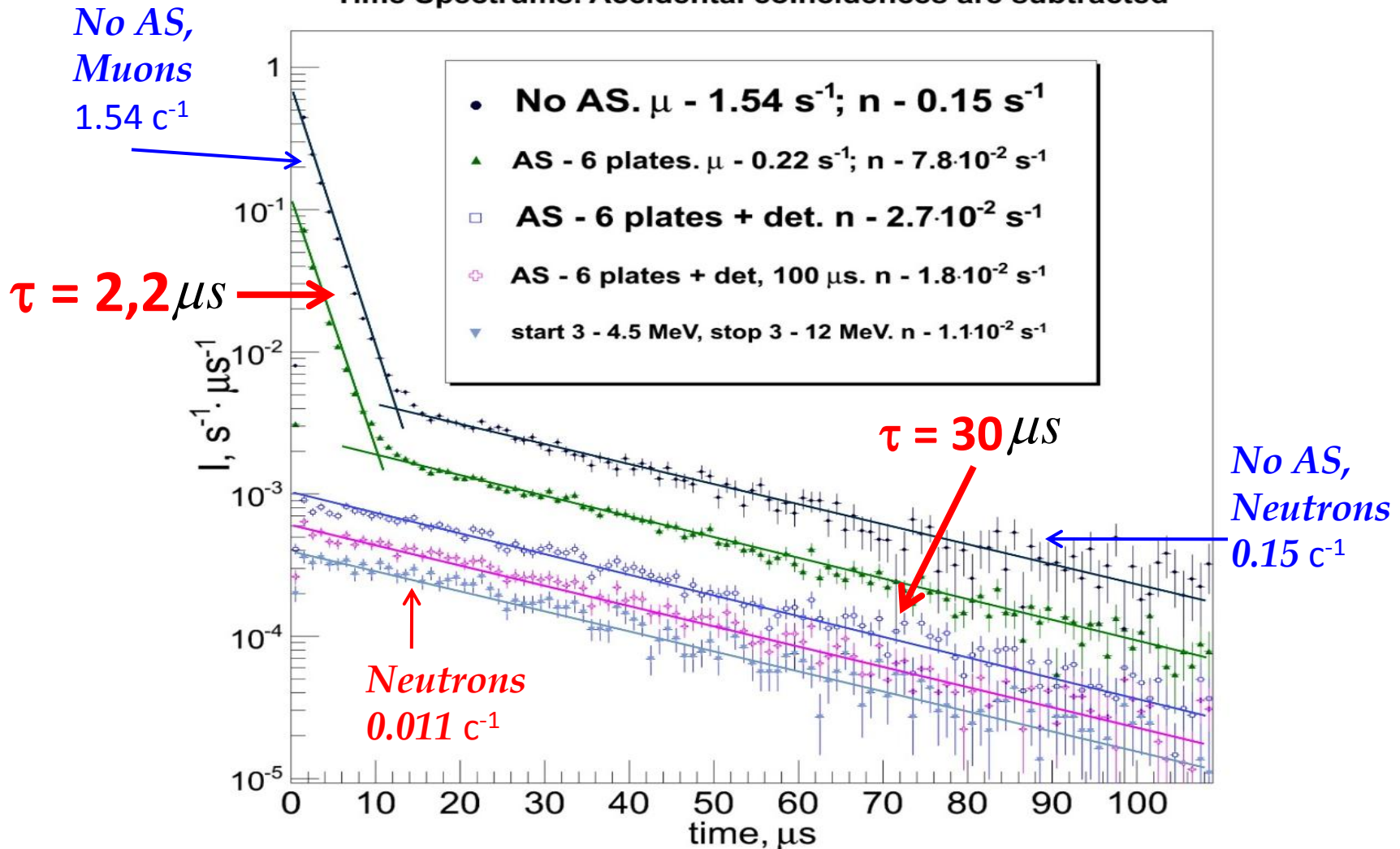
**Модель нейтринного детектора,
установленная в пассивную защиту**
. 1 – детектор реакторных антинейтрино,
2 – пассивная защита,
3 – рельсы,
4 – двигатель для перемещения
детектора,
5 – сцинтилляционные пластины
внутренней антисовпаденческой защиты
с ФЭУ,
6 – объем со сцинтилляционной
жидкостью (~400 л),
7 – ФЭУ детектора.

Сигнал коррелированного события

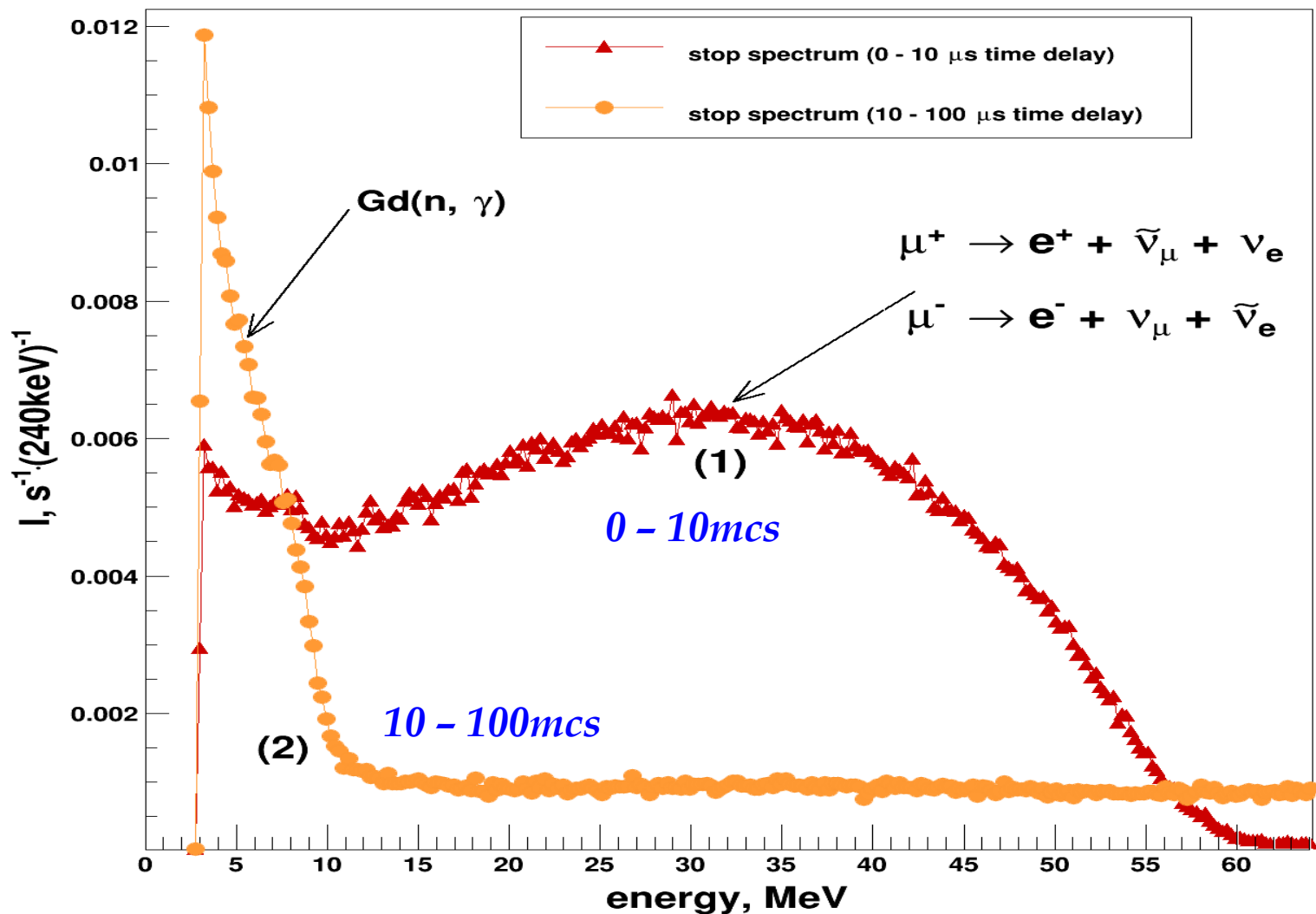


Временной спектр для различных конфигураций активной защиты (AS)

Time Spectrums. Accidental coincidences are subtracted

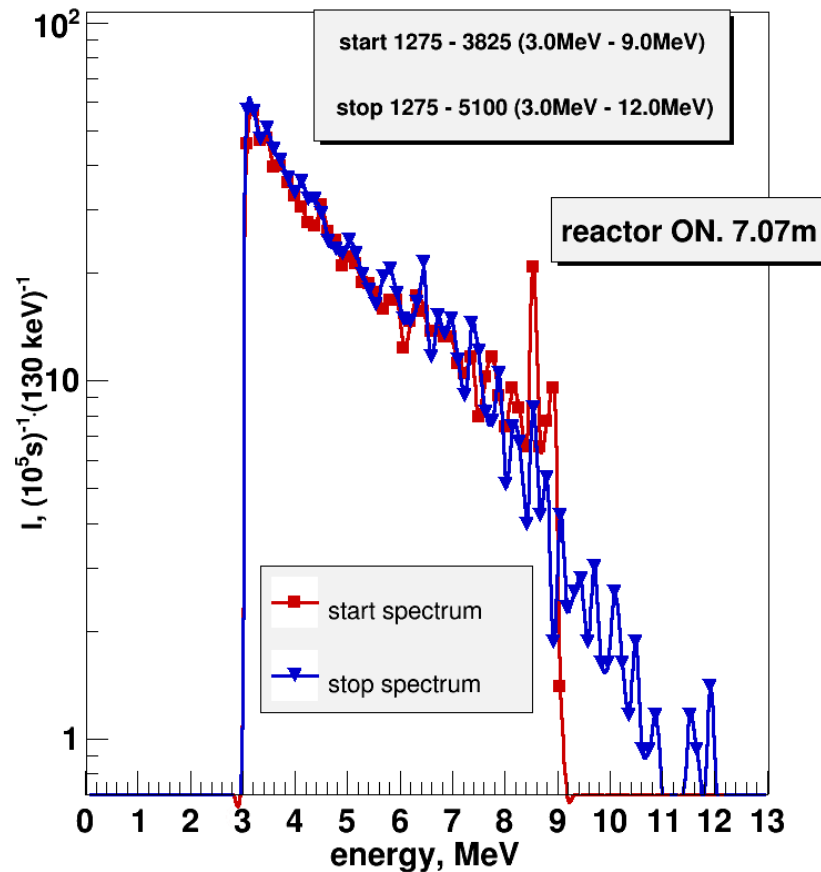


Энергетические спектры в различных временных интервалах:
0 – 10mcs (1) and 10 – 100mcs (2).

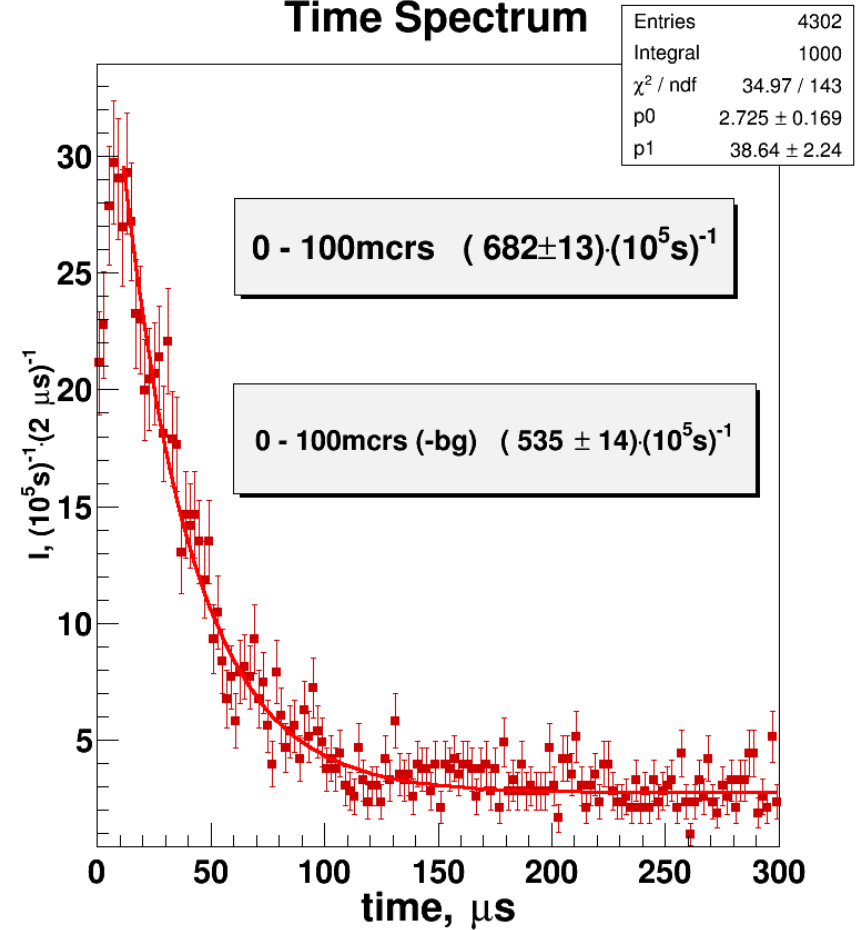


Коррелированные сигналы (энергетические и временные спектры)

Start and stop spectra

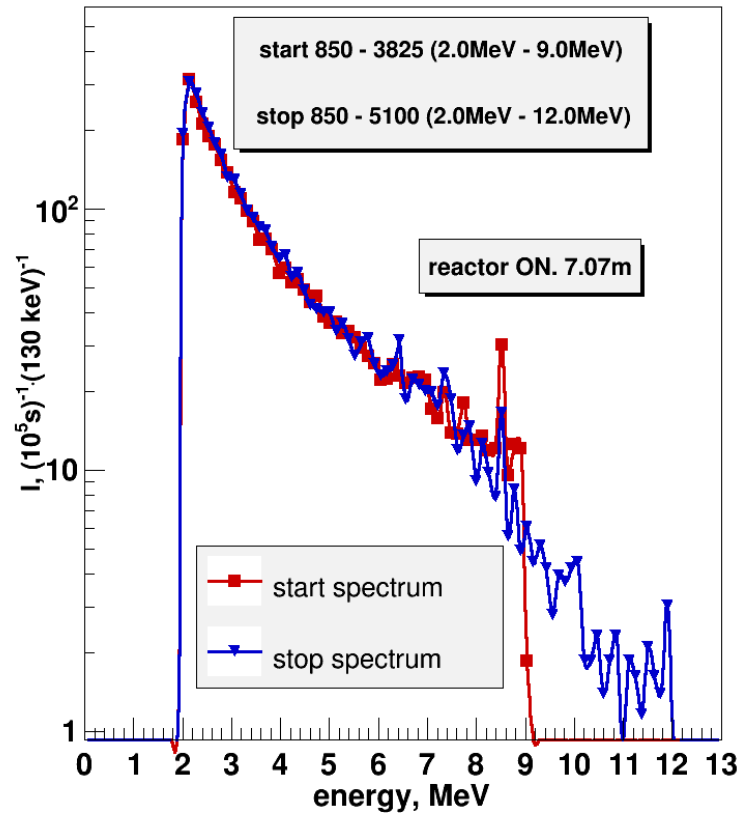


Time Spectrum

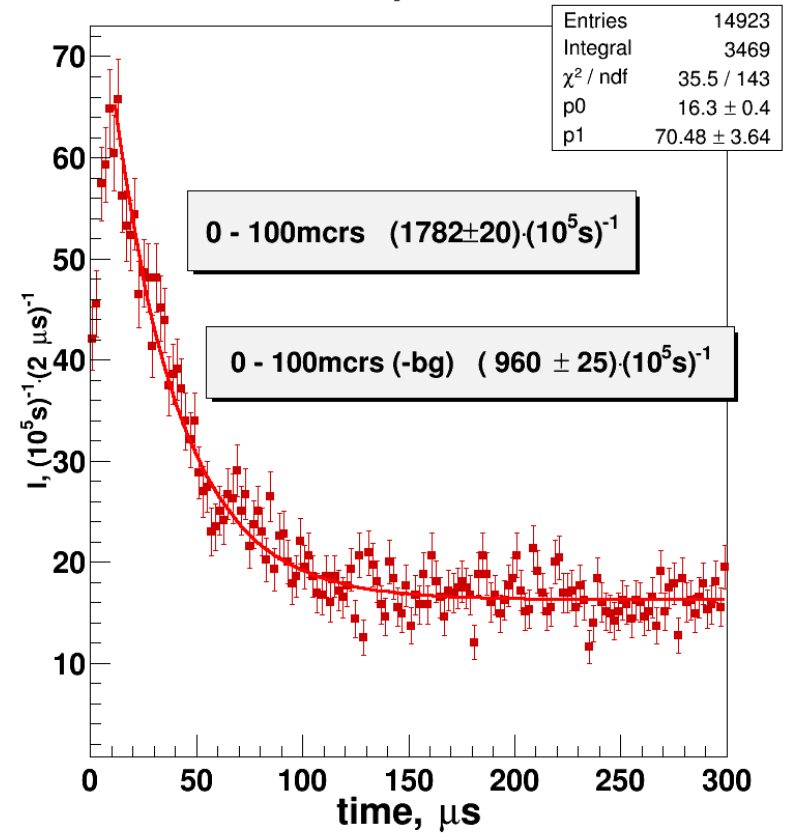


Коррелированные сигналы (энергетические и временные спектры)

Start and stop spectra

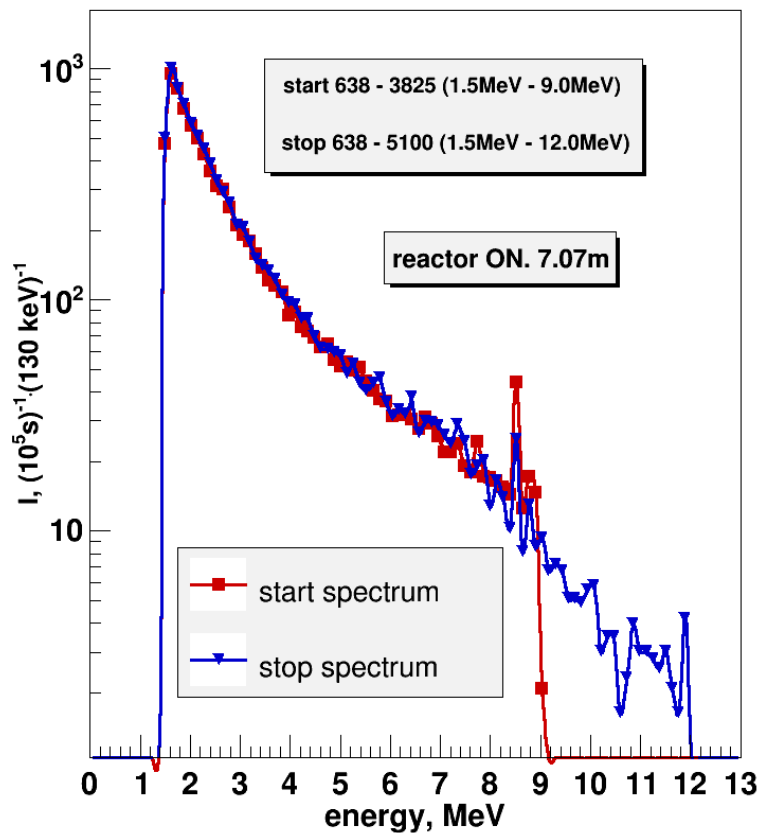


Time Spectrum

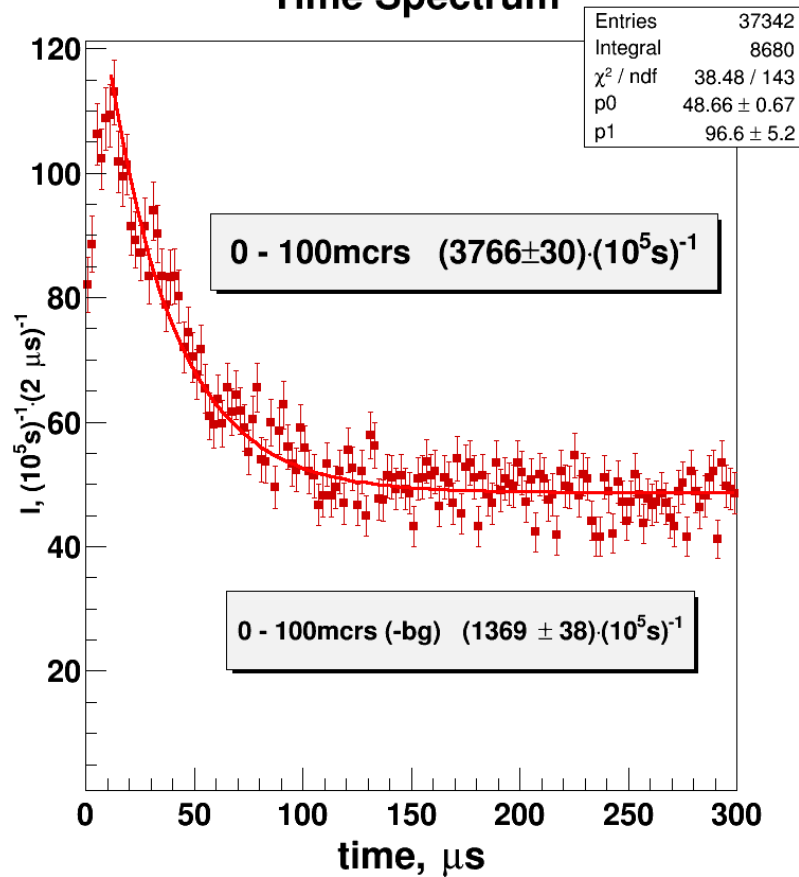


Коррелированные сигналы (энергетические и временные спектры)

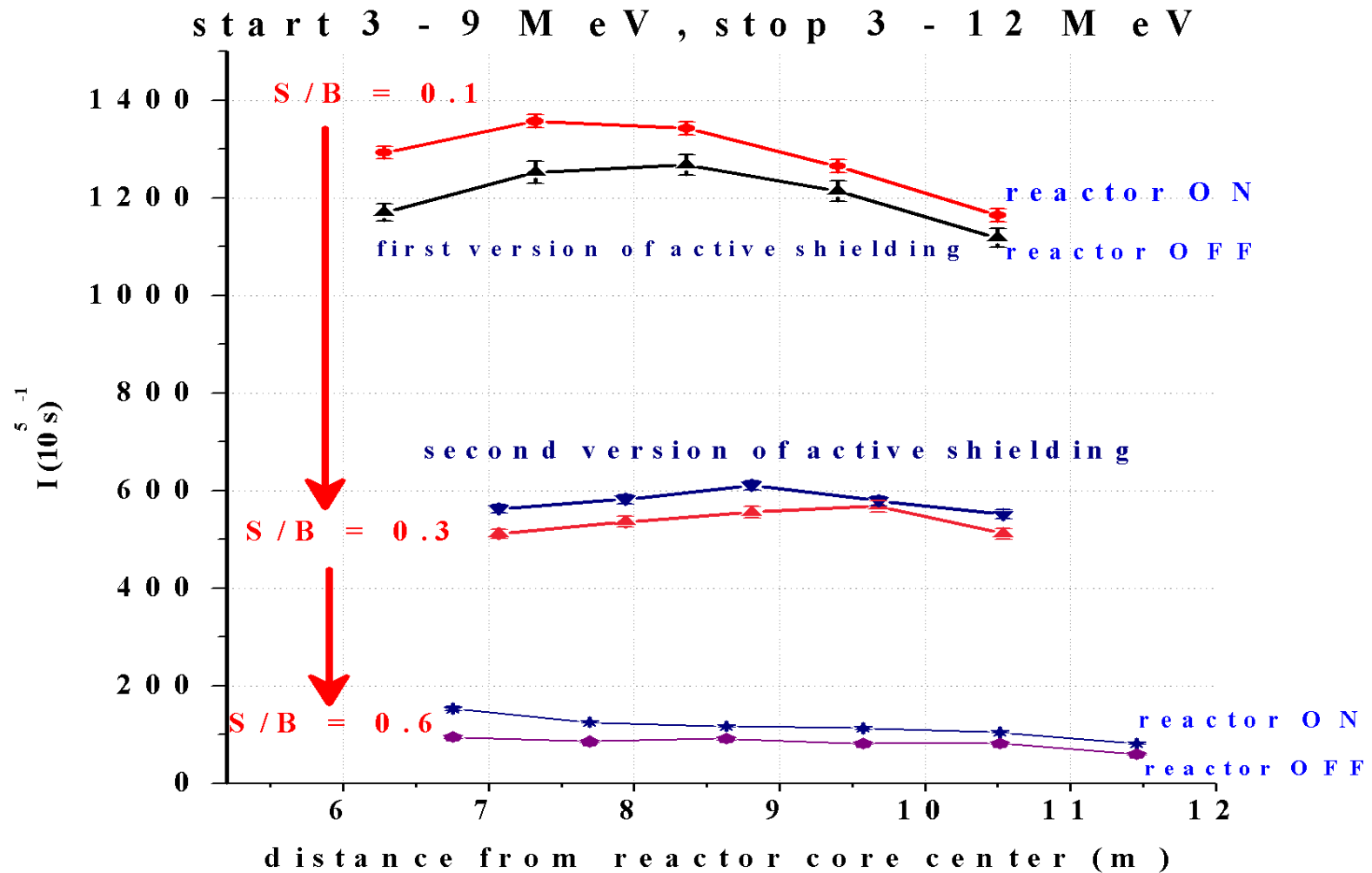
Start and stop spectra

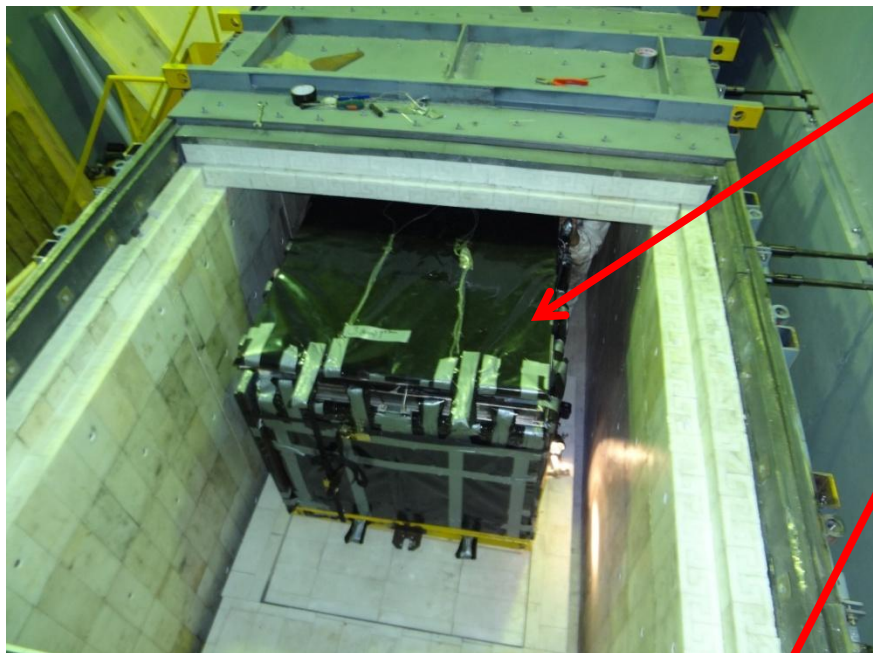


Time Spectrum



Активная защита детектора

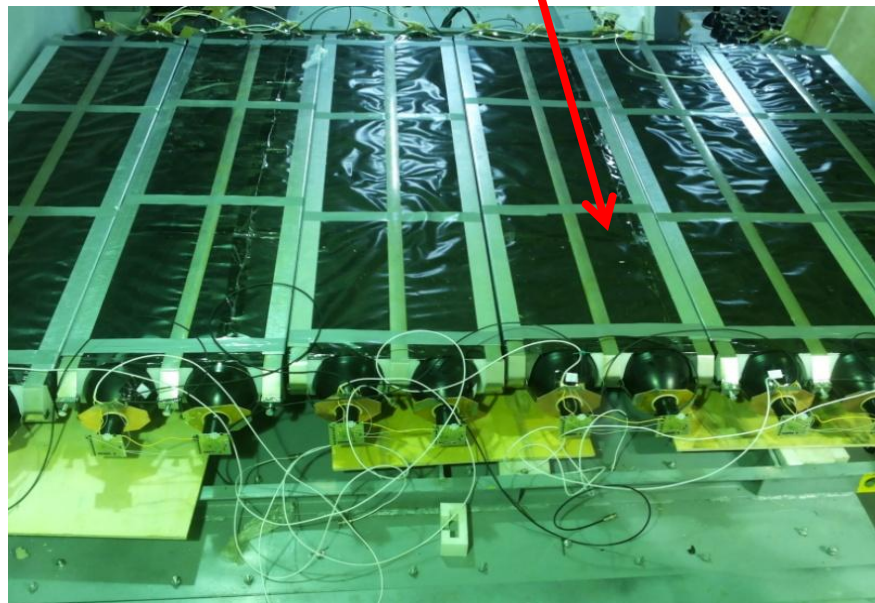




Первый вариант активной защиты.

Второй вариант активной защиты.

Внешняя активная защита – «зонтик».

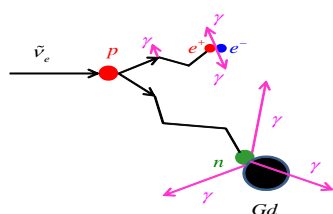


*Создание модели
многосекционного
детектора*

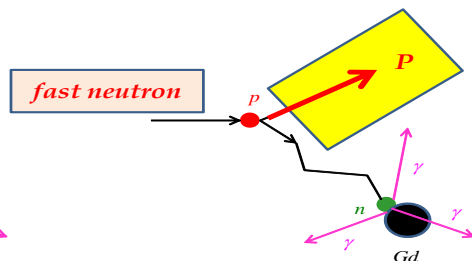
Создание модели многосекционного детектора

Иллюстрация к проблеме фона от быстрых нейтронов от космических мюонов

Neutrino event

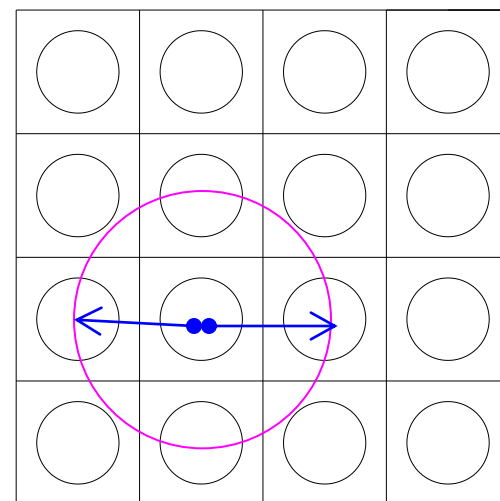
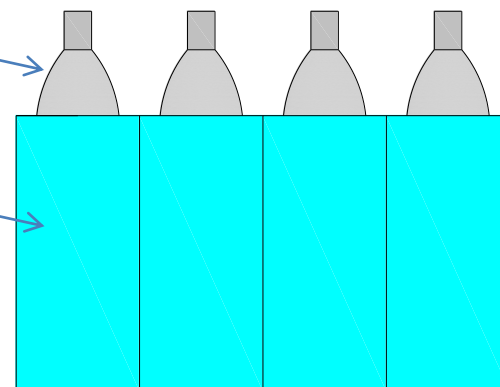


False event



ФЭУ

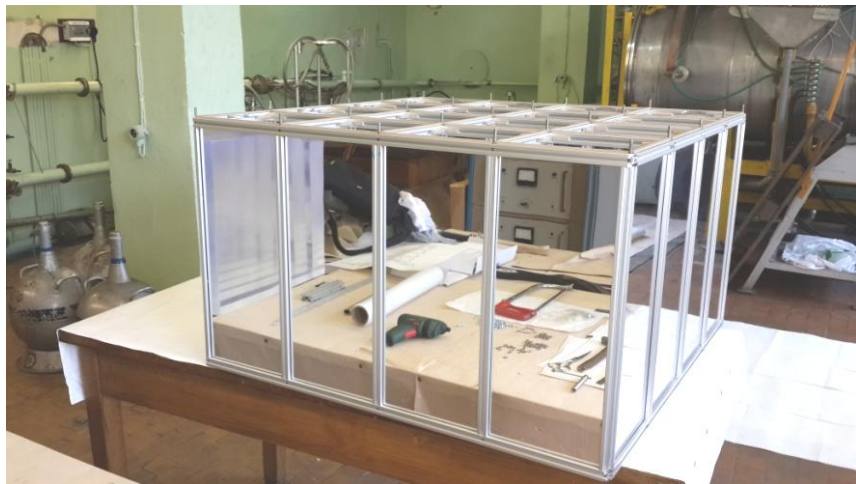
сцинтиллятор



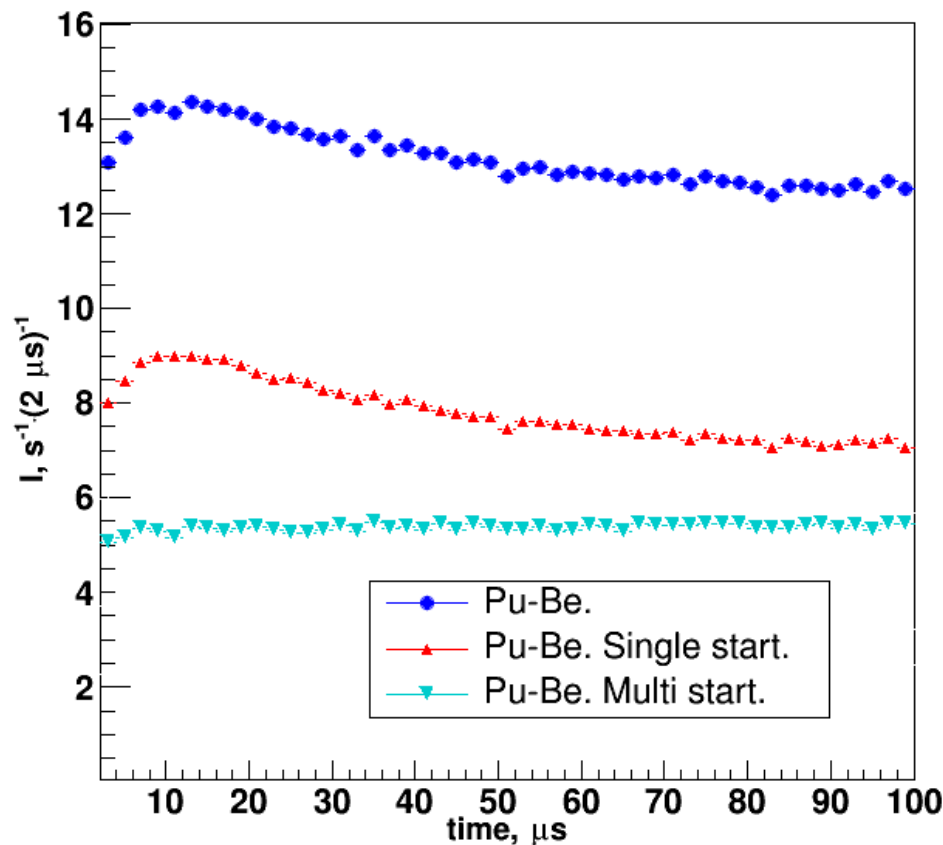
центральная ячейка, двойные совпадения e^+ , γ одна ячейка	боковая ячейка, двойные совпадения e^+ , γ одна ячейка	угловая ячейка, двойные совпадения e^+ , γ одна ячейка	все ячейки, двойные совпадения e^+ , γ одна ячейка
0.424	0.294	0.188	0.300

Монте-Карло расчёты модели многосекционного детектора

*Изготовлена модель многодетекторной структуры:
16 ячеек для 350 литровой модели.*



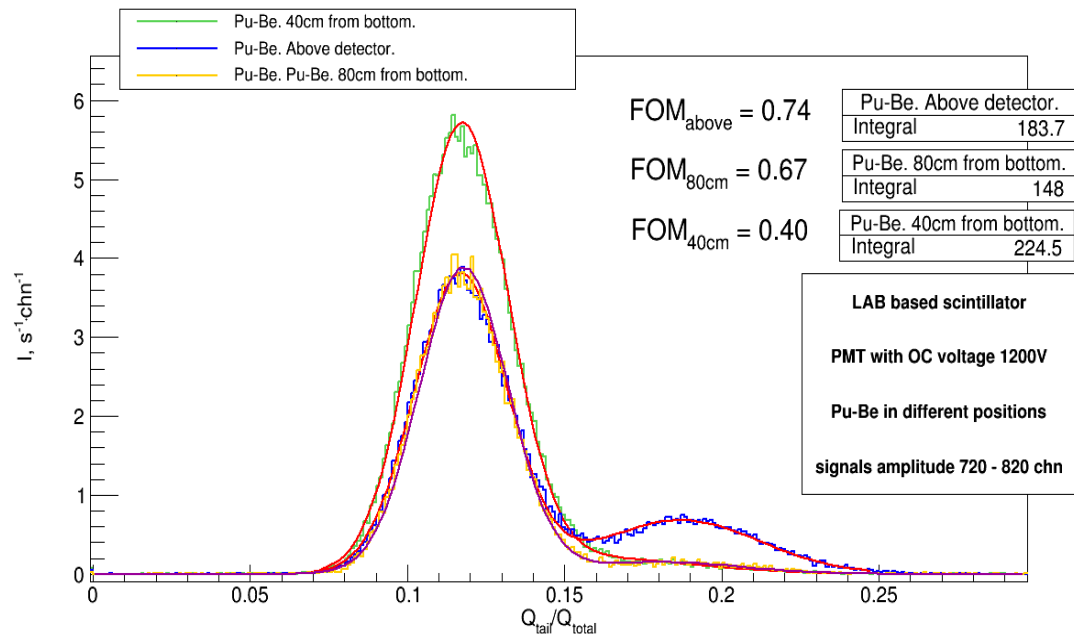
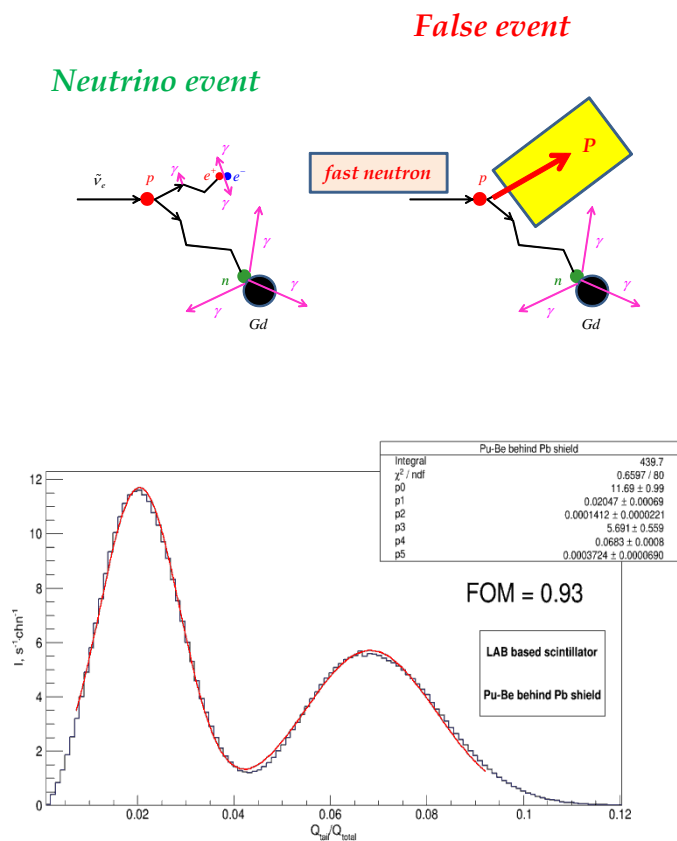
Тестовый эксперимент с источником быстрых нейтронов



Временной спектр задержанных совпадений полученный с нейтронным Pu-Be источником. Синяя кривая соответствует любым стартовым событиям без отбора, т.е. односекционным и многосекционным стартам. Красная кривая соответствует односекционным стартам, а зеленая - многосекционным стартам.

Стартовый (мгновенный) сигнал от быстрых нейтронов - односекционный

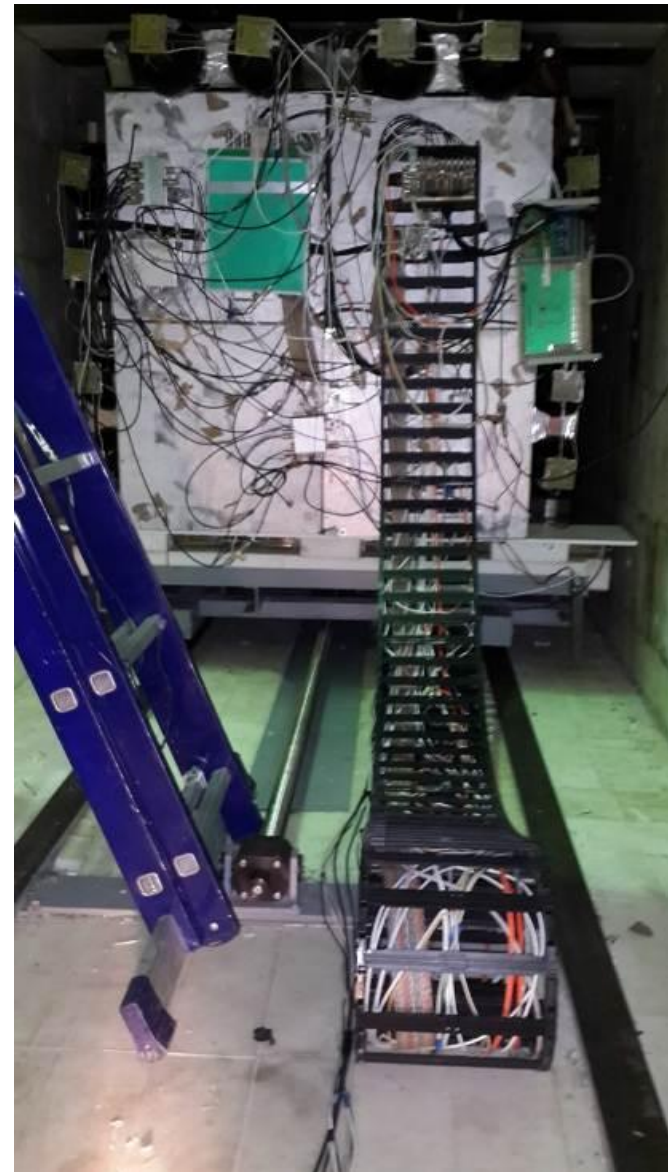
Исследование метода разделения сигналов от позитронов и протонов отдачи по форме импульса



Распределение $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ для детектора с жидким сцинтиллятором на основе ЛАБа, помещённого в поле смешанного (нейтронного и гамма) излучения источника ИБН-5. Объём детектора 3 литра.

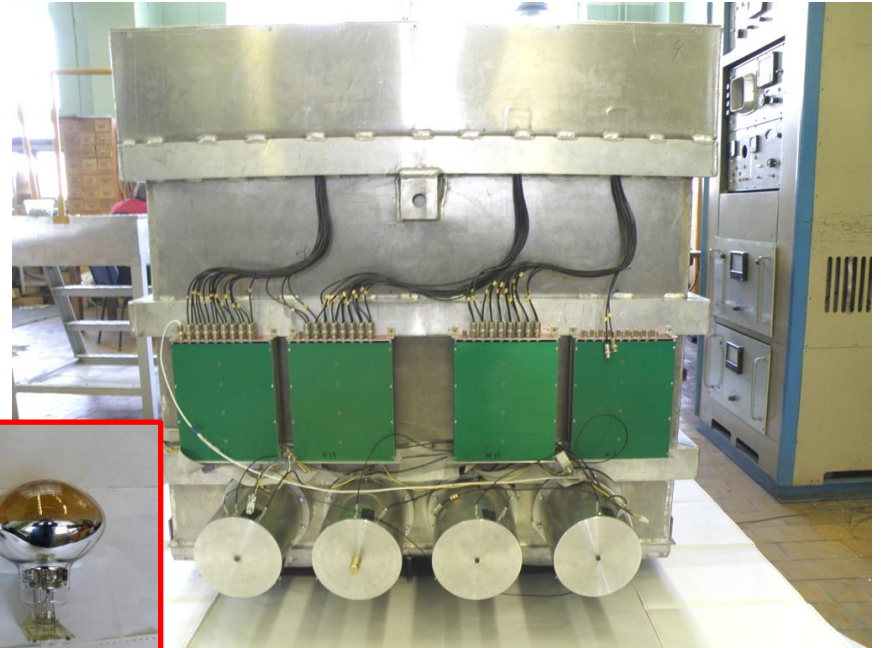
Изменение распределения $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ при различном положении нейтронного источника. Синяя линия – источник над детектором; оранжевая – источник сбоку от детектора, сверху, на уровне поверхности сцинтиллятора; зелёная – источник сбоку от детектора посередине, в 40см от пола.

Монтаж модели многосекционного детектора

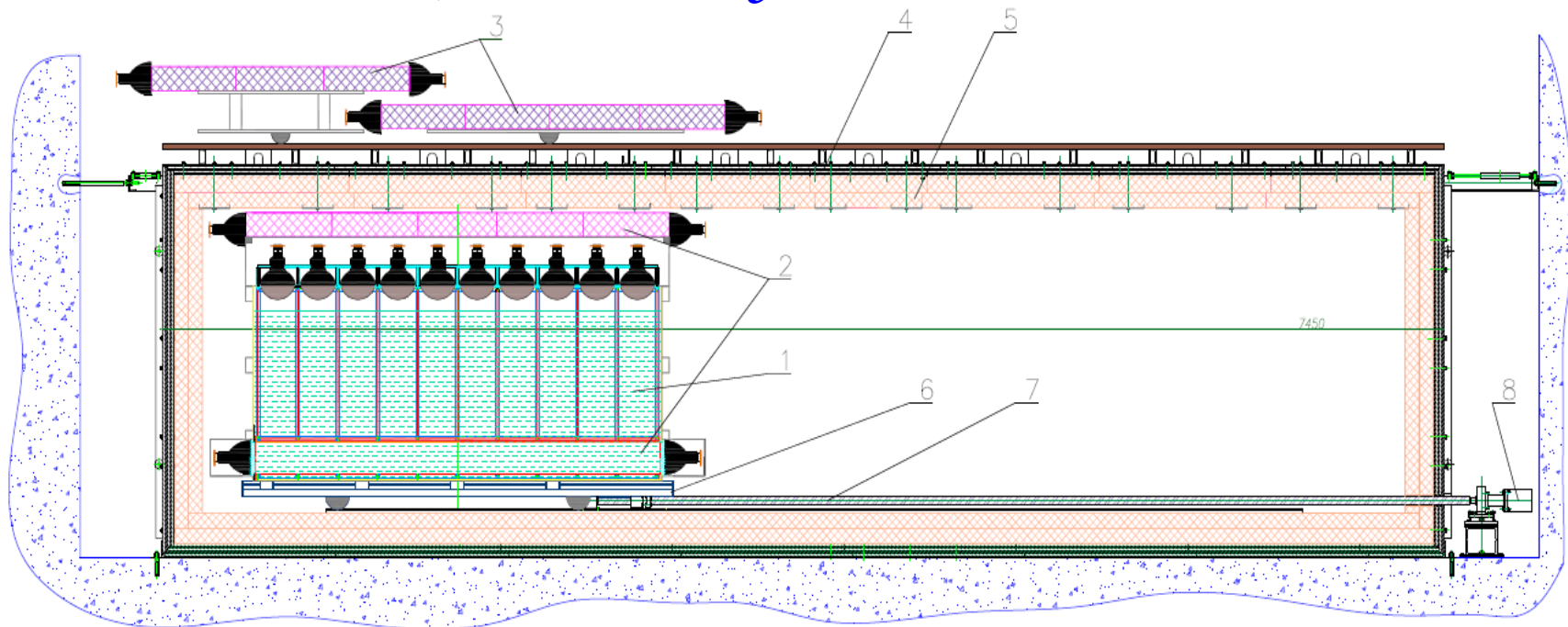


*Полномасштабный
детектор
3 т³ (5x10 секций)*

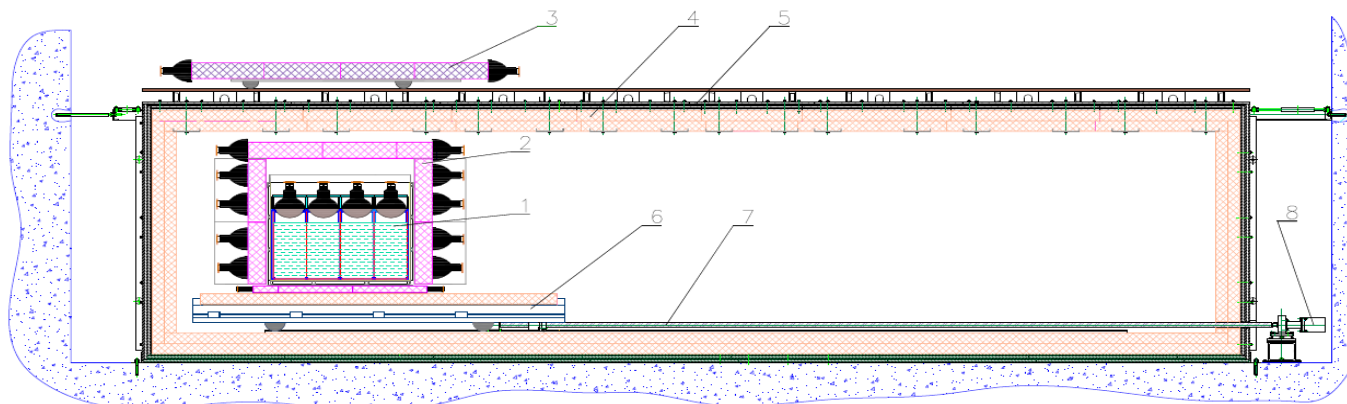
*В ПИЯФ изготовлен полномасштабный детектор
3 т³ (5x10 секций)*



Общая схема установки

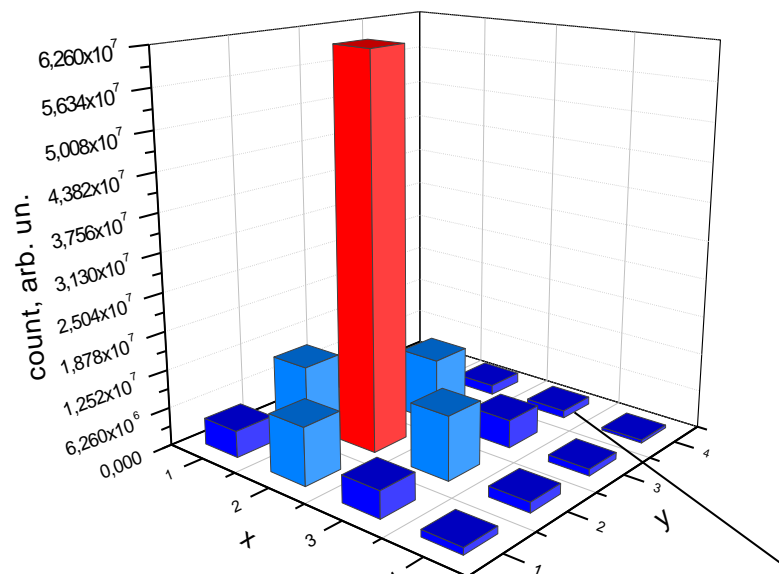


1 – detector of reactor antineutrino, 2 – internal active shielding, 3 – external active shielding (umbrella), 4 – steel and lead passive shielding, 5 – borated polyethylene passive shielding, 6 – moveable platform, 7 – feed screw, 8 – step motor.



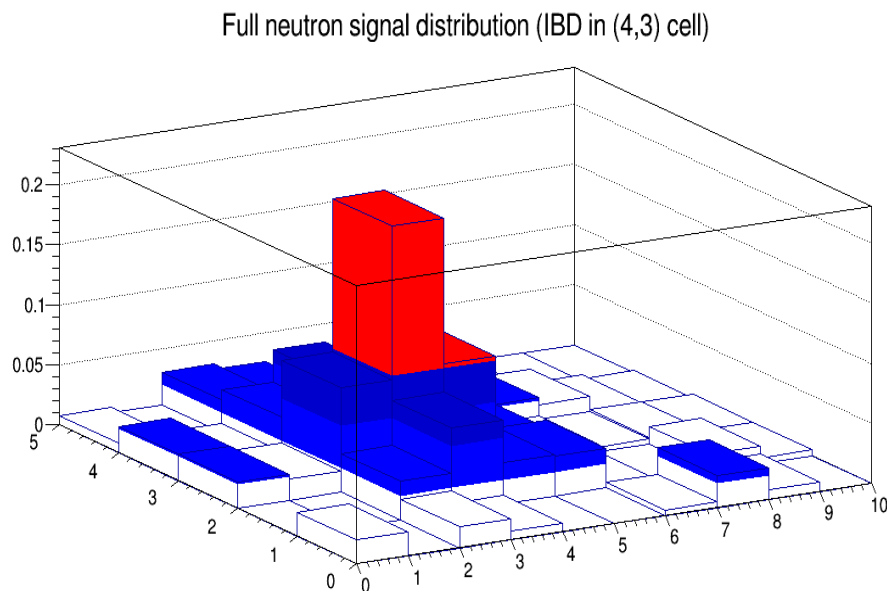
Распределение сигналов по секциям от захвата нейтрона гадолинием

Монте-Карло



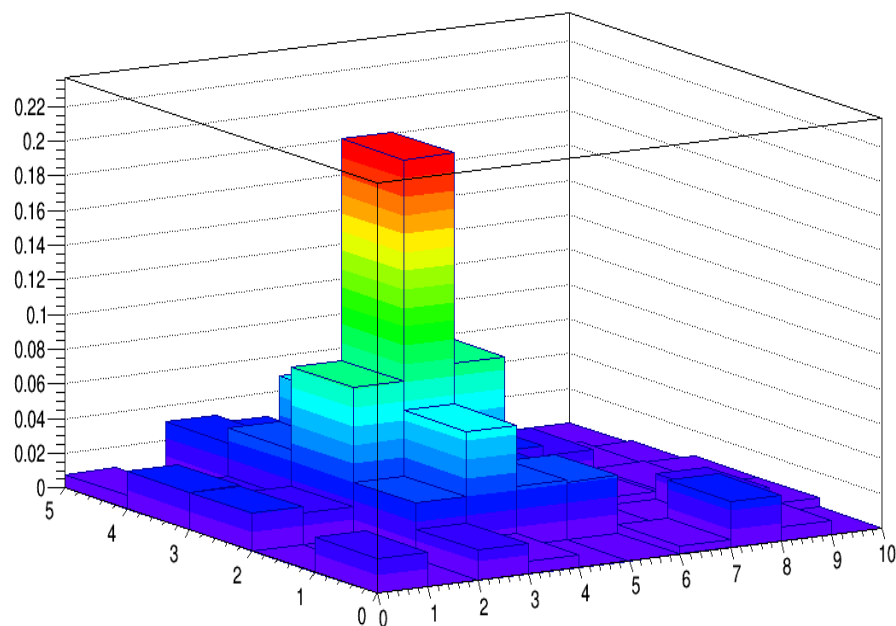
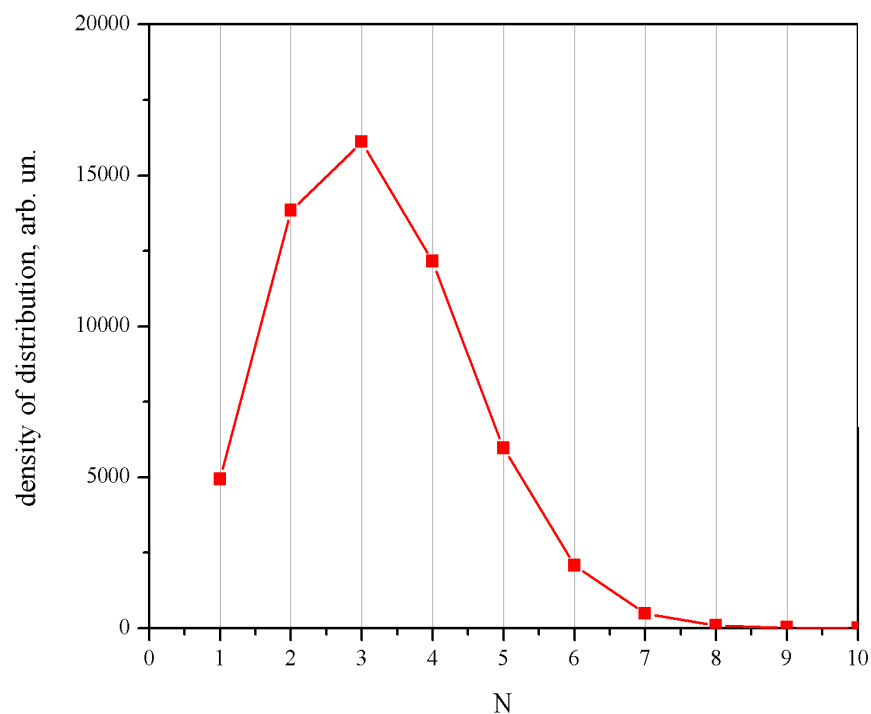
а – результат Монте-Карло моделирования (нейтрон захватывается в середине секции),

Эксперимент



б – результат, полученный на секционированном детекторе (в относительных единицах).

Распределение события захвата нейтрона гадoliniем по количеству задействованных ячеек.



Распределение задержанных сигналов относительно ячейки (3, 3), в которой произошла реакция обратного бета-распада.

Neutron capture cell distribution (IBD in (4,3) cell)

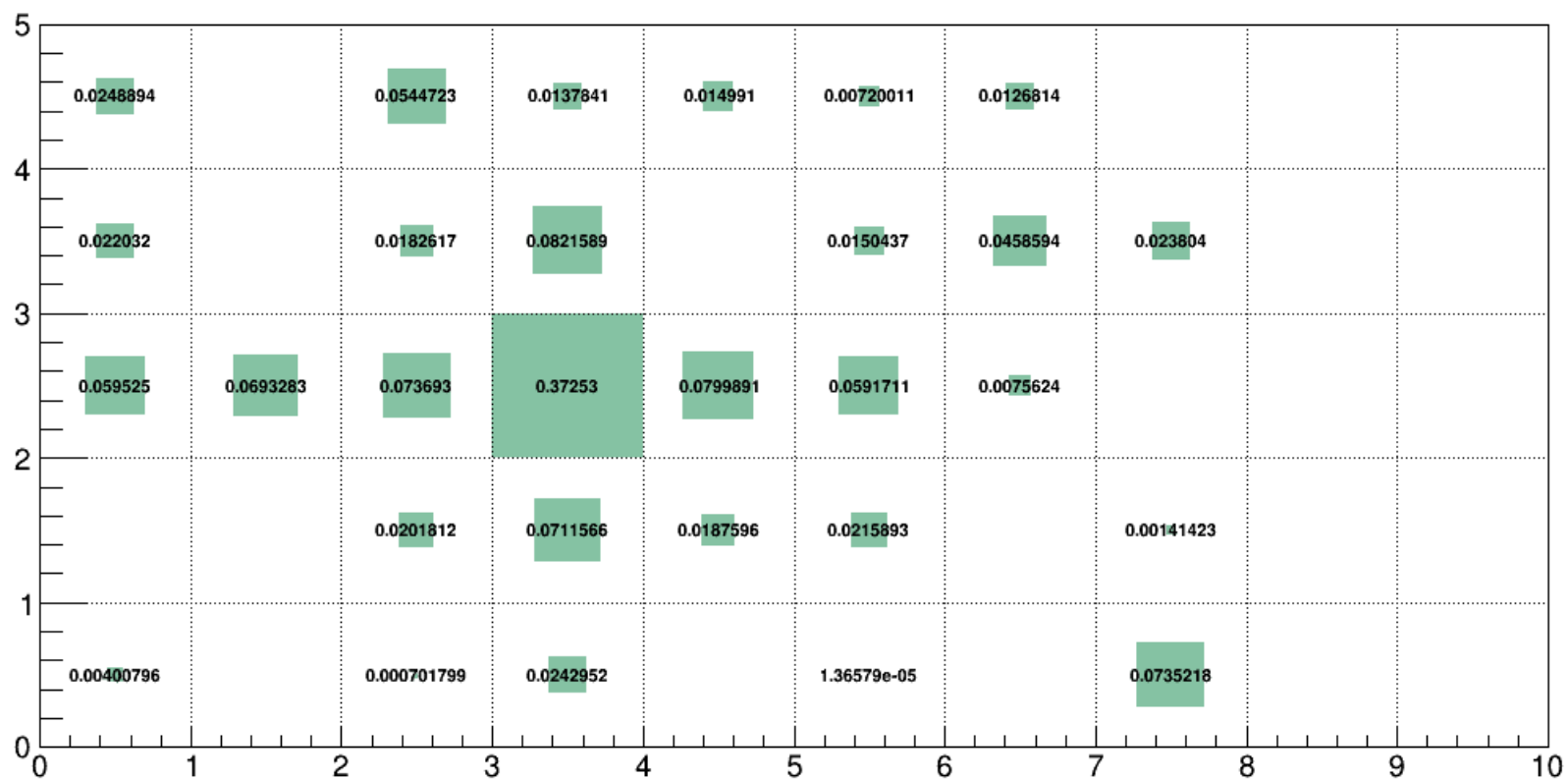


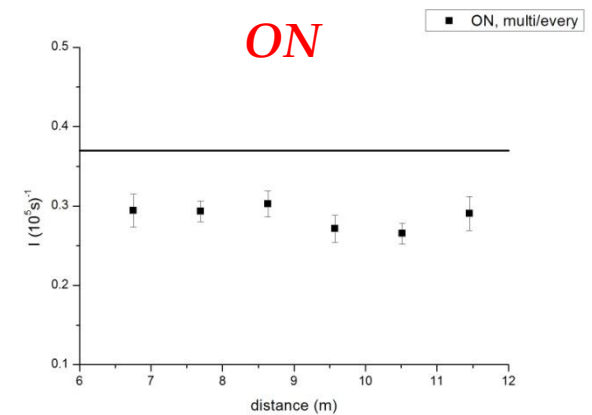
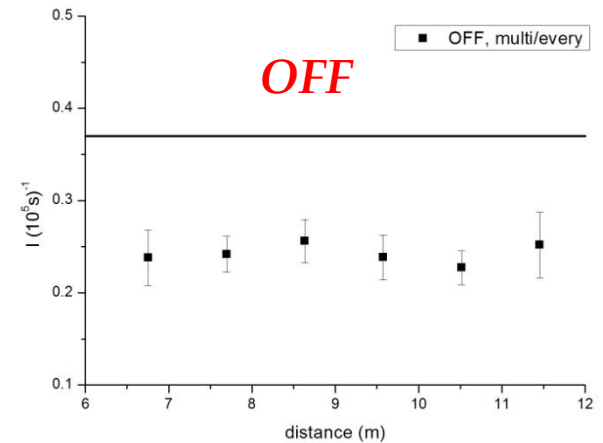
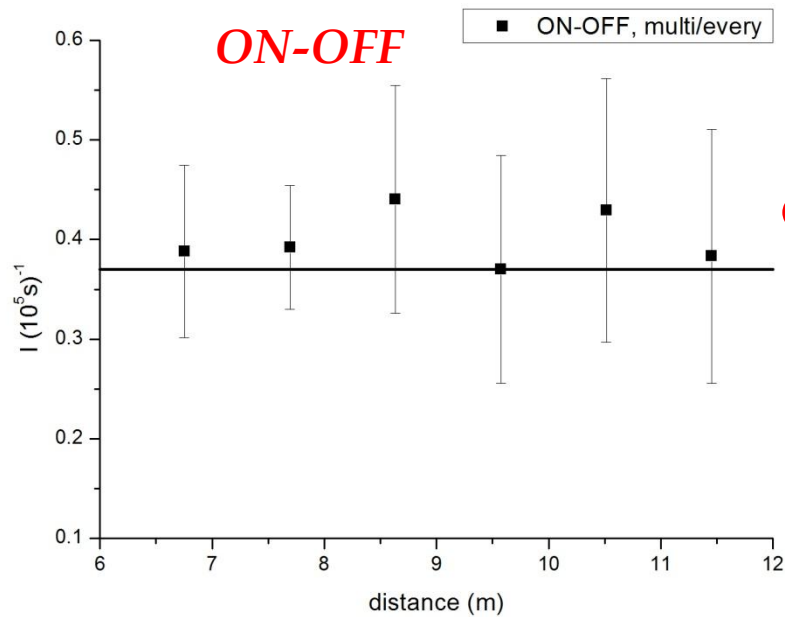
Таблица 2.

	ON, (10 ⁵ s) ⁻¹	Фон случайных совпадени й, (10 ⁵ s) ⁻¹	OFF, (10 ⁵ s) ⁻¹	Фон случайных совпадени й, (10 ⁵ s) ⁻¹	$\Delta(\text{ON-OFF}),$ (10 ⁵ s) ⁻¹	Δ/OFF	$\delta\Delta/\Delta,$ %
Без секционной структуры	875 ± 18	2278 ± 9	624 ± 17	1894 ± 9	251 ± 25	0.40	10.0
Мгновенные в 1-2 соседних секциях, задержанные любые	718 ± 16	1954 ± 8	483 ± 16	1630 ± 8	235 ± 23	0.49	9.7
Задержанные в 2х и более	569 ± 12	857 ± 6	362 ± 11	724 ± 6	207 ± 16	0.57	7.9
Задержанные в 2- 5 секциях	561 ± 12		360 ± 11		201 ± 16	0.56	8.0
Задержанные в 2х и более, радиус разлёта 3 секции	545 ± 11	793 ± 5	347 ± 11	664 ± 5	198 ± 16	0.57	7.9
Задержанные в 2х и более, радиус разлёта 2 секции	492 ± 11	709 ± 5	316 ± 11	591 ± 5	176 ± 15	0.56	8.5

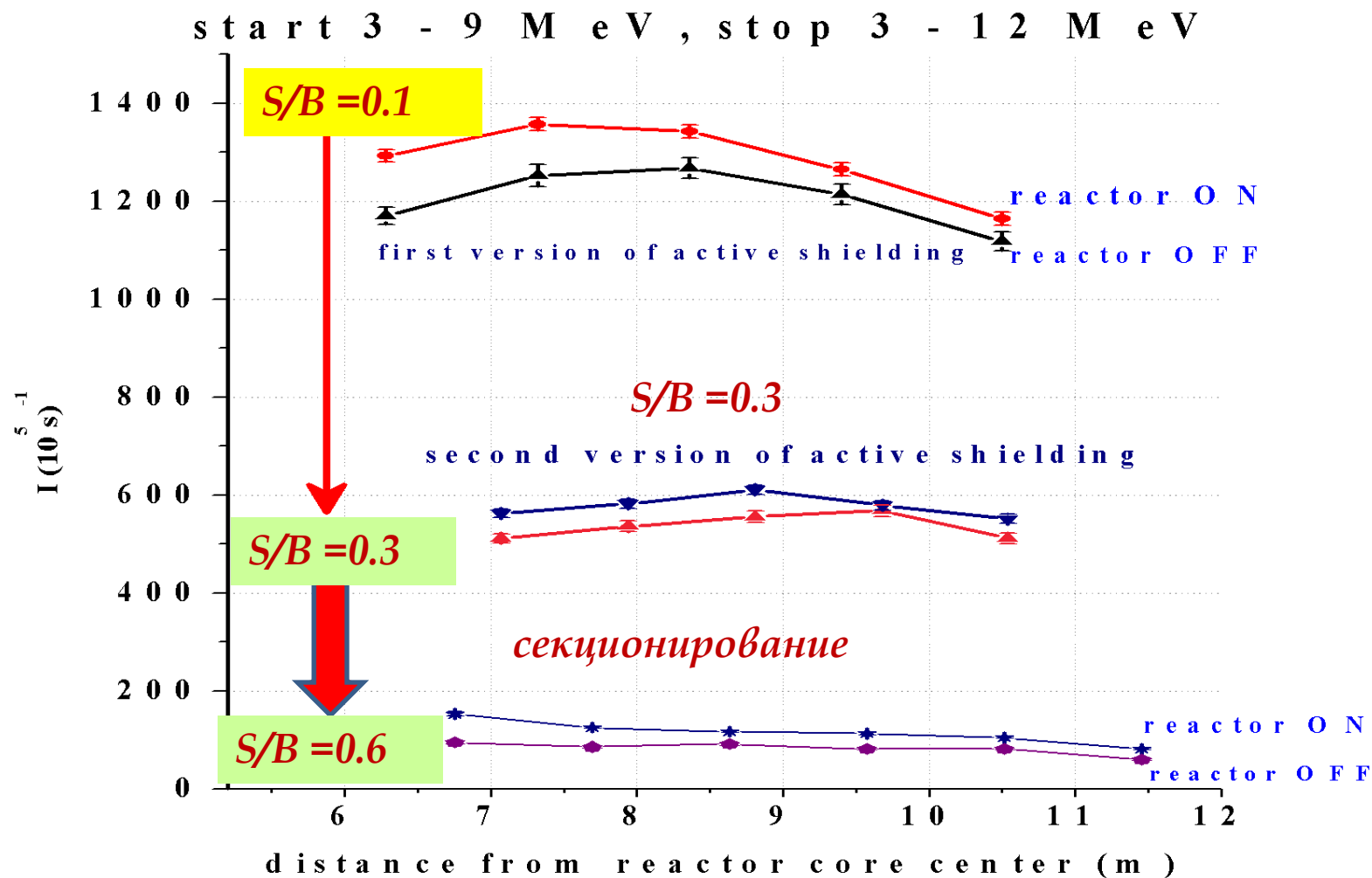
Из таблицы 2 видно, что введение условия на многосекционность задержанного сигнала позволило существенно (в 2.5 раза) снизить фон случайных совпадений, что привело к уменьшению общей относительной погрешности.

центральная ячейка, двойные совпадения e^+, γ одна ячейка	боковая ячейка, двойные совпадения e^+, γ одна ячейка	угловая ячейка, двойные совпадения e^+, γ одна ячейка	все ячейки, двойные совпадени я e^+, γ одна ячейка
0.424	0.294	0.188	0.372

*Доля мульти стартов.
Сравнение с расчётом.*

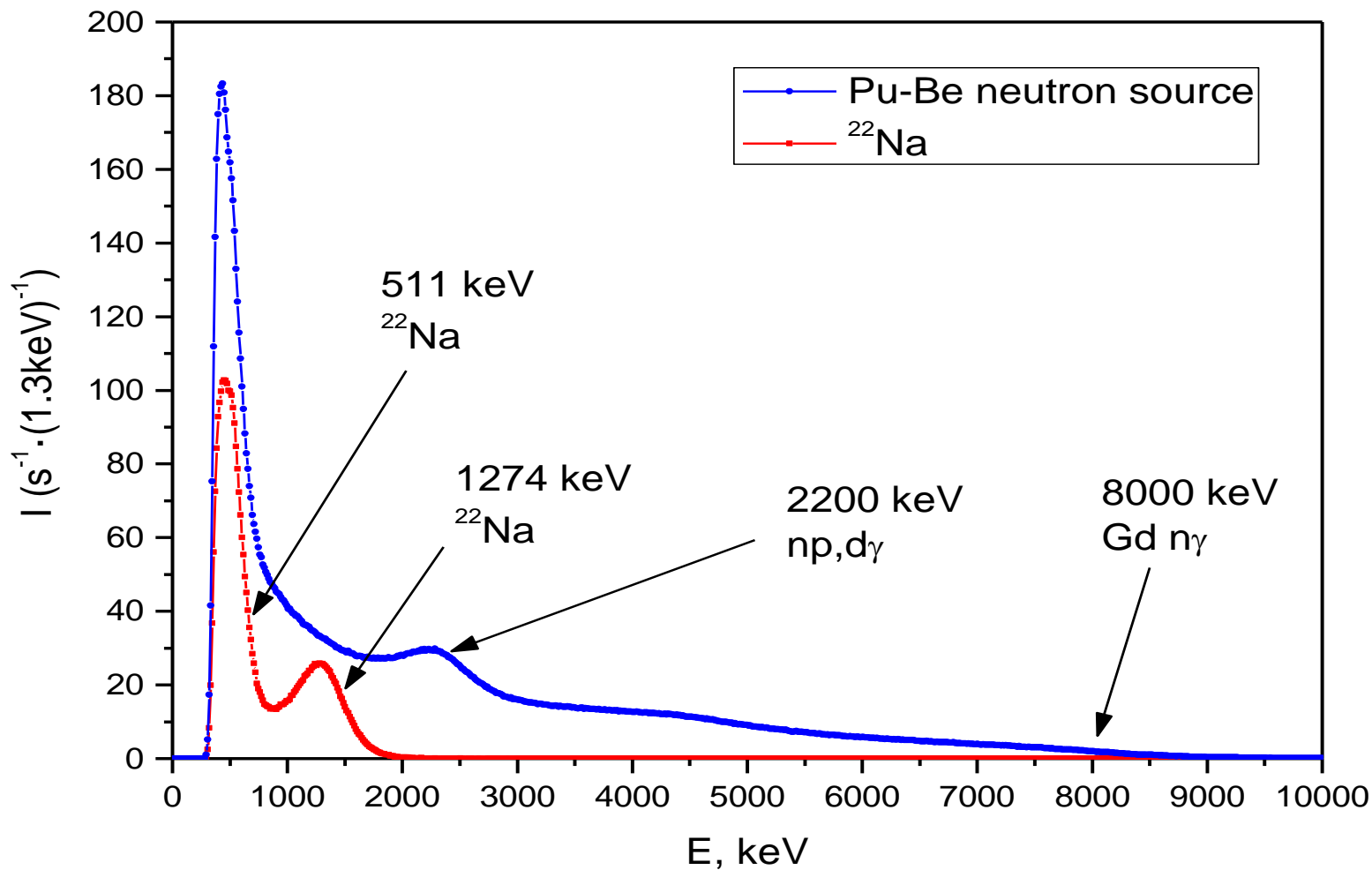


Улучшение отношения сигнал/фон за счёт секционирования



*Результаты измерения потока
антинейтрино от расстояния,
энергетическая калибровка и
спектры*

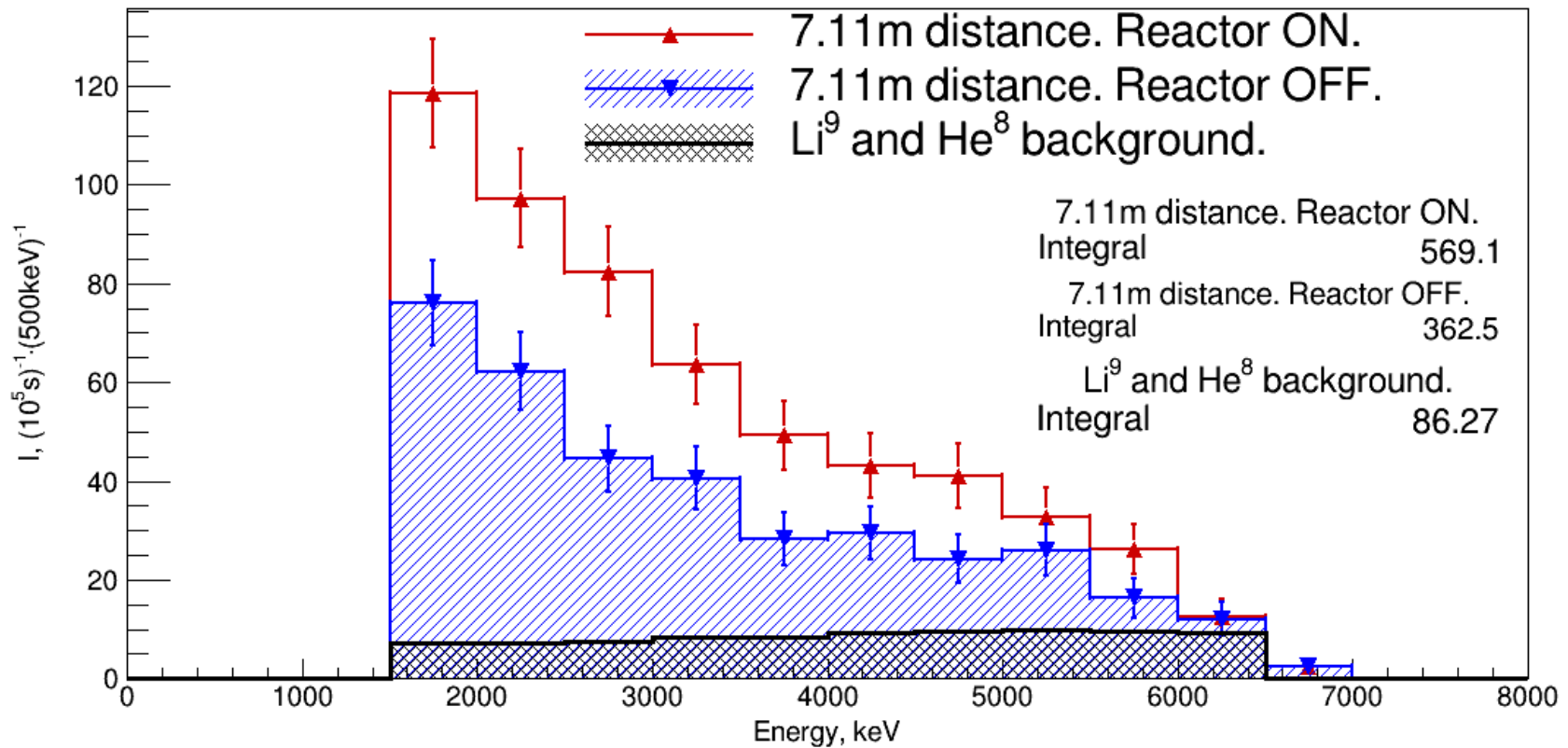
Энергетическая калибровка детектора



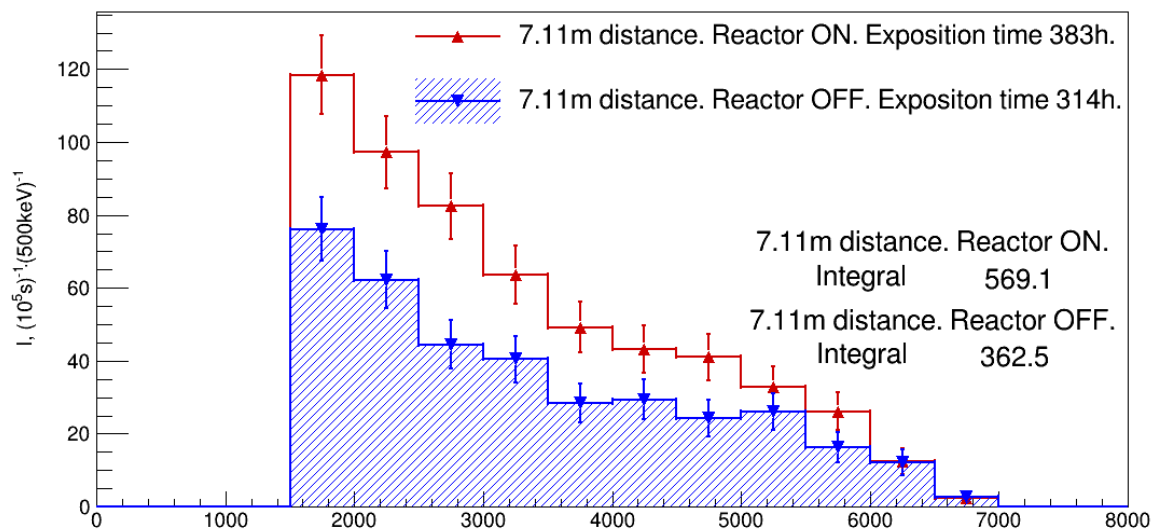
Пример набора данных за месяц.

178 полезных (ON – OFF) событий в сутки.

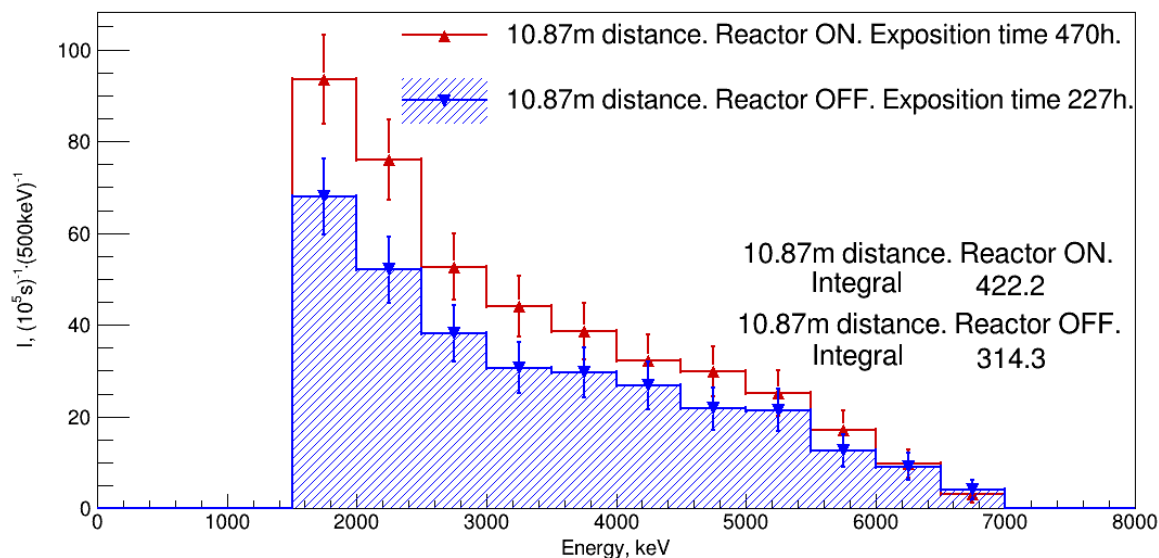
*Отношение эффект/фон (ON-OFF)/OFF = **0.57***



Отношение эффект/фон (ON-OFF)/OFF на разных расстояниях

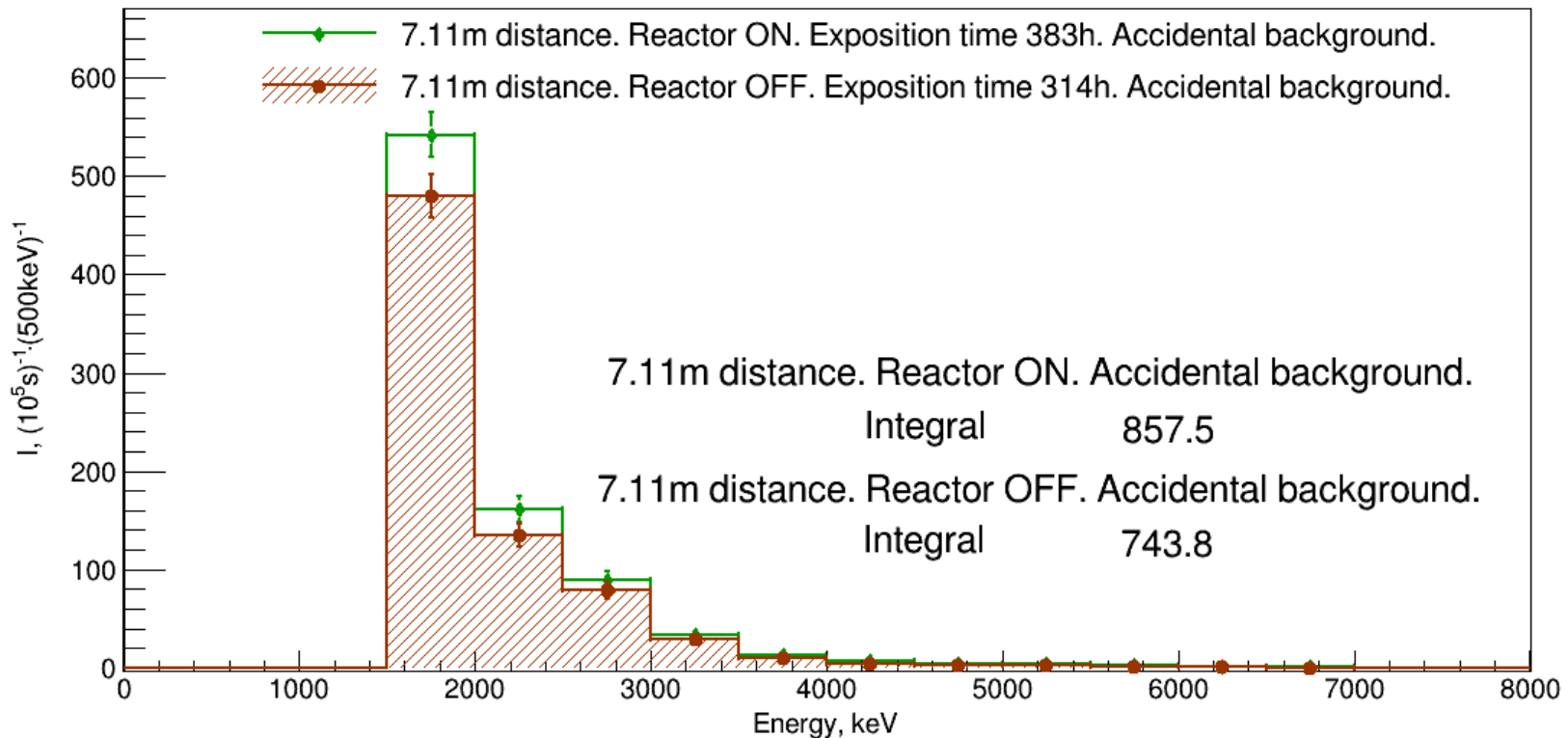


Расстояние - 7.11 метра.
Отношение эффект/фон
(ON-OFF)/OFF = **0.57**

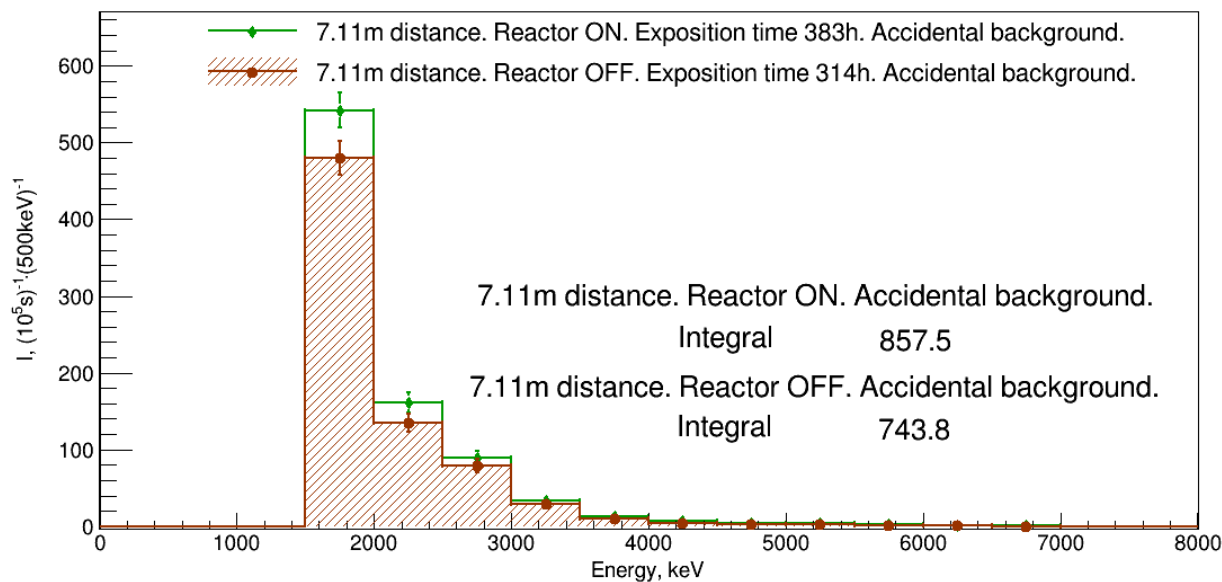


Расстояние - 10.87 метра.
Отношение эффект/фон
(ON-OFF)/OFF = **0.34**

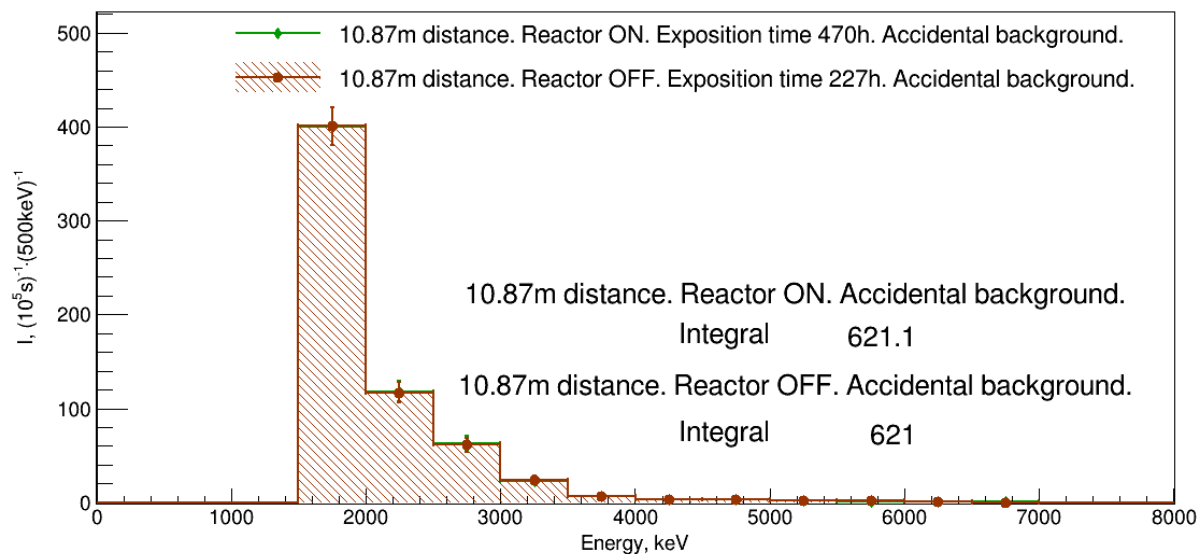
Фон случайных совпадений. Спектральная зависимость.



*Фон случайных совпадений. Спектральная зависимость.
Разные расстояния и мощность реактора.*

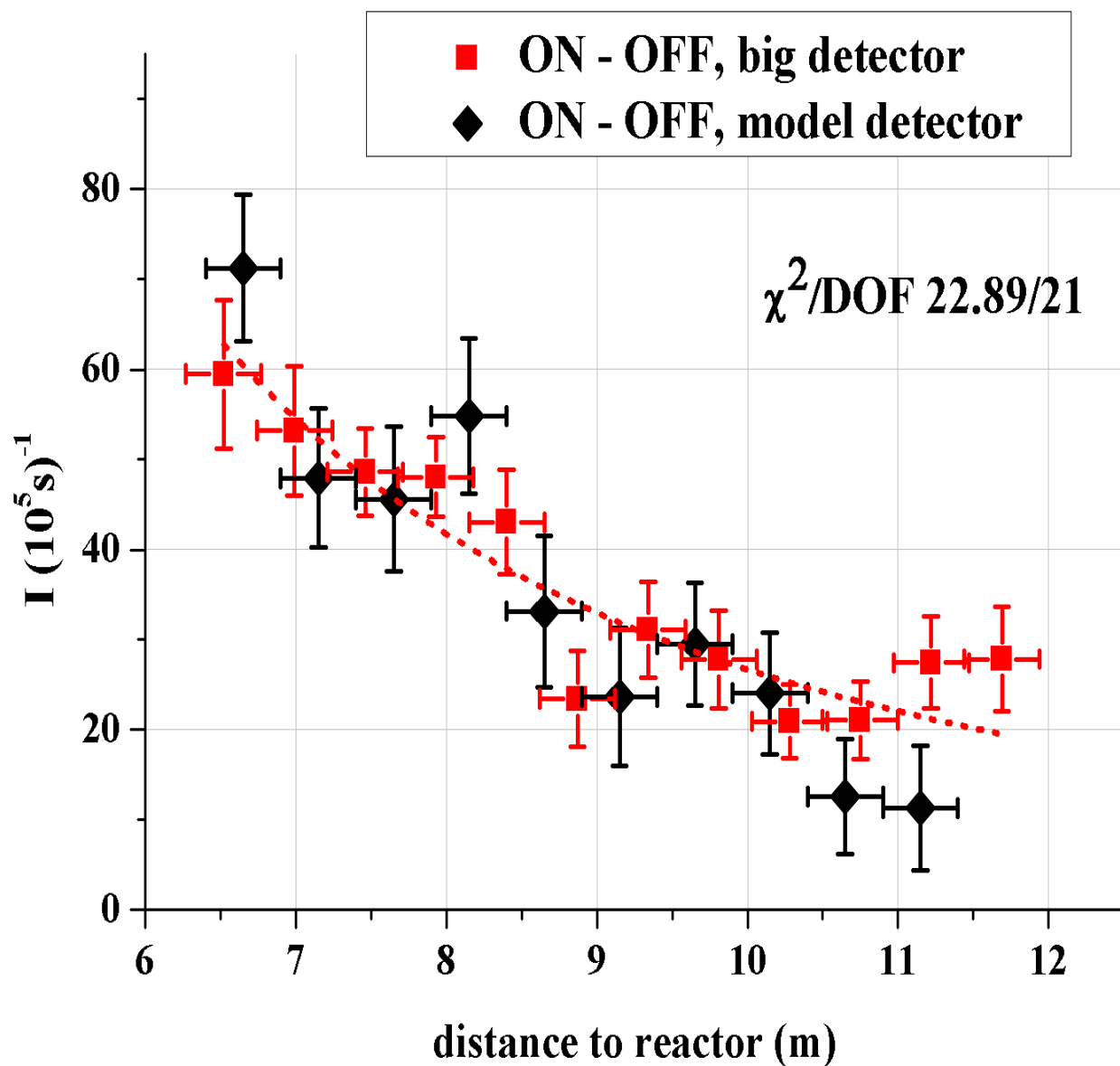


7.11 метра

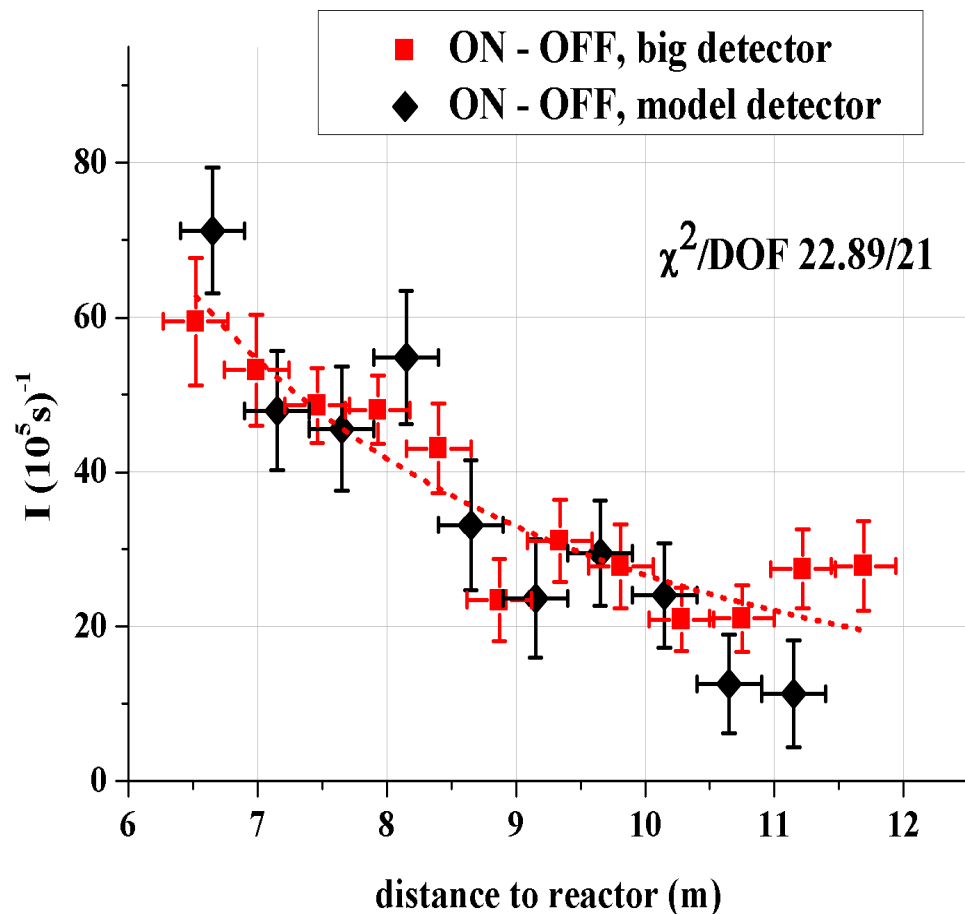


10.87 метра

Результаты измерений потока антинейтрино от расстояния



Измерения потока антинейтрино от реактора на малых расстояниях (6-12 метров) от центра исследовательского реактора проведены впервые.

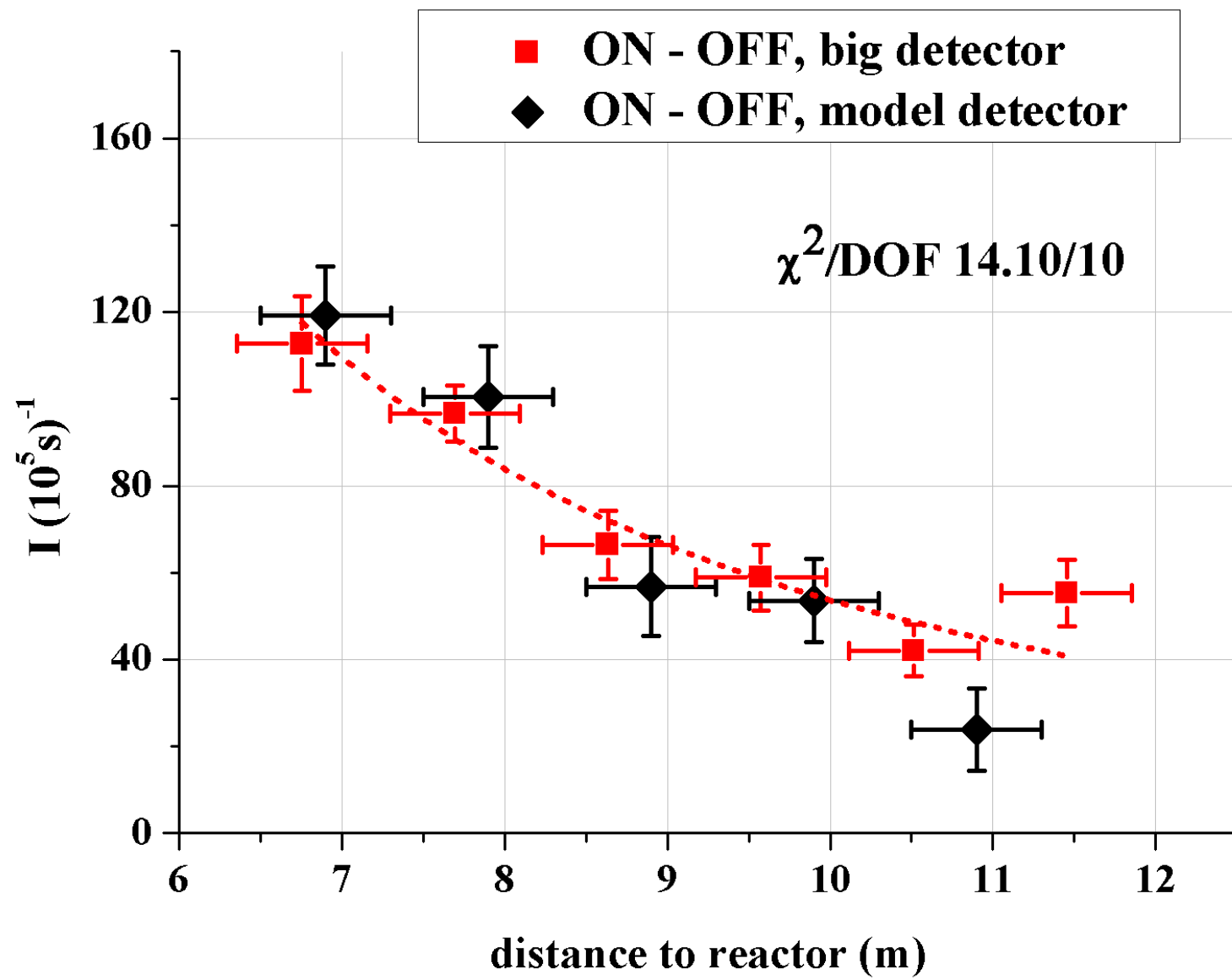


В рамках доступной статистической точности не обнаружено очевидных отклонений от зависимости $1/L^2$, где L – расстояние от центра активной зоны реактора.

Результаты в диапазоне 10-12 метров требуется повторить с большей точностью.

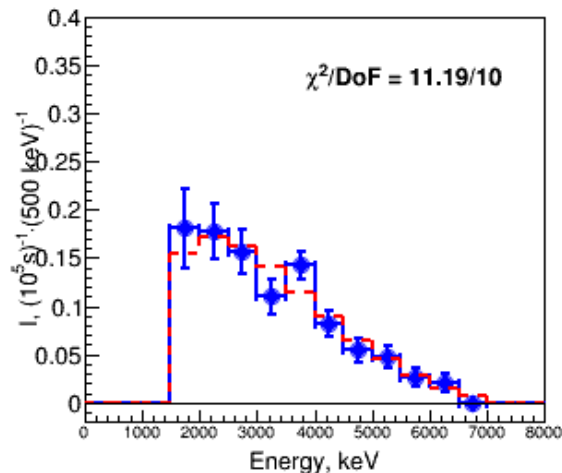
Измерения с включённым реактором выполнены в течение 111 суток. Измерения с выключённым реактором выполнены в течение 74 суток. Всего было 15 включений и выключений реактора.

Измерения продолжаются.

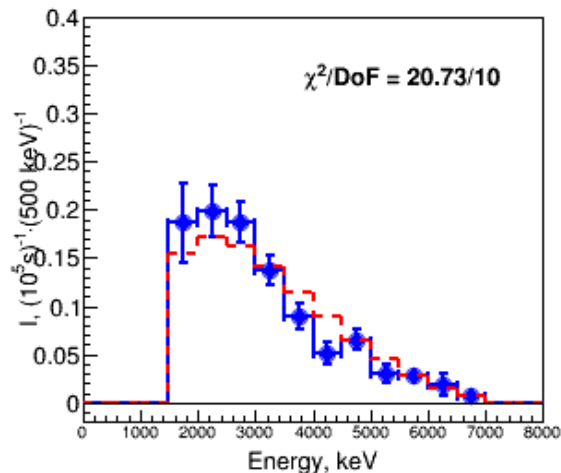


Спектры мгновенных сигналов для разных расстояниях

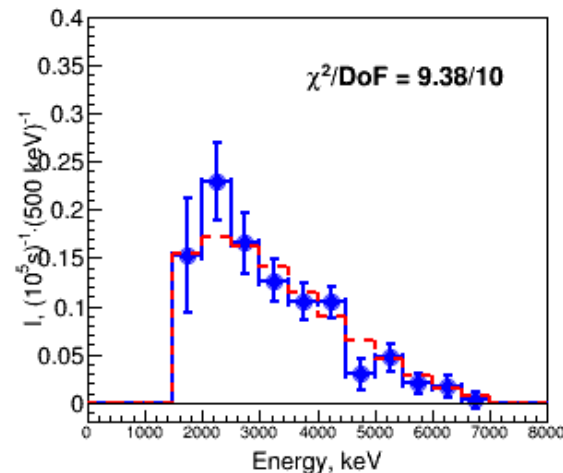
6.8m from reactor



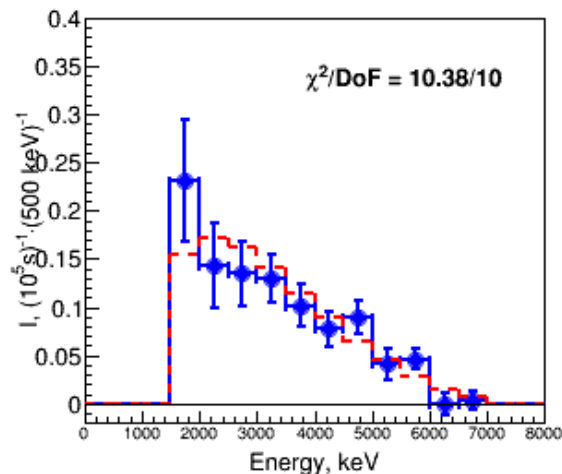
7.8m from reactor



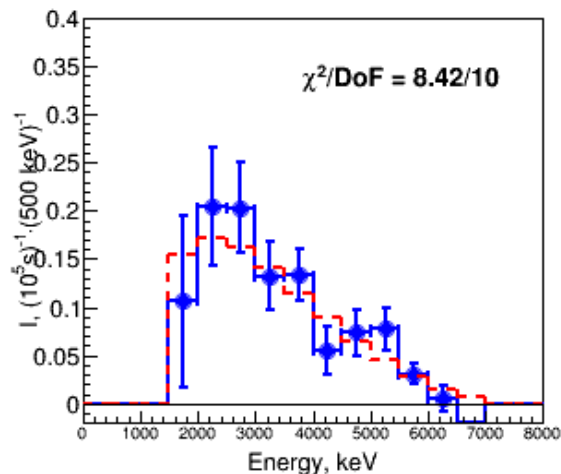
8.8m from reactor



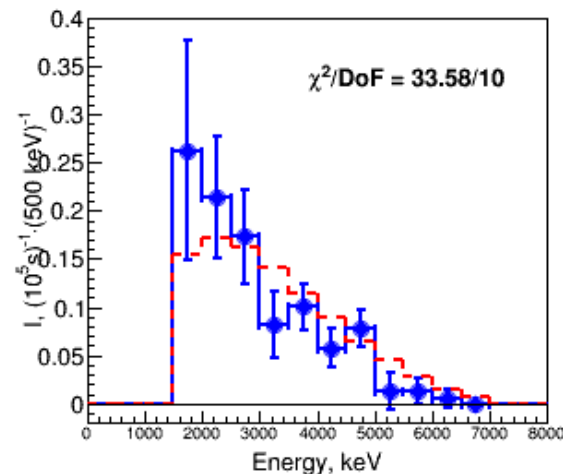
9.7m from reactor



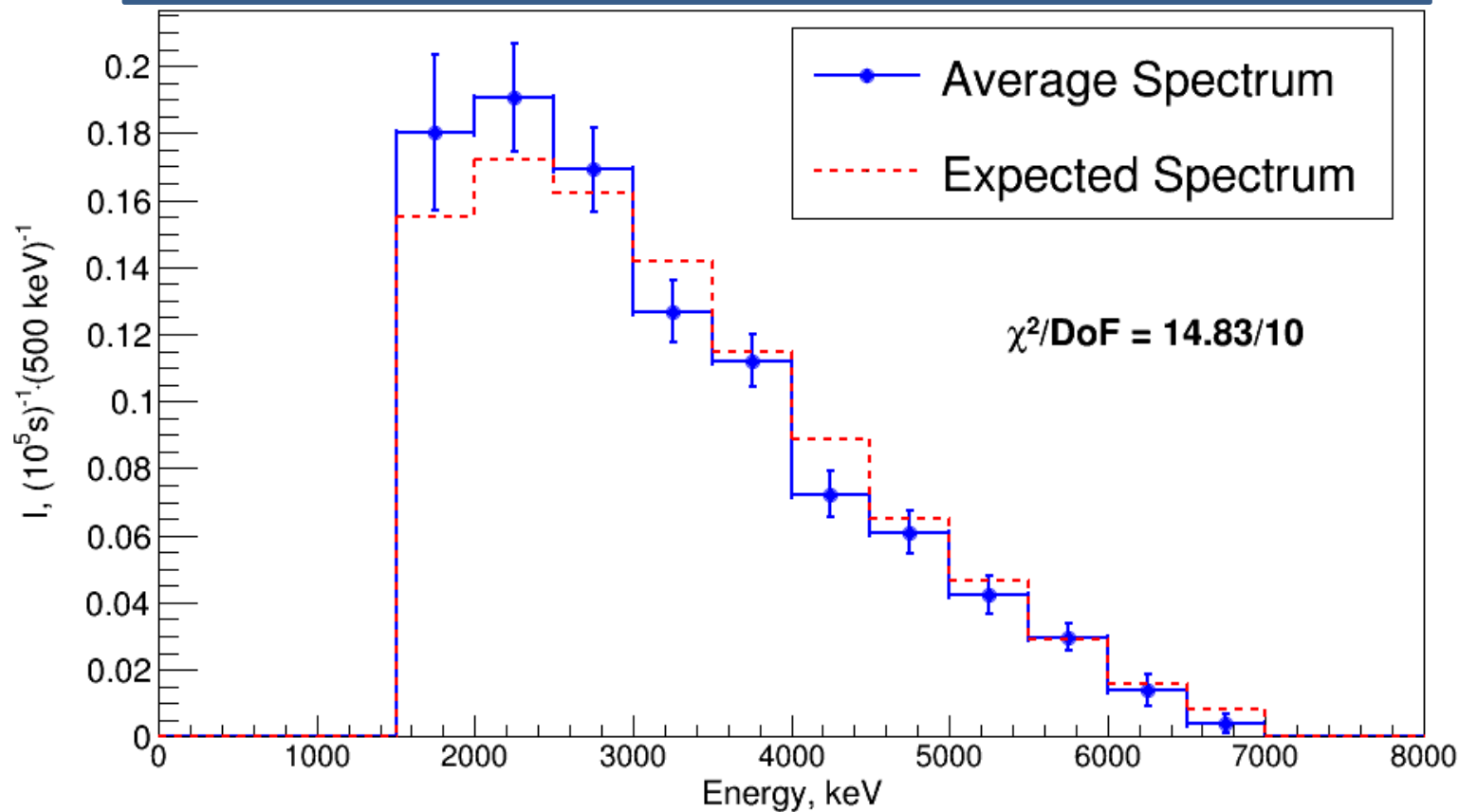
10.7m from reactor



11.5m from reactor



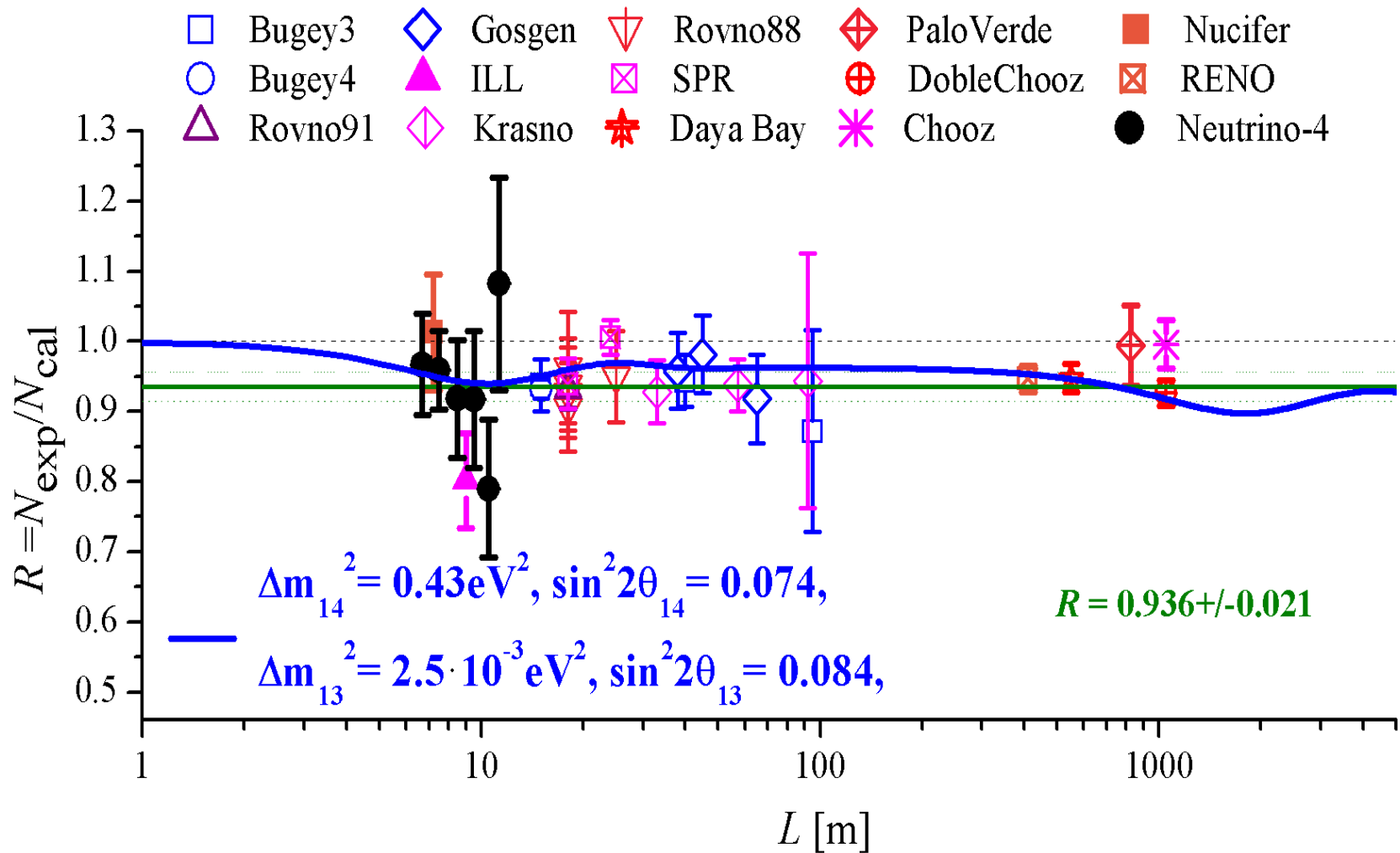
Спектры, усреднённые по всем расстояниям



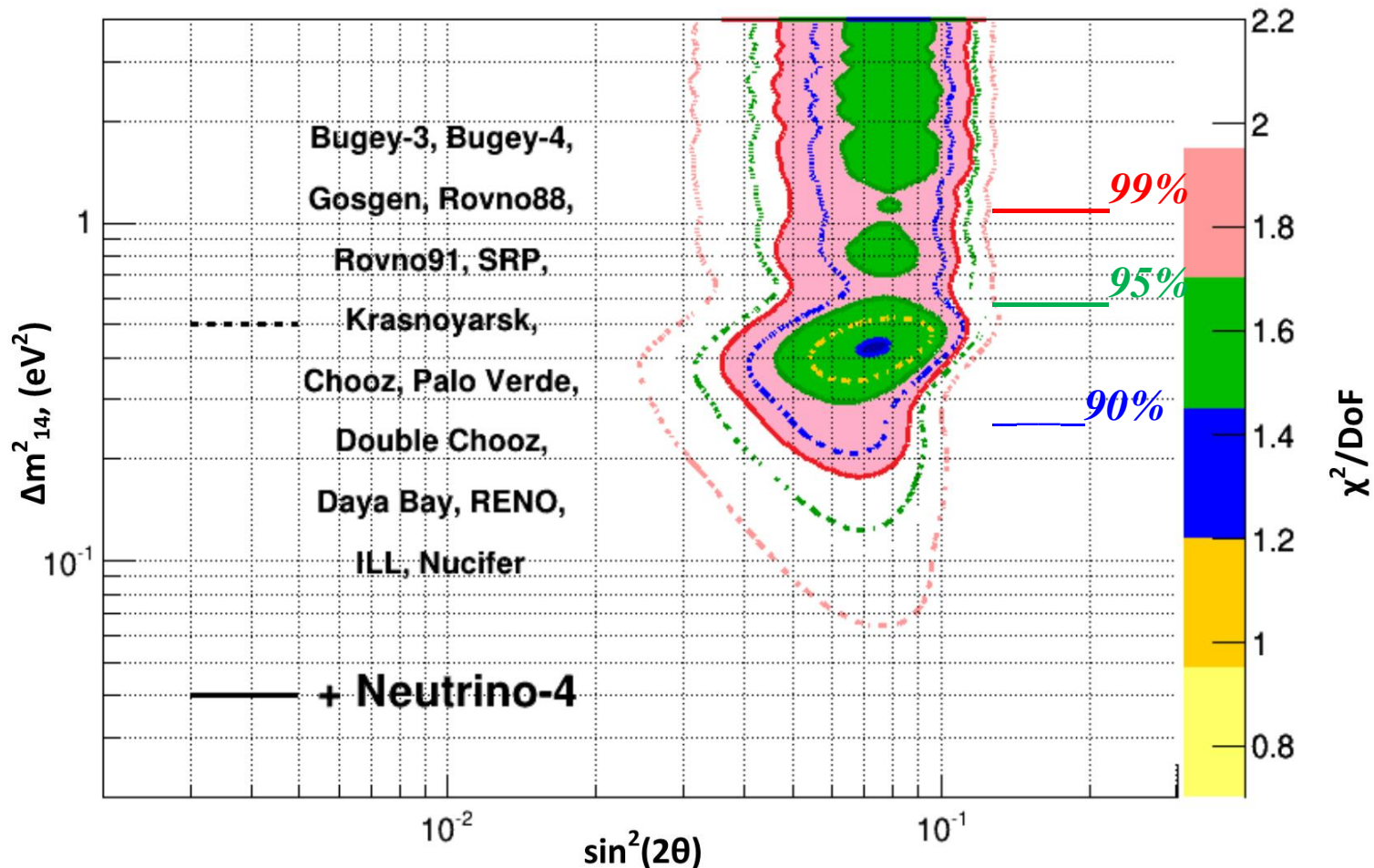
Сравнение с данными на больших расстояниях (привязка относительных измерений к абсолютным)

Поскольку эффективность нашего многосекционного детектора к регистрации антинейтрино не может быть рассчитана с достаточной точностью, наши данные нормированы по среднему значению на общепринятое отношение 0.936, т.е. на отношение измеренного потока реакторных антинейтрино к расчётному потоку. Напомним, что в нашем эксперименте благодаря методу передвижного детектора ставится задача относительных измерений и поиска отклонения от закона $1/L^2$, а также поиска вариации формы спектра из-за процесса осцилляций в стерильное состояние.

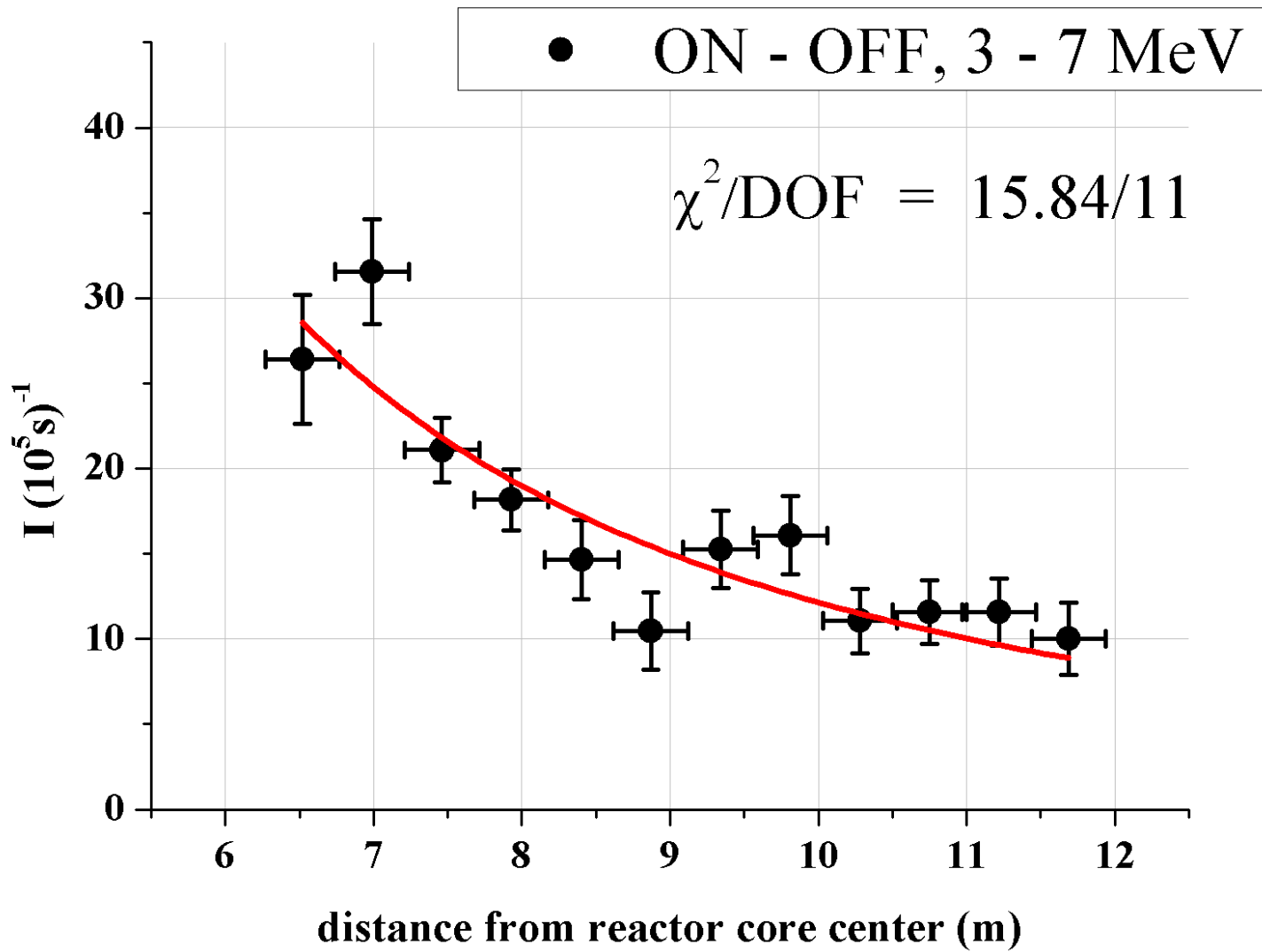
*Глобальный фит на осцилляции, используя все известные данные
+ данные НЕЙТРИНО-4*

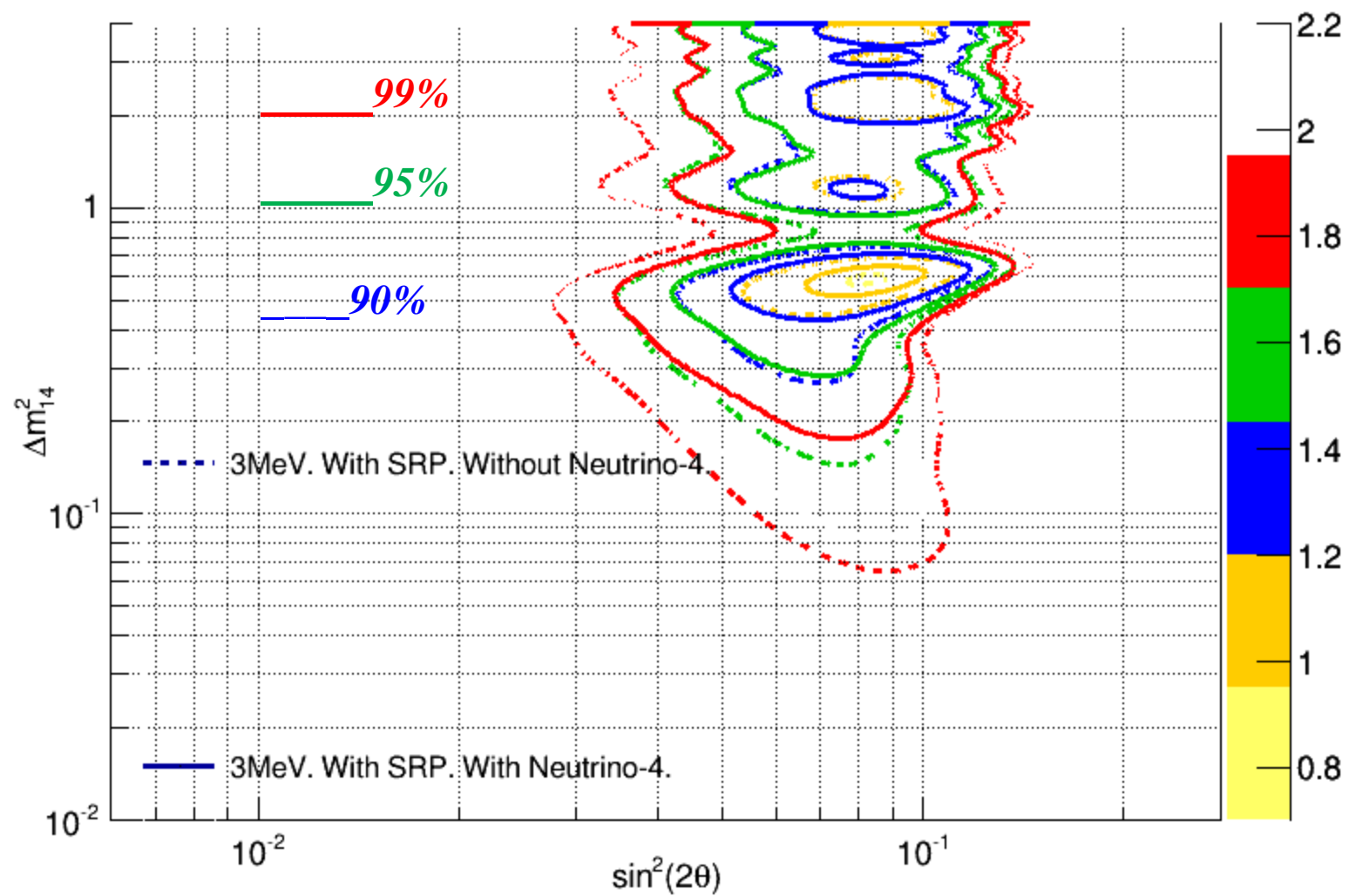


Анализ на параметры модели с одним стерильным нейтрино, используя набор наших данных Нейтрино-4, данных ILL и Nucifer на малых расстояниях, а также всех известных данных при больших расстояниях.



Анализ на параметры модели с одним стерильным нейтрино, используя набор наших данных Нейтрино-4, данных ILL и Nucifer на малых расстояниях, а также всех известных данных при больших расстояниях представлен сплошными линиями. Для сравнения представлен такой же анализ без учёта данных Нейтрино-4 штрих-пунктирными линиями. Из-за добавления новых данных и увеличения числа степеней свободы использован приведенный Хи-квадрат, с учётом неравноточности измерений.





ν counting rate dependence on distance from reactor core

D
A
N
S
S

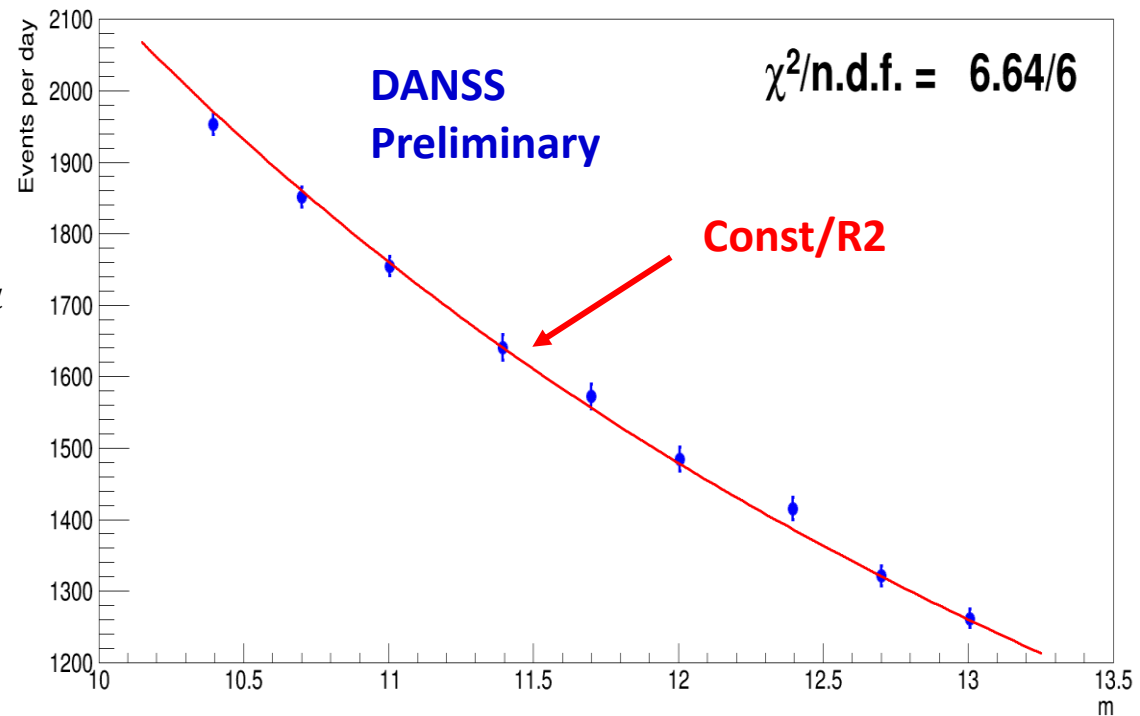
Detector was split into 3 sections along z ($\sim 30\text{cm}$ each)

Each section has 3 positions – up, middle, down

Normalization (efficiency) for central section is a fit parameter

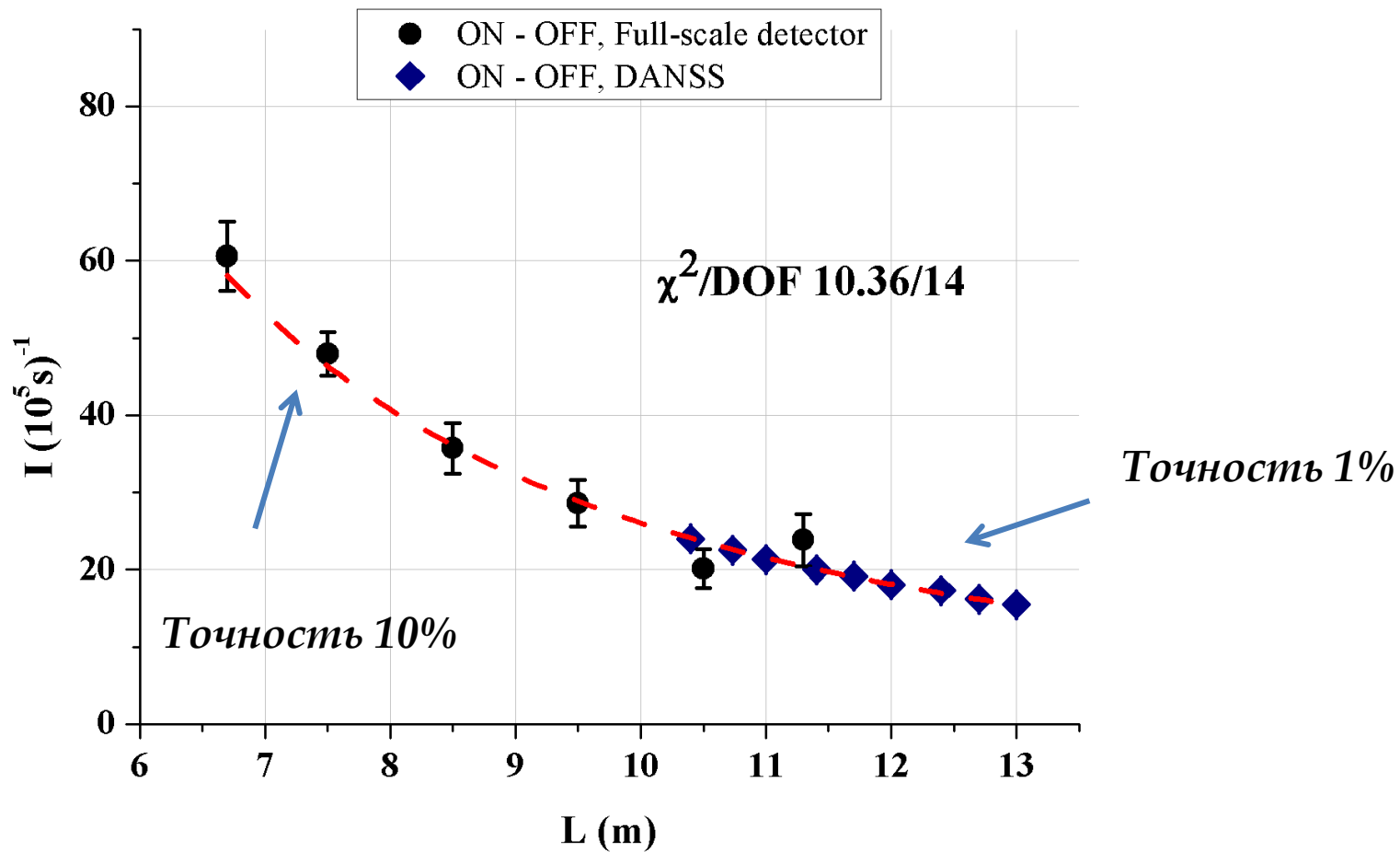
Difference in efficiencies of central and 2 other sections are also fit parameters

*Данные предоставлены
М.В. Даниловым*

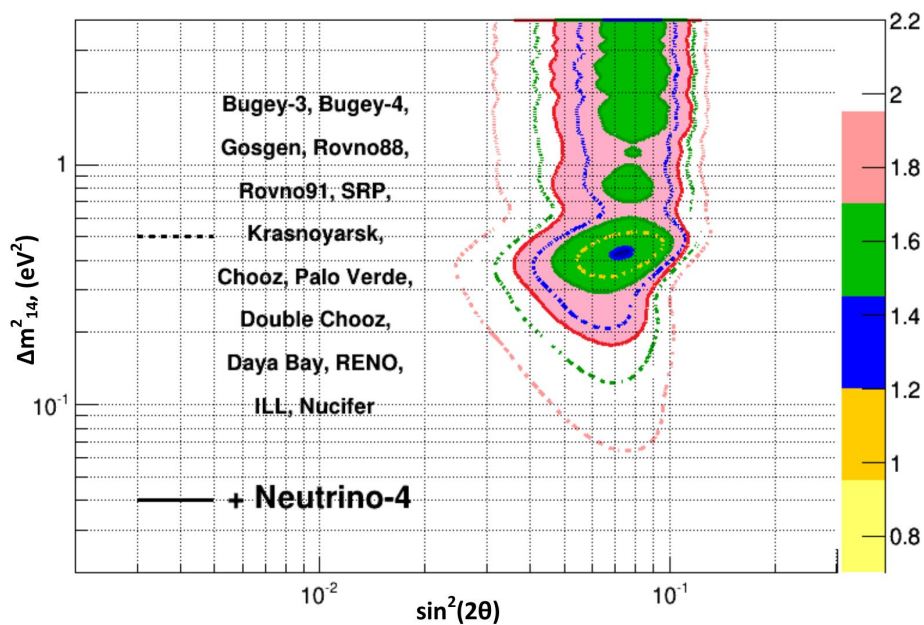


Perfect agreement with $1/R^2$ dependence

*Данные НЕЙТРИНО-4 и DANSS совместно.
(Сопряжены в области перекрытия данных).*

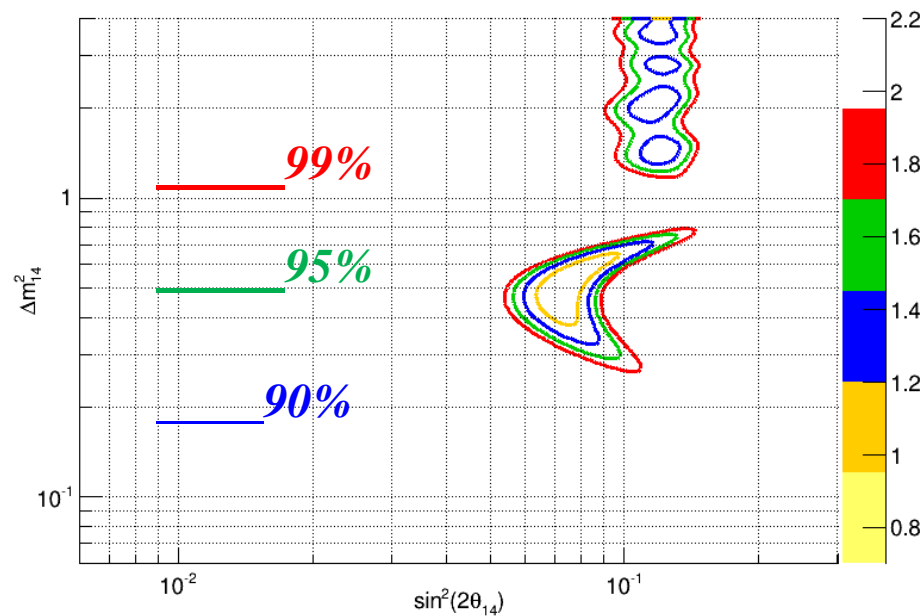


Подключение данных DANSS стягивает область параметров по $\sin^2 2\theta_{14}$, но не ограничивает по Δm_{14}^2



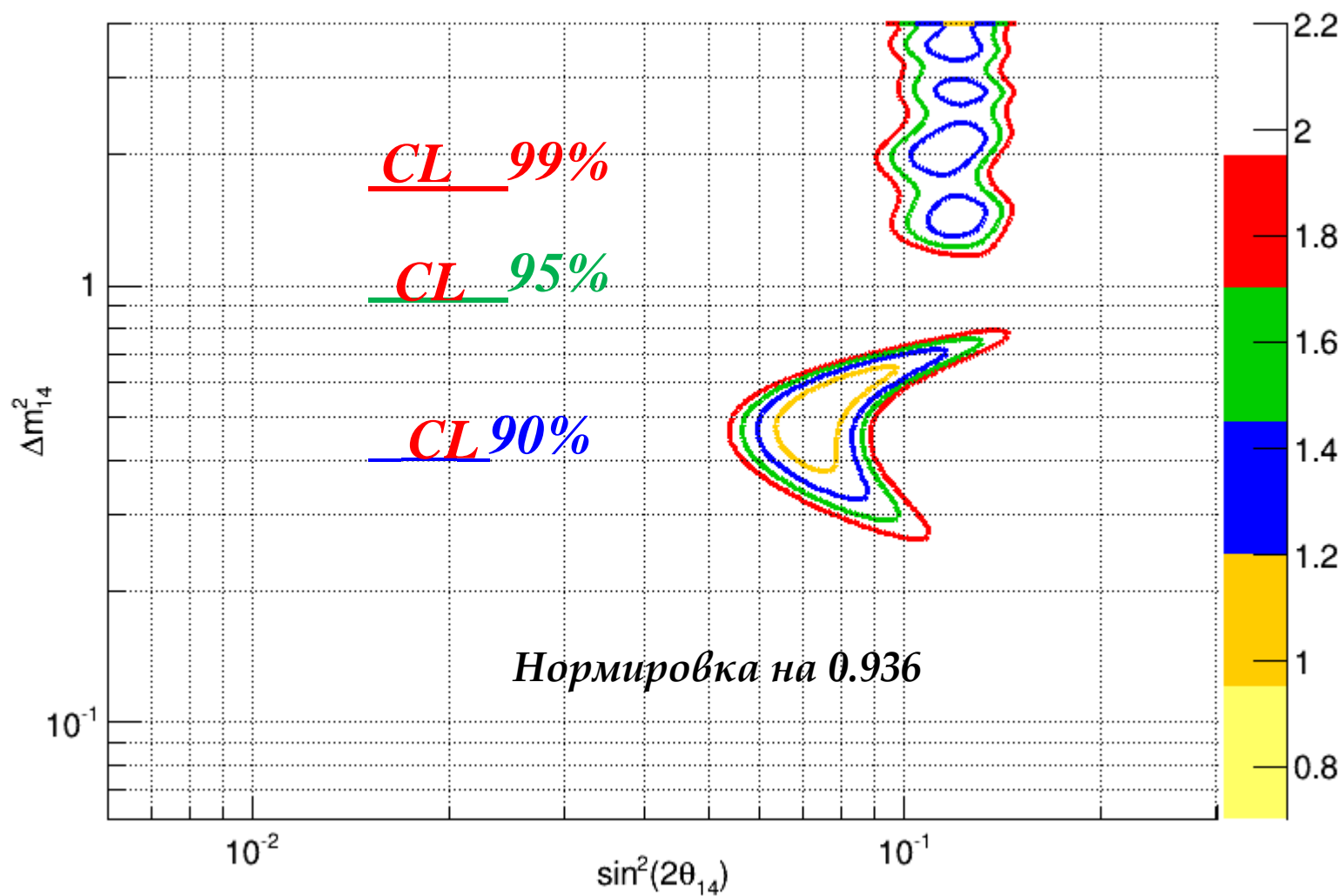
$$\Delta m_{14}^2 \geq 0.2 \text{ eV}^2$$

1.5 - 7MeV. Global fit with DANSS and Neutrino-4.

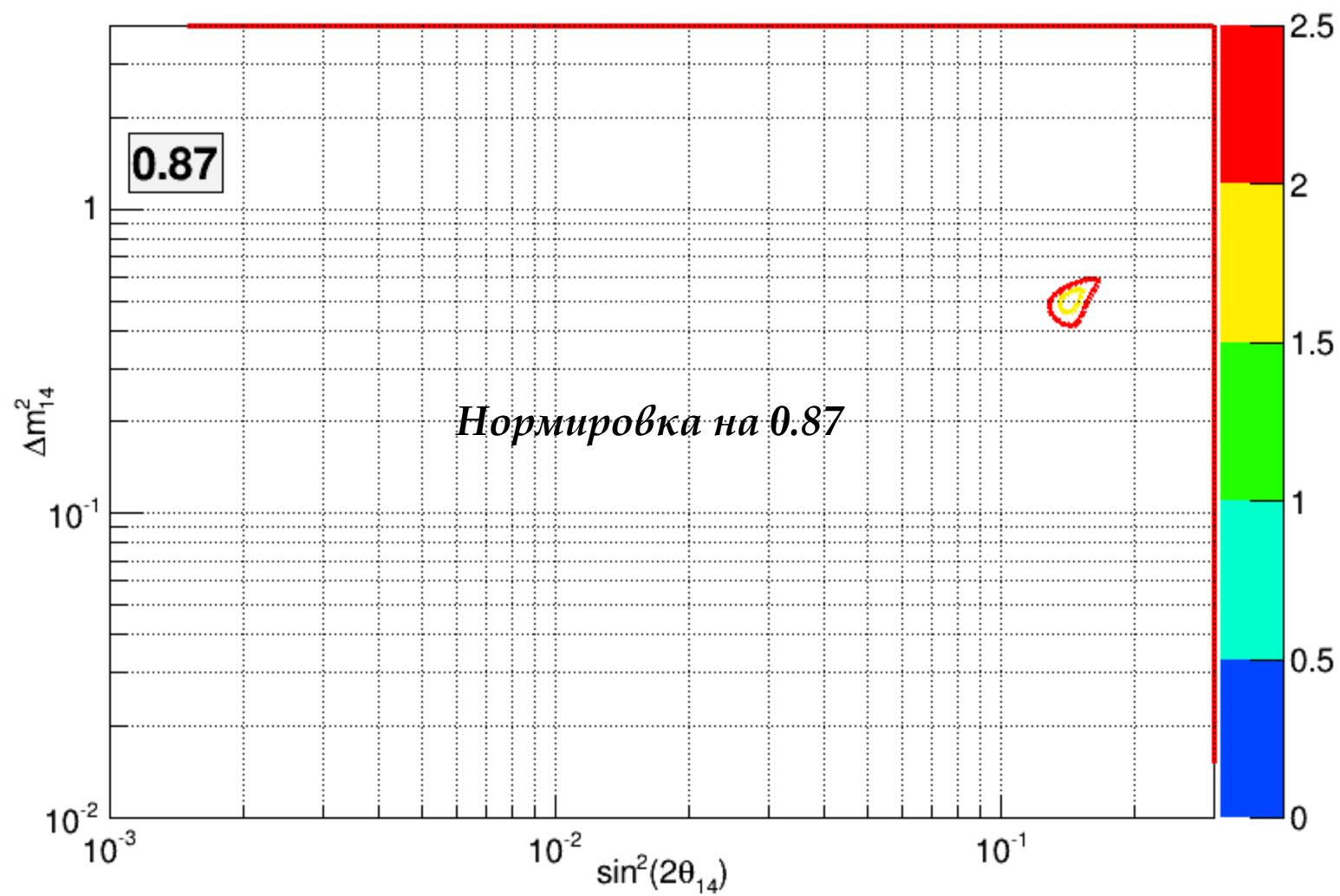


Нормировка на 0.936

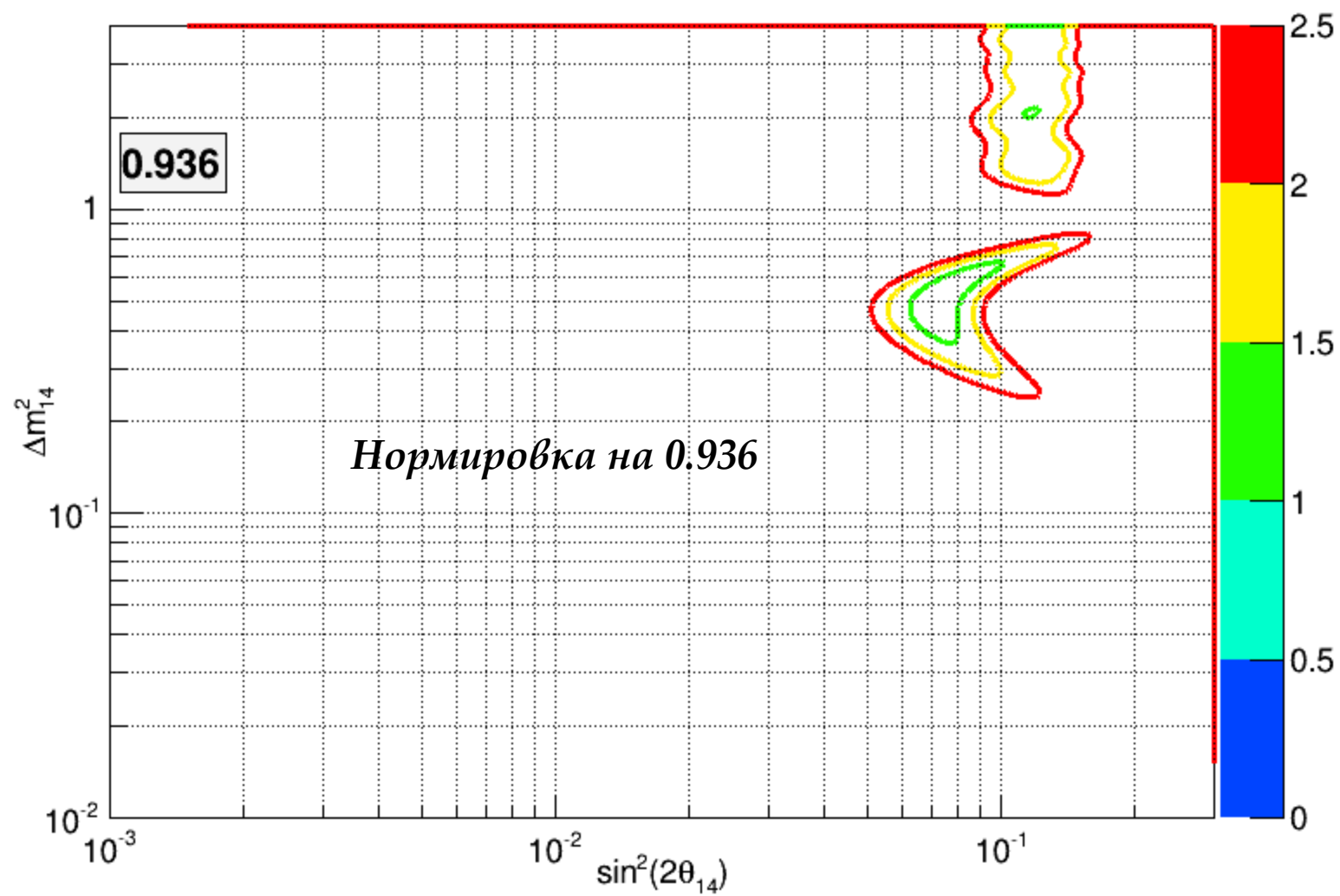
1.5 - 7MeV. Global fit with DANSS and Neutrino-4.



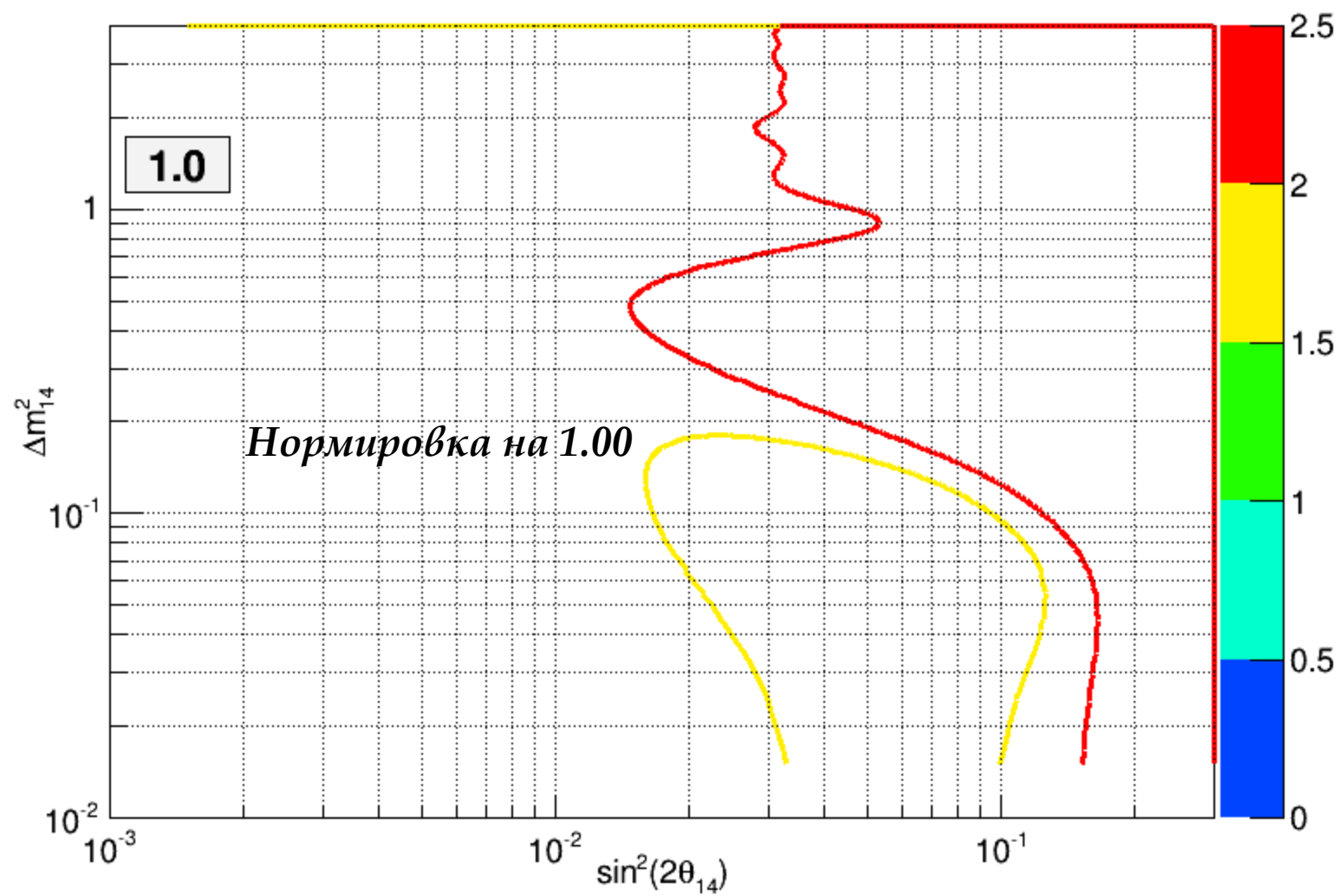
χ^2 with Daya Bay, RENO, Nucifer, ILL, DANSS, Neutrino-4



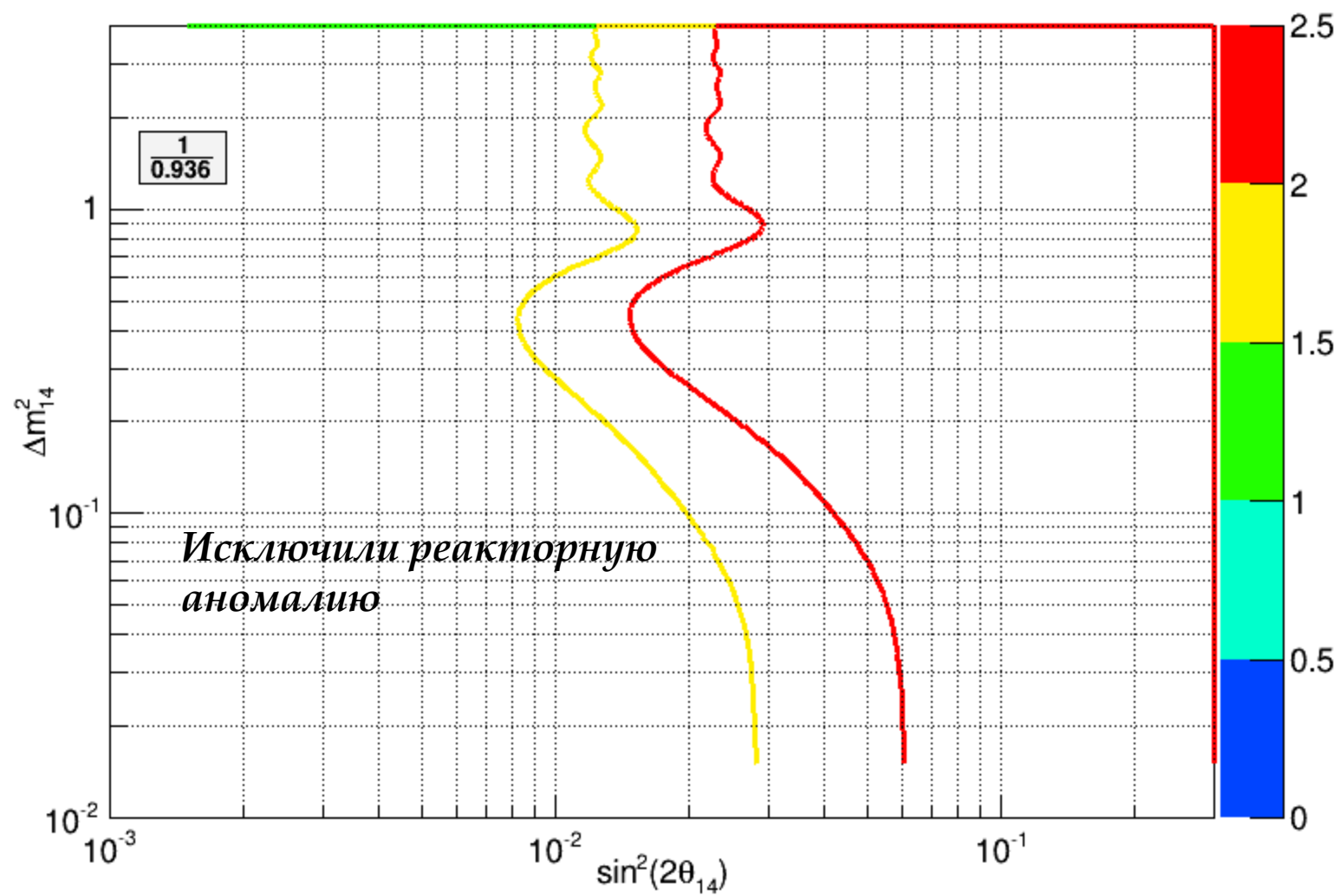
χ^2 with Daya Bay, RENO, Nucifer, ILL, DANSS, Neutrino-4



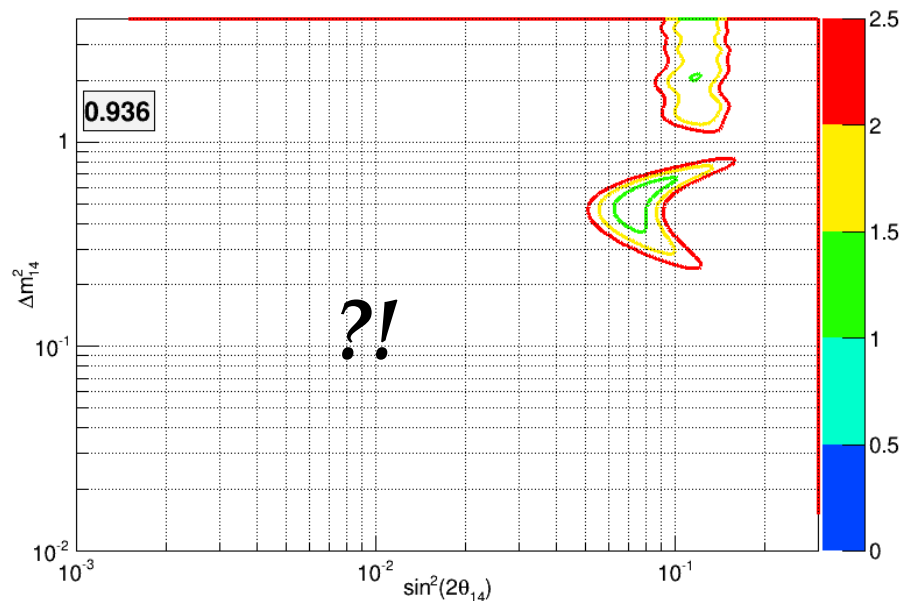
χ^2 with Daya Bay, RENO, Nucifer, ILL, DANSS, Neutrino-4



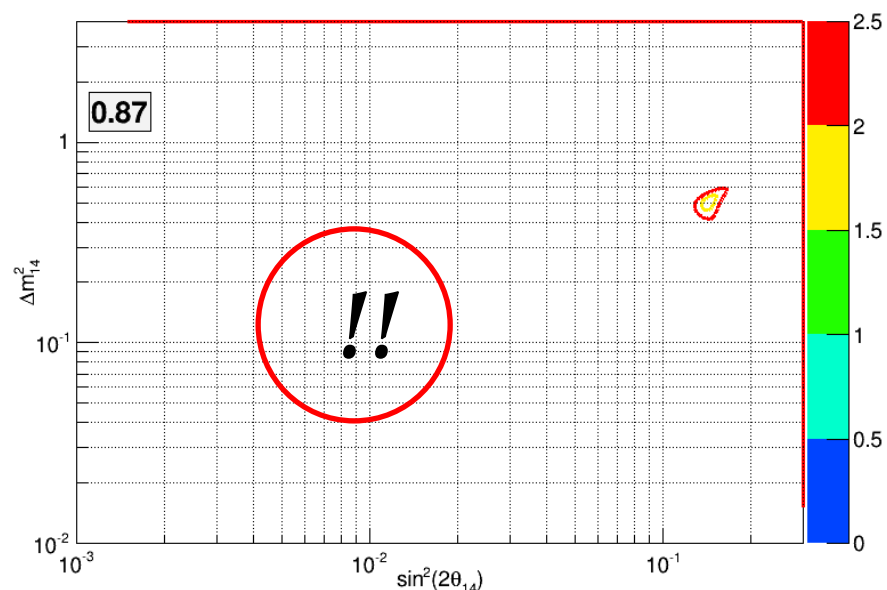
χ^2 with Daya Bay, RENO, Nucifer, ILL, DANSS, Neutrino-4



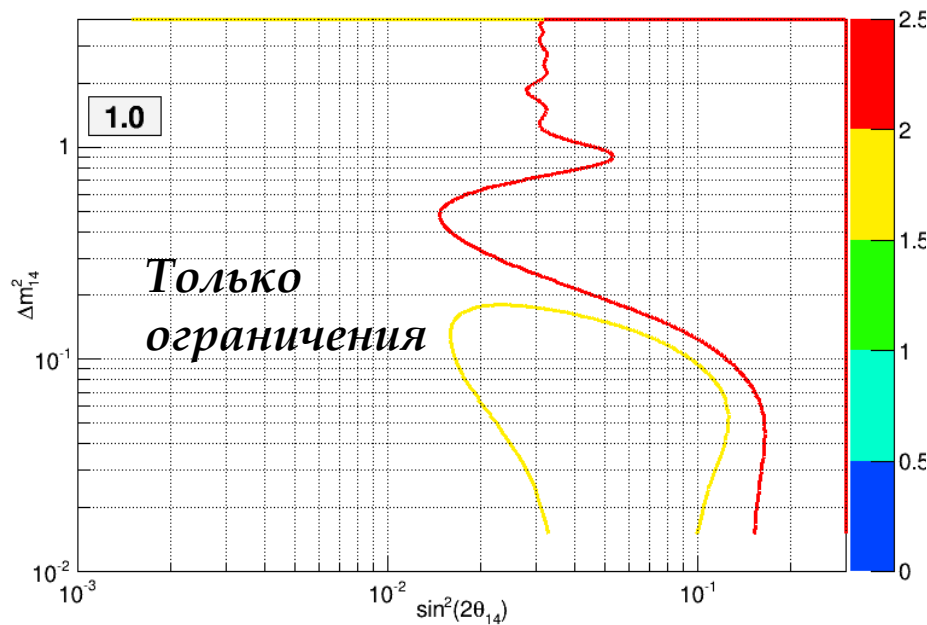
χ^2 with Daya Bay, RENO, Nucifer, ILL, DANSS, Neutrino-4



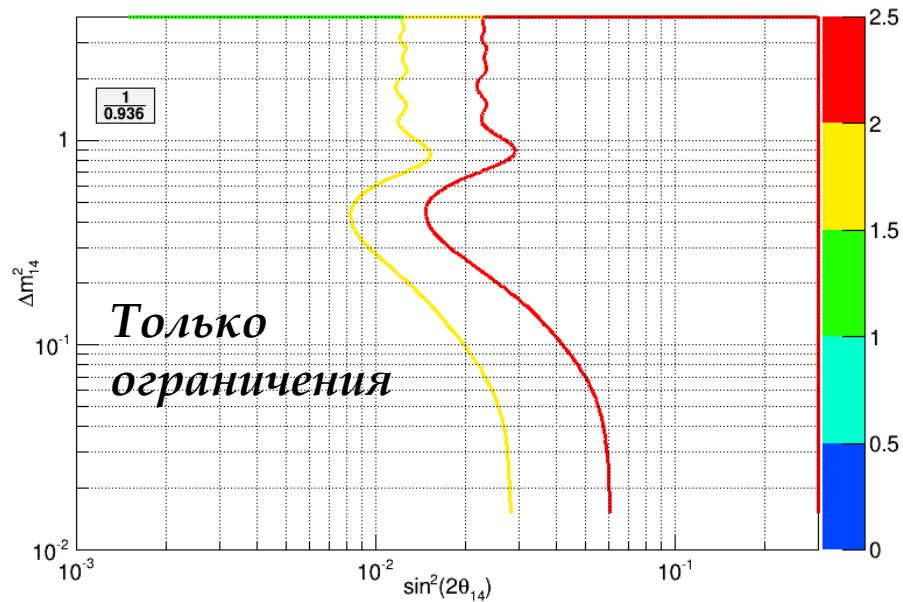
χ^2 with Daya Bay, RENO, Nucifer, ILL, DANSS, Neutrino-4

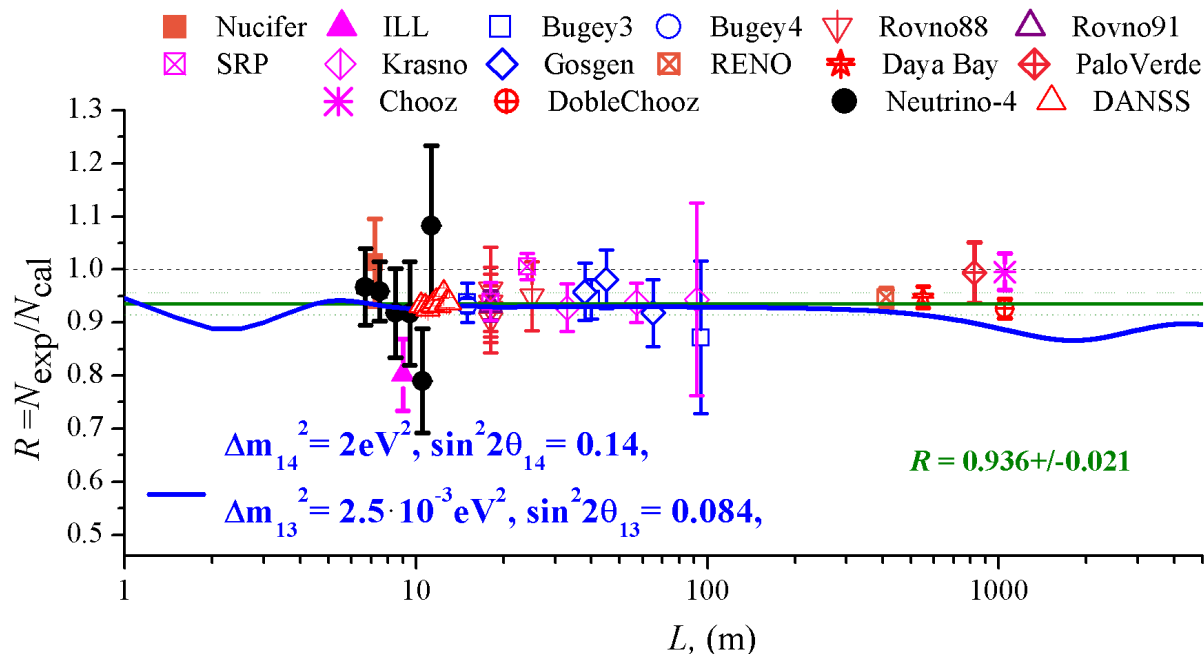


χ^2 with Daya Bay, RENO, Nucifer, ILL, DANSS, Neutrino-4

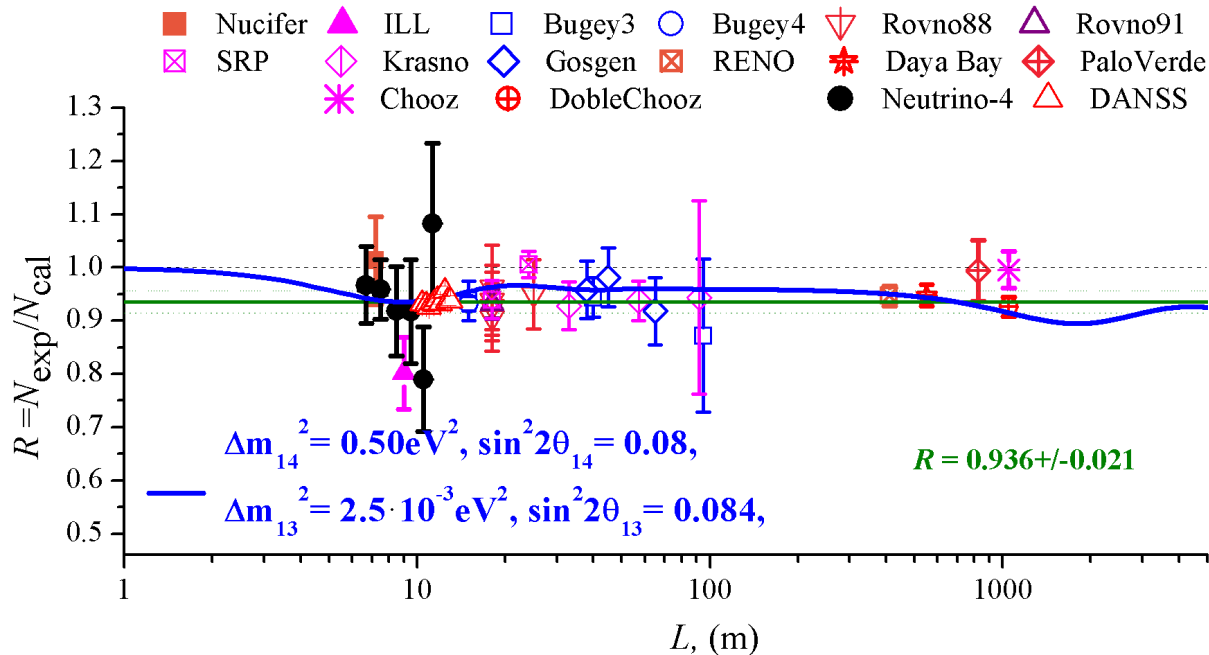


χ^2 with Daya Bay, RENO, Nucifer, ILL, DANSS, Neutrino-4

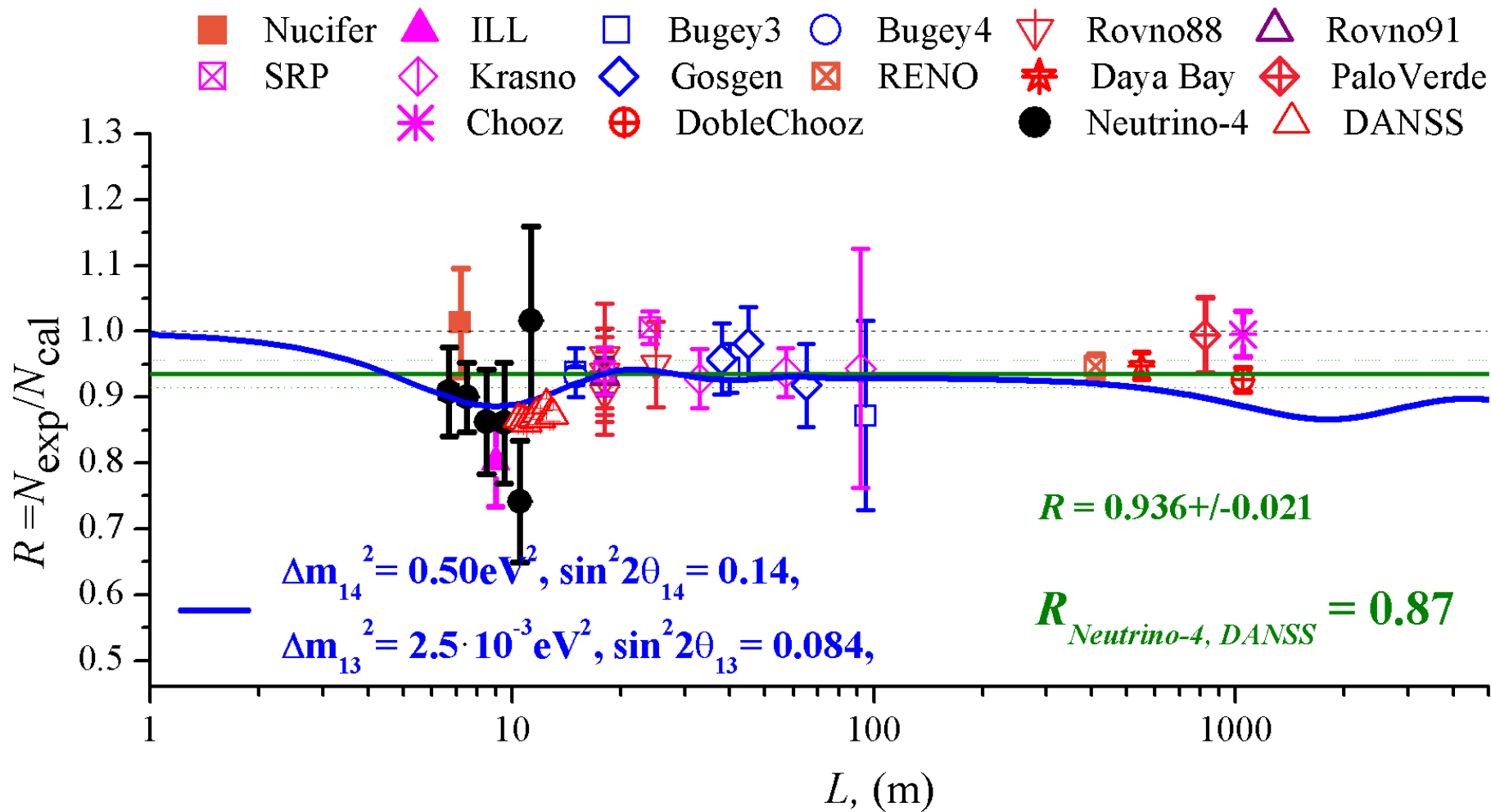




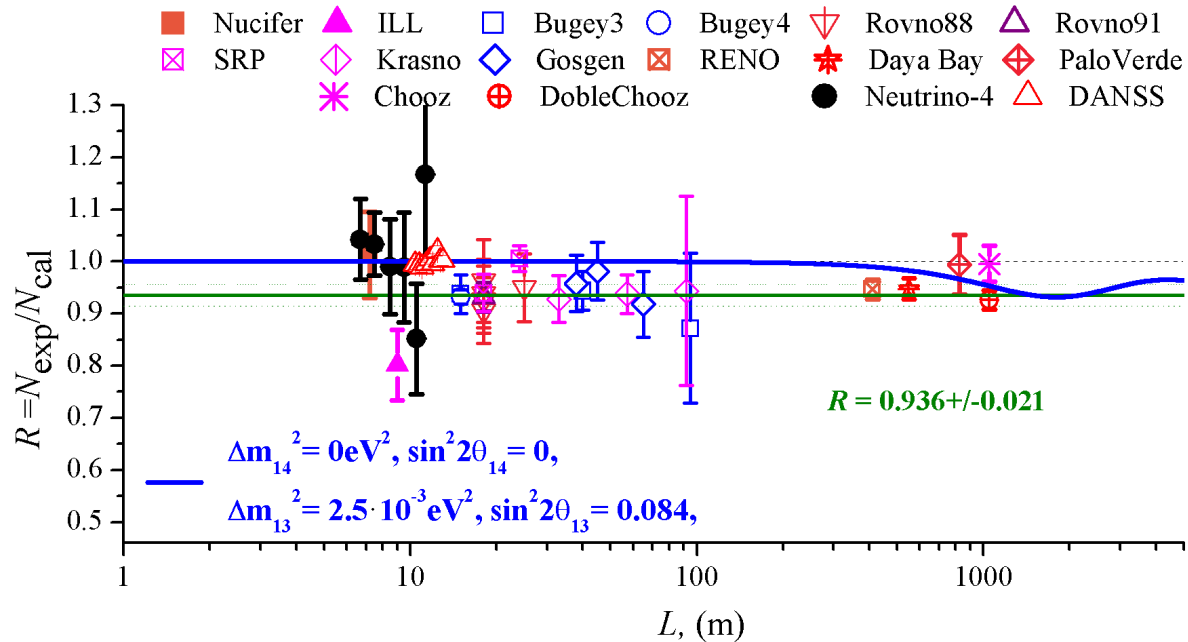
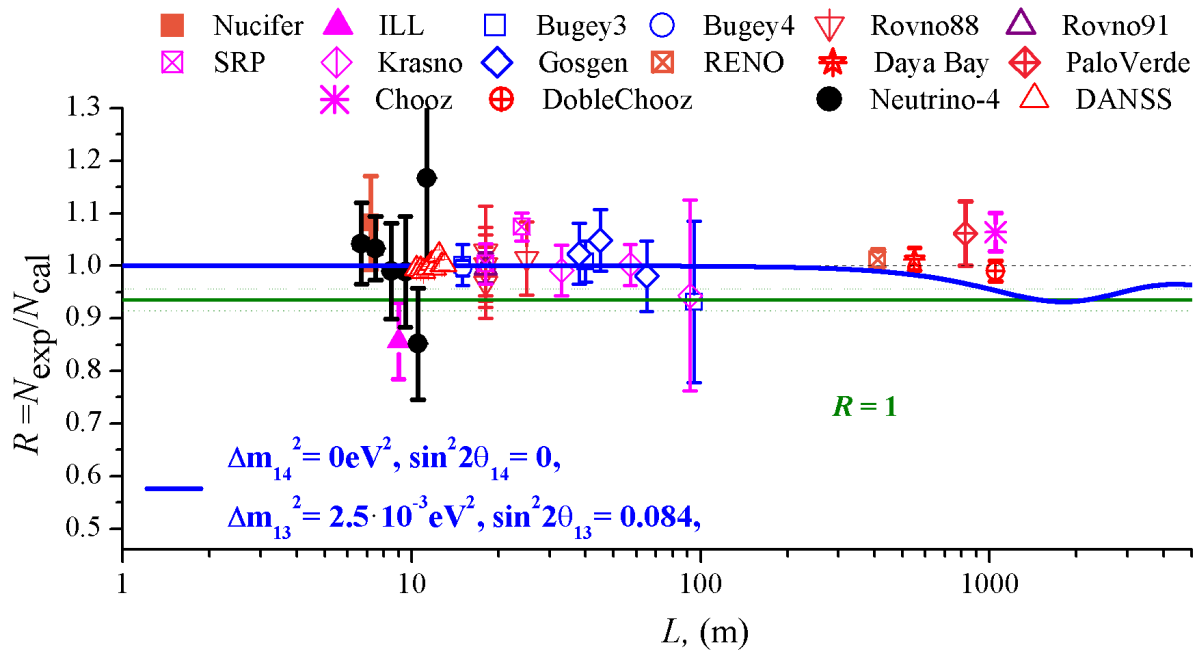
**ВОЗМОЖНО,
НО
осцилляции
внутри
защиты**



**ВОЗМОЖНО,
И
наблюдаемо
осцилляции
за защитой**



ВОЗМОЖНО НАБЛЮДЕНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ
но осцилляции вне защиты, НУЖНЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДО 15 – 20 метров



Выводы по результатам первых измерений

1. Впервые измерена зависимость потока антинейтрино на малых расстояниях

(6 – 12 м) до центра реактора.

2. В рамках имеющейся статистической точности не обнаружено достоверных отклонений от закона $1/R^2$, где R – расстояние до центра реактора.

3. Проведённый анализ в рамках модели стерильного нейтрино не закрывает возможность существования стерильного нейтрино с параметрами

$$\Delta m_{14}^2 \geq 0.2 \text{эВ}^2 \quad \text{и} \quad \sin^2 2\theta_{14} = 0.04 \div 0.10$$

при этом принимается реакторная аномалия, т.е. расчёты антинейтринных спектров.

(можно даже обсуждать 3 типа стерильных нейтрино: стерильное электронное, стерильное мюонное, стерильное тау)

Планы:

1. Продолжение измерений на данной установке.
2. Создание второй нейтринной лаборатории на реакторе СМ-3 с базой до 15 метров.
3. Два идентичных детектора, один - стационарный на 15 м, второй - подвижный.
4. Детекторы с ФЭУ с двух сторон, по 25 ФЭУ с каждой стороны. Всего 100 ФЭУ.
5. Дискриминация сигнала по форме импульса (PSD).
6. Новый сцинтиллятор с 0.3%Gd, для подавления фона случайных совпадений. 3 куб. метра.



Финансовые потребности
20 млн.руб.

*Эксперименты по поиску
стерильного нейтрино,
ретроспектива*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

СИНЁВ Валерий Витальевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ НЕЙТРИНО В РЕАКТОРНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Москва – 2013

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Таблица 8. Отношение измеренного и ожидаемого нейтринных эффектов в реакторных экспериментах на близких расстояниях

Эксперимент	Расстояние, м	Отношение	работа
ILL	8.76	0.832 ± 0.075	[71]
Ровно	12	0.970 ± 0.025	[41]
Bugey-3	15	0.988 ± 0.03	[42]
Ровно	18.2	0.987 ± 0.035	[43]
Ровно	18.2	0.995 ± 0.035	[72]
SRP	18.2	0.987 ± 0.04	[44]
SRP	23.8	1.055 ± 0.04	[44]
Ровно	25.2	1.008 ± 0.049	[43]
Красноярск	33	1.013 ± 0.051	[45]
Gösgen	37.9	1.018 ± 0.065	[9]
Bugey-3	40	0.994 ± 0.051	[42]
Gösgen	45.9	1.045 ± 0.054	[9]
Красноярск	57	0.989 ± 0.051	[11]
Gösgen	64.7	0.975 ± 0.076	[9]
Красноярск	92	1.031 ± 0.20	[45]
Bugey-3	95	0.915 ± 0.141	[42]
Красноярск	231	1.161 ± 0.1	[45]
Palo Verde	820	1.011 ± 0.061	[14]
CHOOZ*	1050	0.980 ± 0.043	[13]

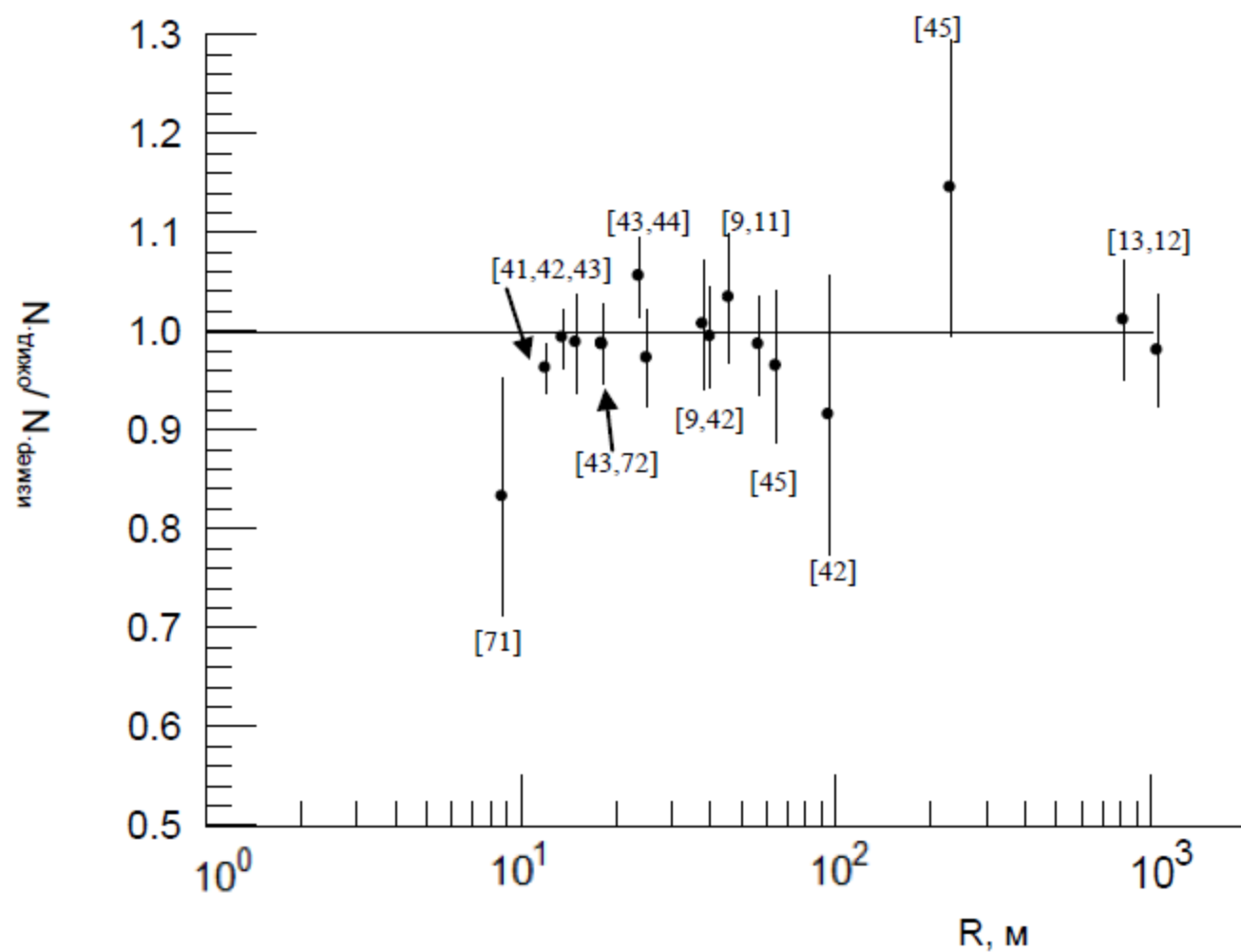
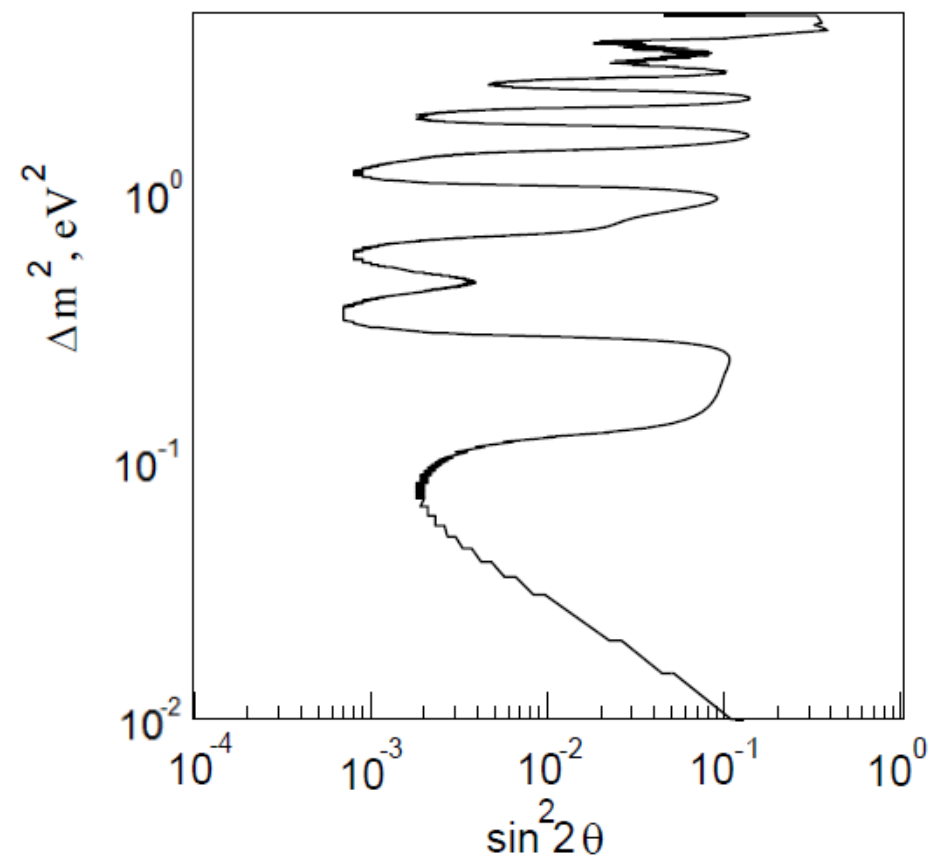
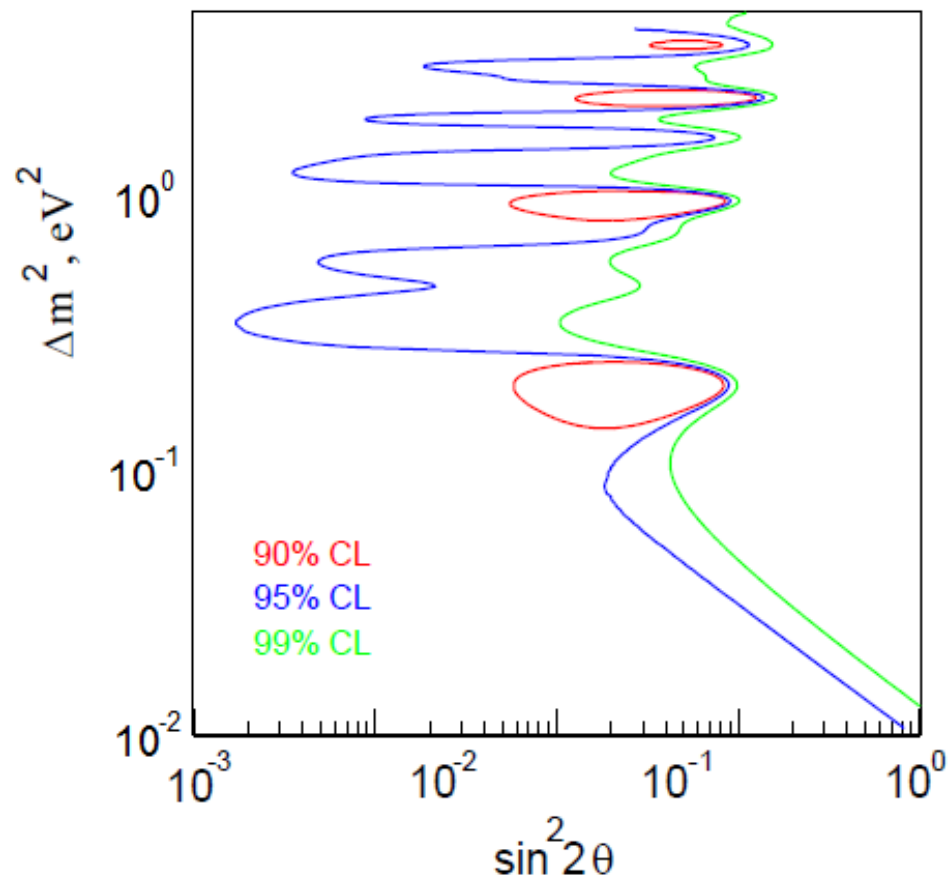


Рис. 3. Отношение эффектов измеренного и ожидаемого в реакторных экспериментах.

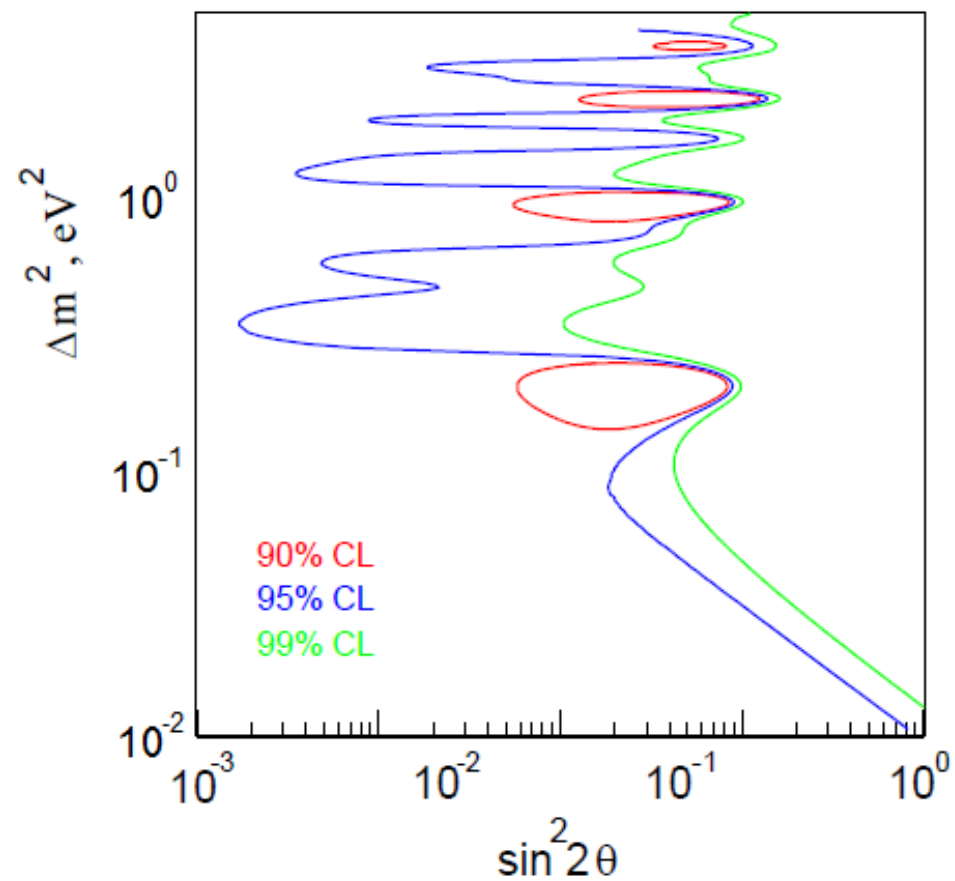
Без точки ILL – только ограничения



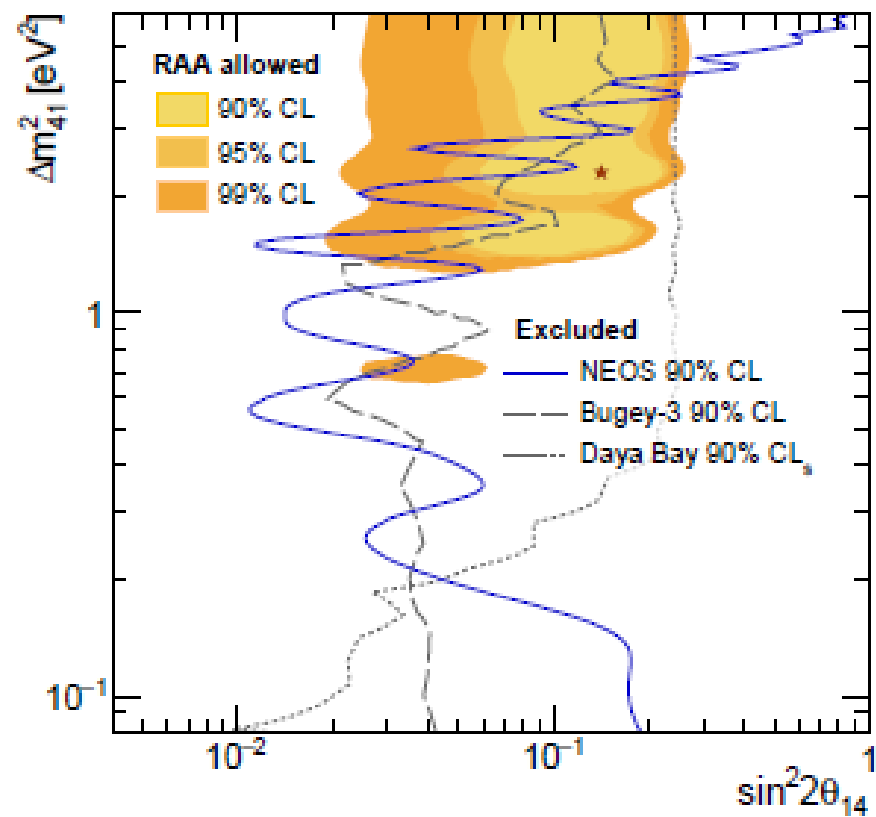
С точкой ILL – замкнутая область

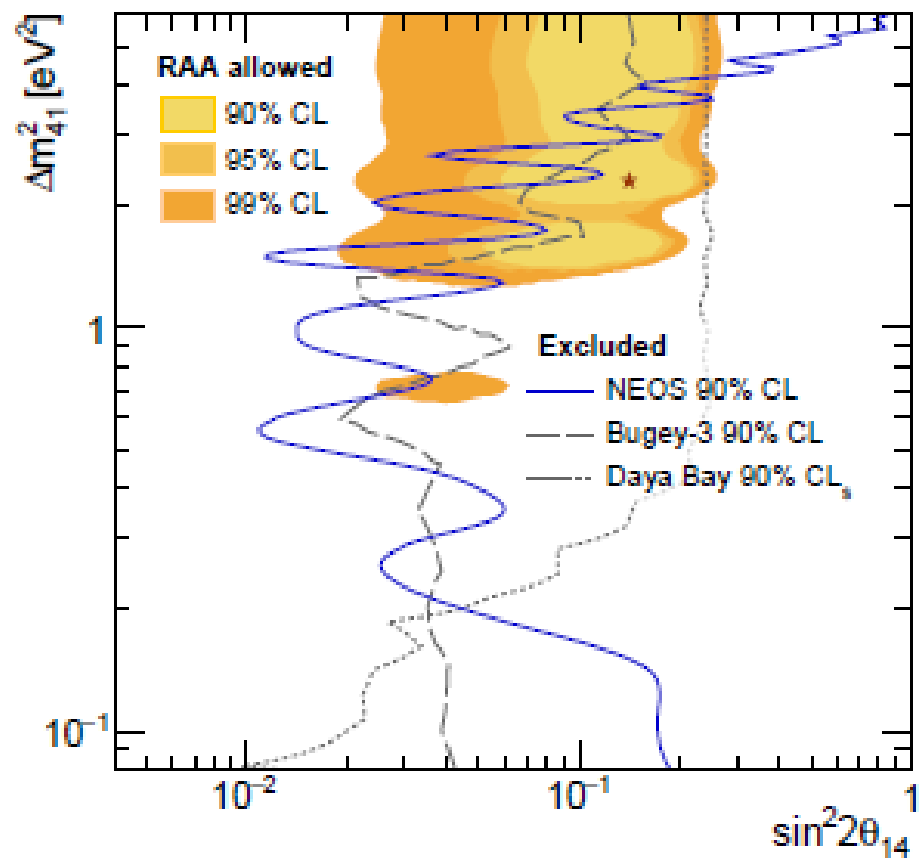
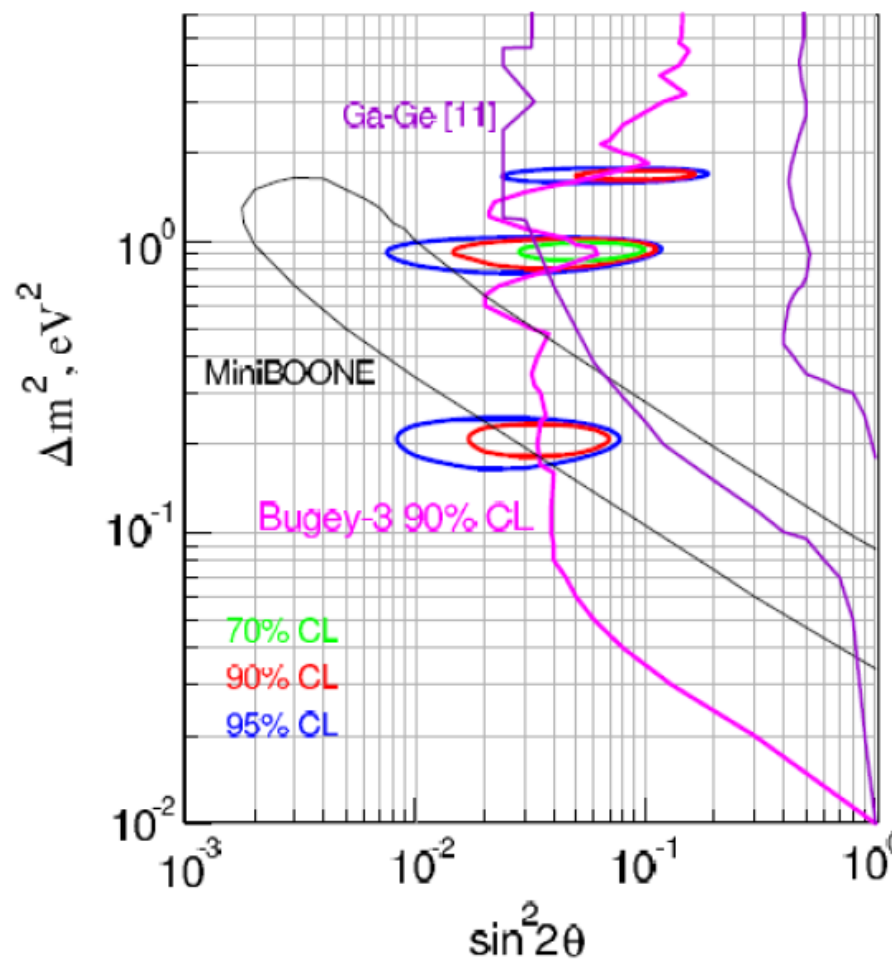


До 2013 года



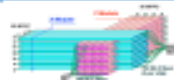



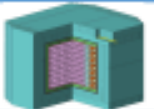
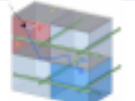

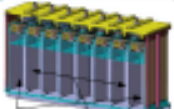
На сегодня

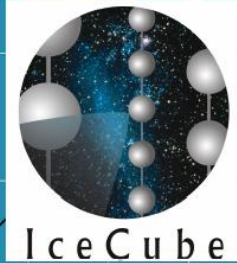




*Эксперименты по поиску
стерильного нейтрино,
перспективы*

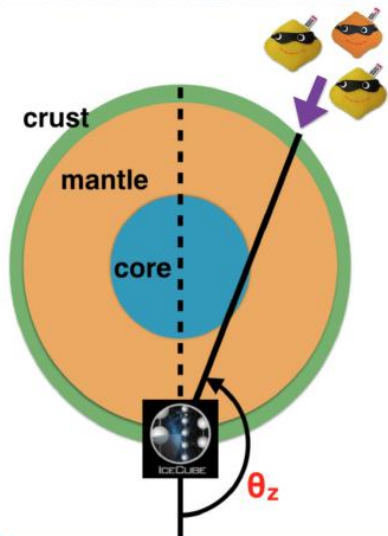
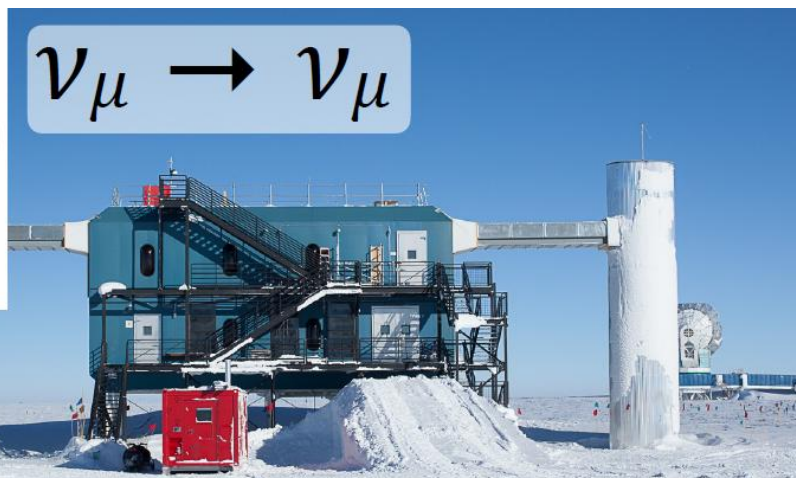
Present status экспериментов по поиску стерильного нейтрино

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

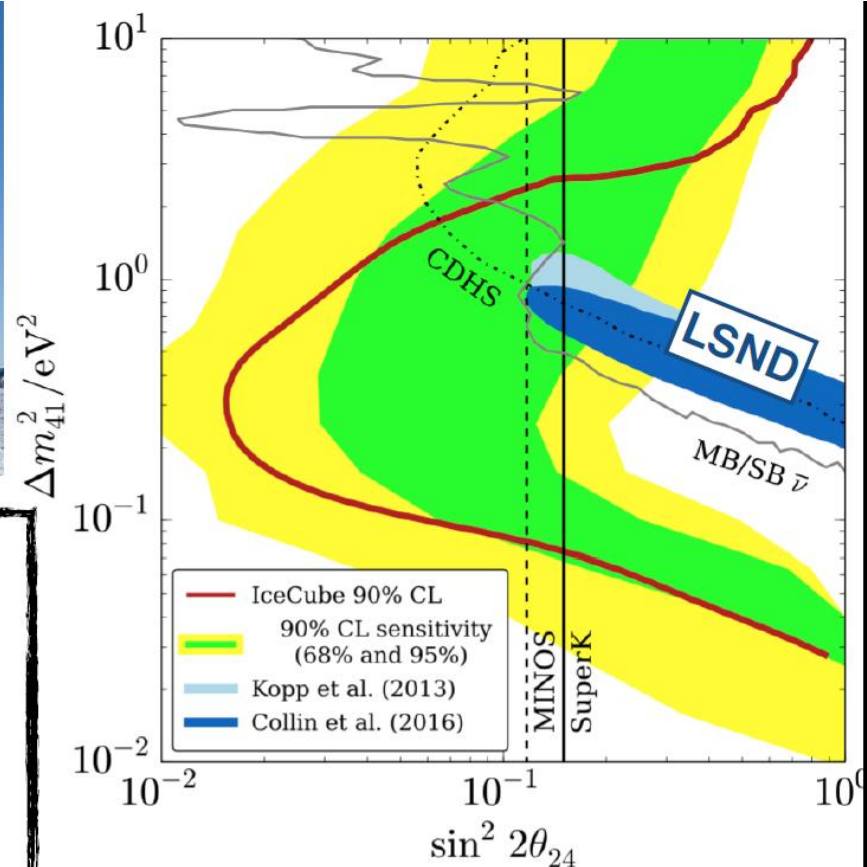




$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$$

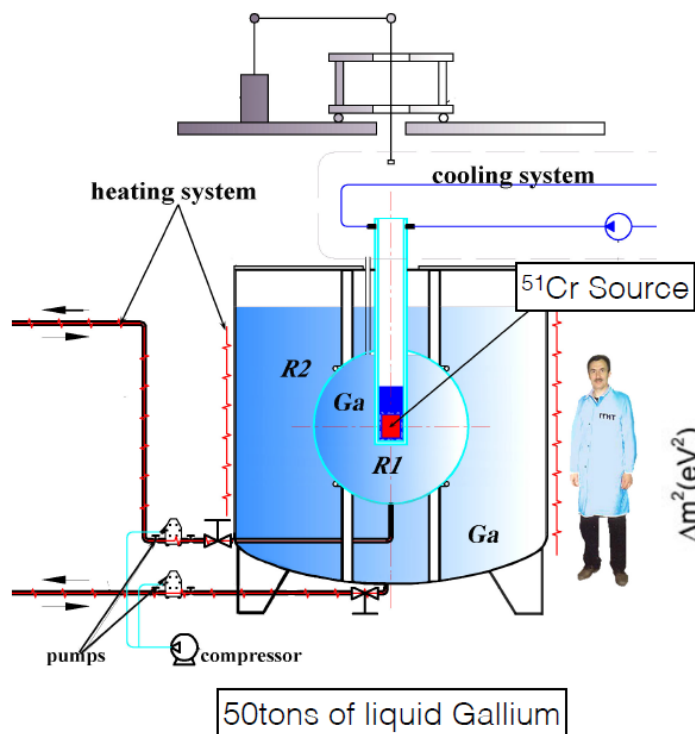


- Sensitive to $\sin^2 2\theta_{24}$, can probe accelerator anomalies
- Different angles of incident flux yield broad baseline coverage
- Look for evidence of muon neutrino disappearance



No evidence of sterile neutrino oscillations

BEST: New Search for $\nu_e \rightarrow \nu_e$ Disappearance



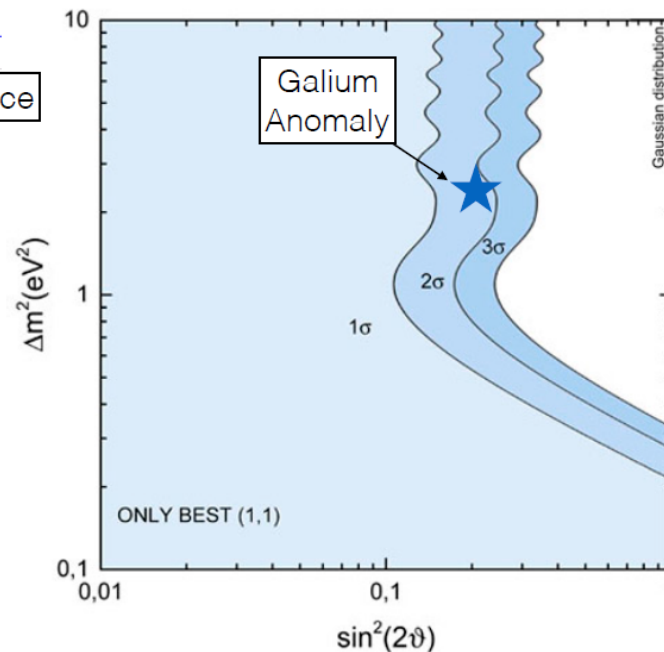
BEST sensitivity to O(1) eV sterile neutrino

Vladislav Barinov,^{1,2,*} Vladimir Gavrin,^{1,†} Dmitry Gorbunov,^{1,3,‡} and Tatiana Ibragimova^{1,§}

¹Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow 117312, Russia

²Physics Department, Moscow State University, Vorobiev Gory, Moscow 119991, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny 141700, Russia



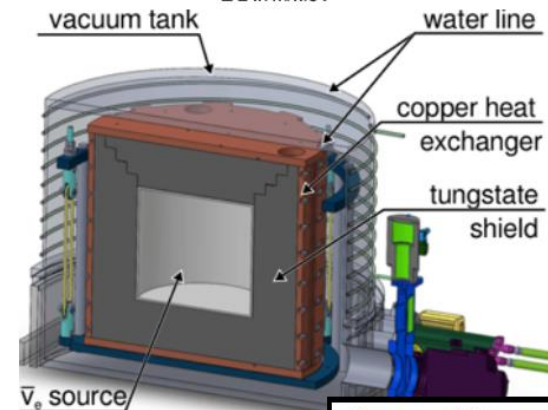
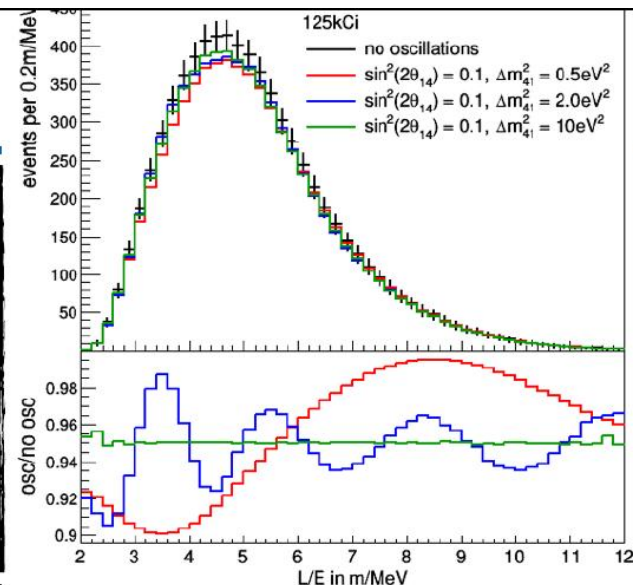
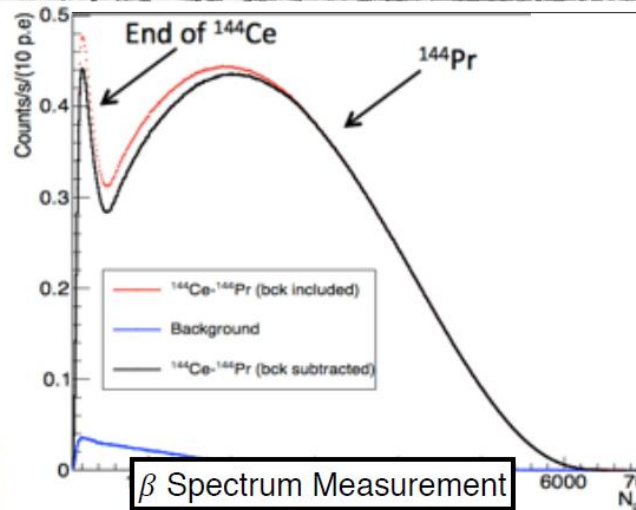
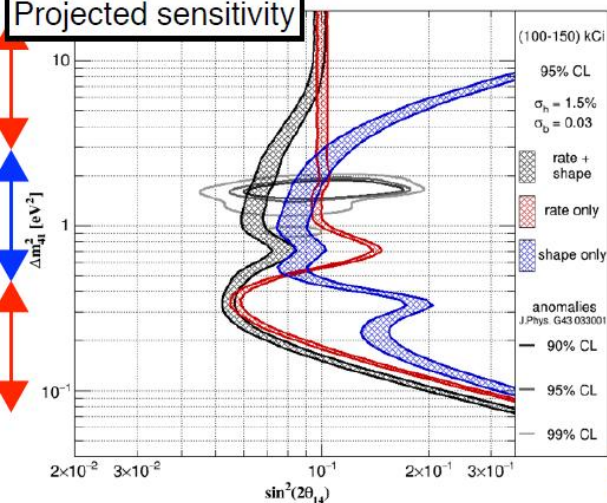
- 3M Ci ^{51}Cr source centered in two concentric containers of Gallium,
- Measure production of ^{71}Ga
- Direct test of Sage/Galex anomalies, simpler neutrino flux predictions

arXiv:1602.03826v1

SOX: $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$

- ^{144}Ce source placed below Borexino detector volume
- Rate + Spectrum analysis to search directly for neutrino oscillations
- *Extensive work in understanding Ce and Pr beta decay source*

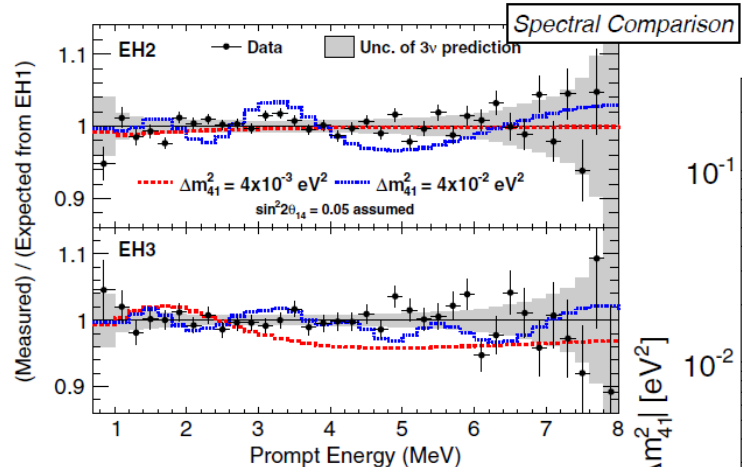
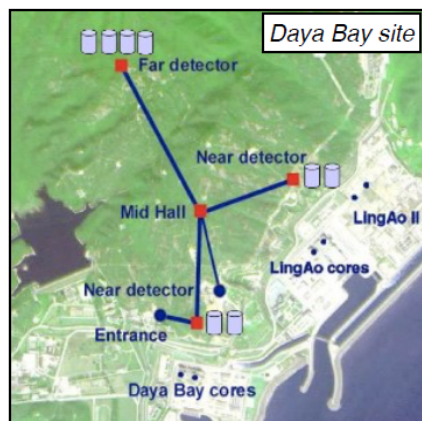
Projected sensitivity



Source Power
Measurement

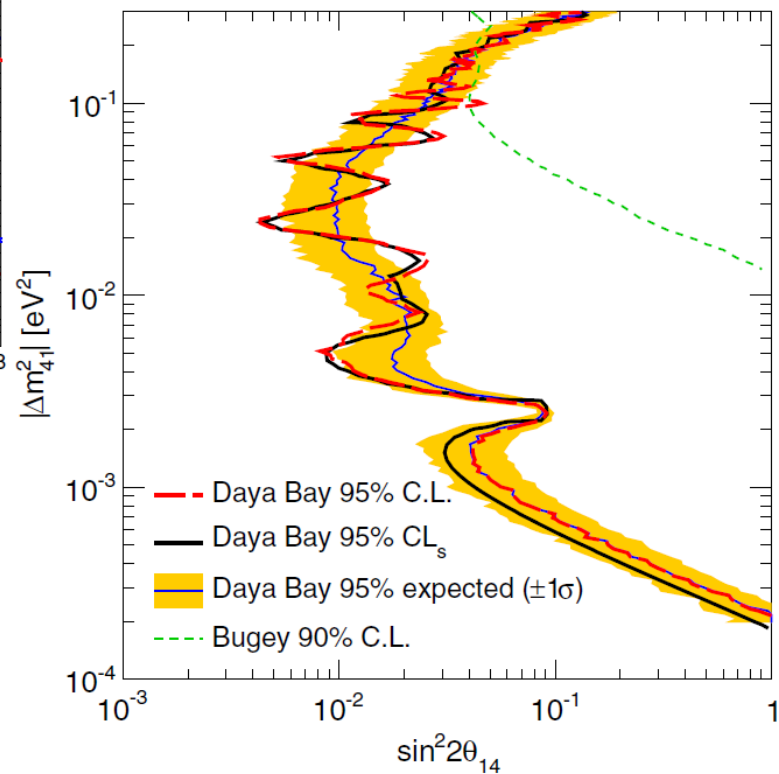
5 April Meeting 2017

Daya Bay: $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ Spectral Comparison

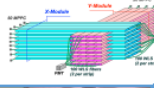
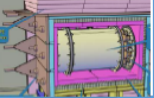


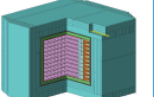
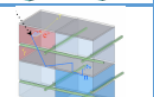
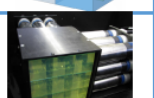



PRL 117, 151802 (2016)

- Multiple detectors at different baselines provide unique probe for sterile neutrinos
- Spectral measurement at different baselines, look for oscillations, sensitive to low Δm^2 region
- *Consistent with 3-flavor neutrino oscillation*



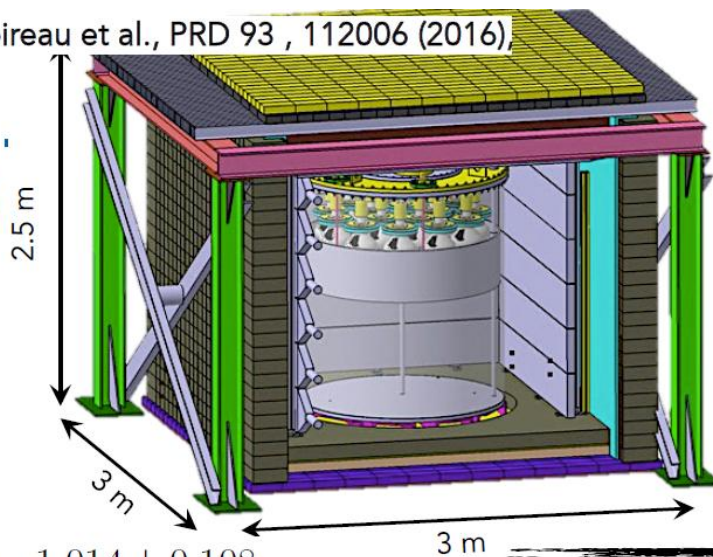
An abundance of experiments...

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

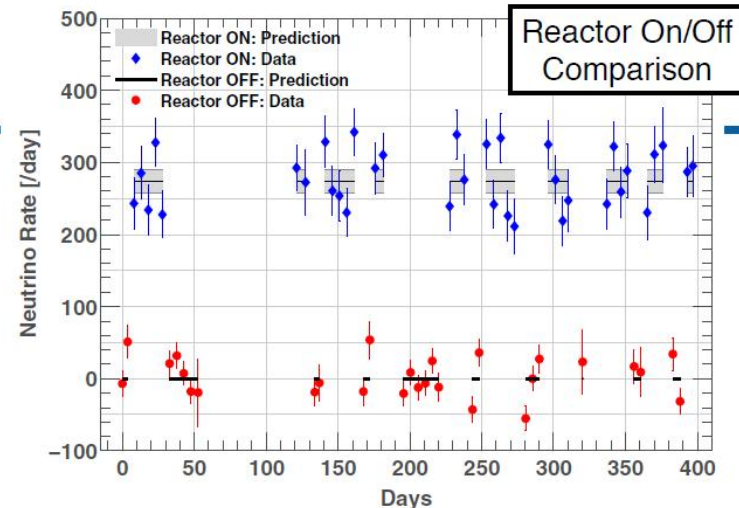
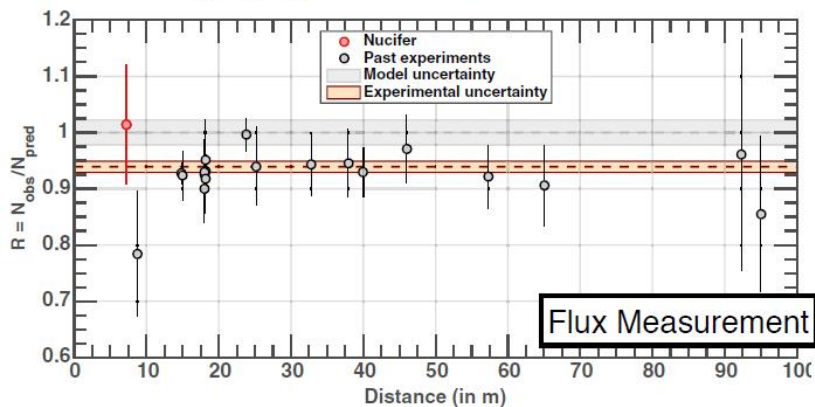
N. Bowden AAP 2016



G. Boireau et al., PRD 93 , 112006 (2016)

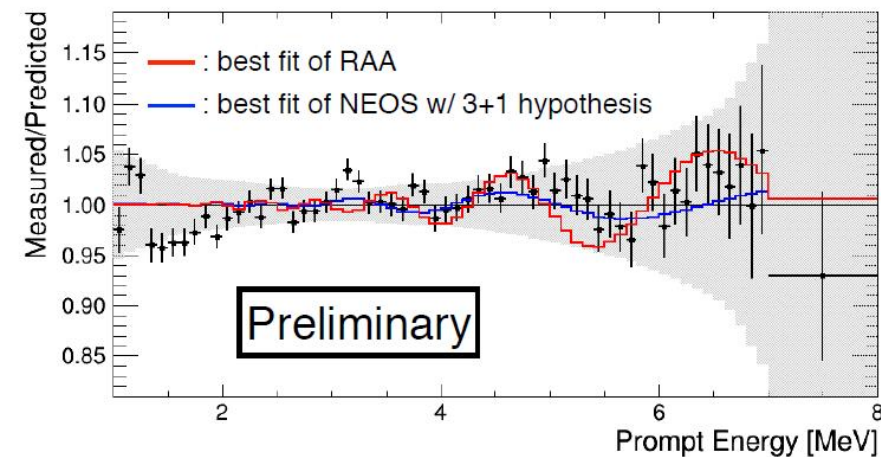
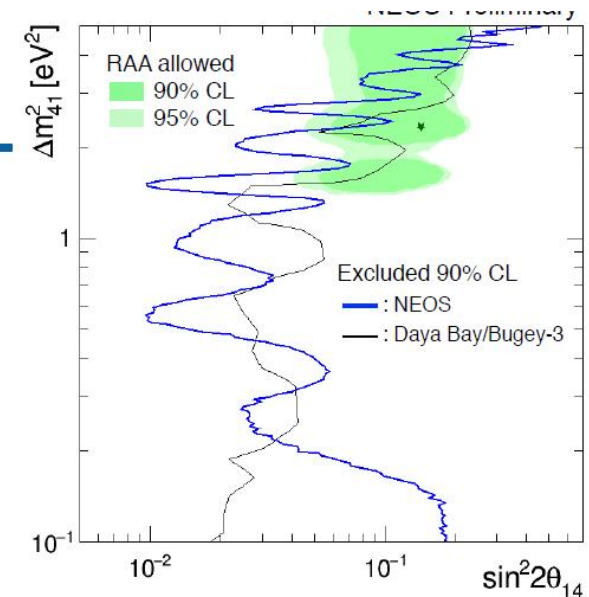
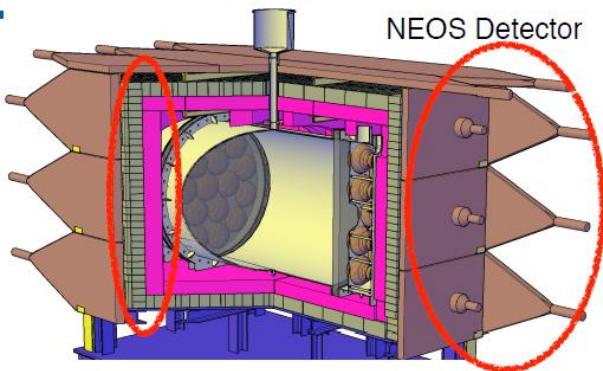


$$R_{\nu}^{\text{obs}}/R_{\nu}^{\text{pred}} = 1.014 \pm 0.108$$



- 850L GdLS detector in a single, stationary volume
- Installed 7m from Osiris Reactor 70MW, 20% ^{235}U in 2013
- Low S:B, but successfully measured 281 ± 20 IBD/day
- Measured flux agrees with prediction and previous experiments, large uncertainties

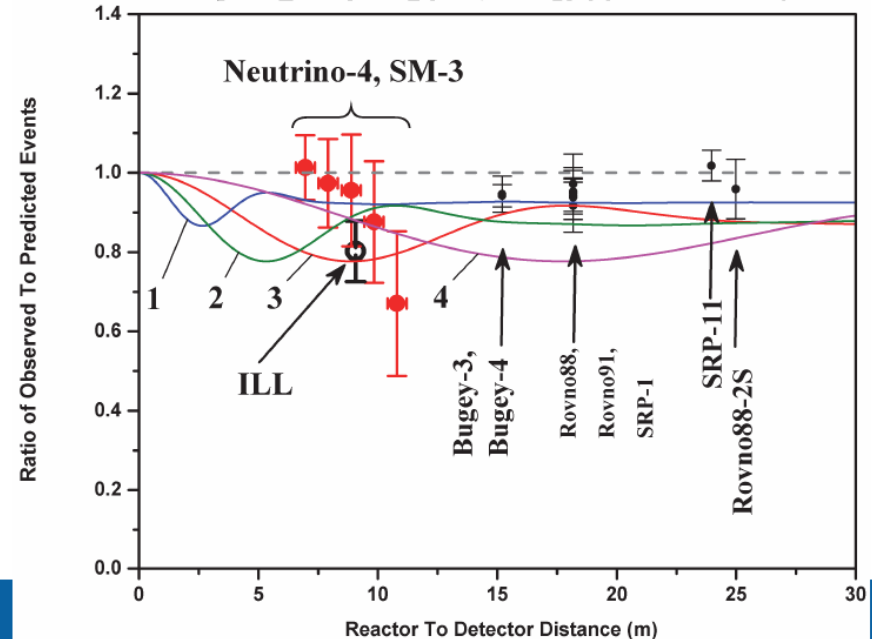
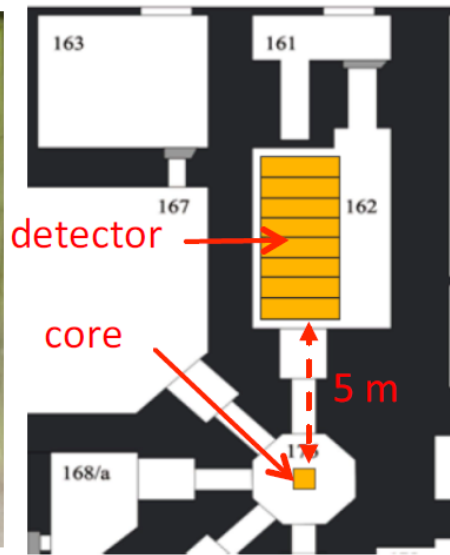
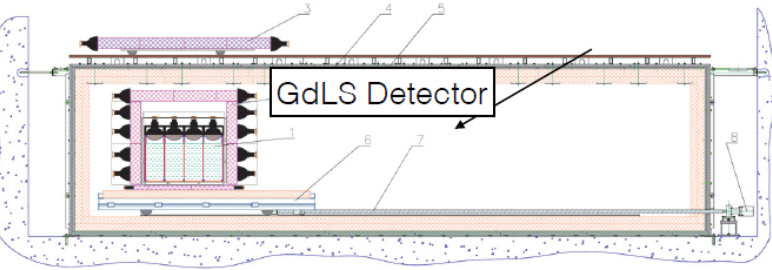
NEOS



- Single-volume GdLS detector with pulse shape discrimination and 5% Energy Resolution
- Located in tendon gallery at Hanbit power reactor at ~25m from reactor core, S:B ~23, 2000 IBDs/day(!)
- Initial data run finished in 2016, spectral oscillation search starting to probe best-fit region

Neutrino-4

- Movable 350L GdLS detector, 100MW reactor
- 6-11m from compact core, Signal:Background = 1:5
- Measured spectrum and flux at different baselines
- Large uncertainties, larger detector planned with better background rejection

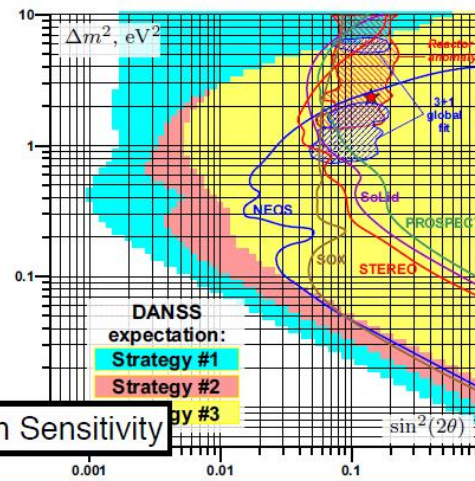
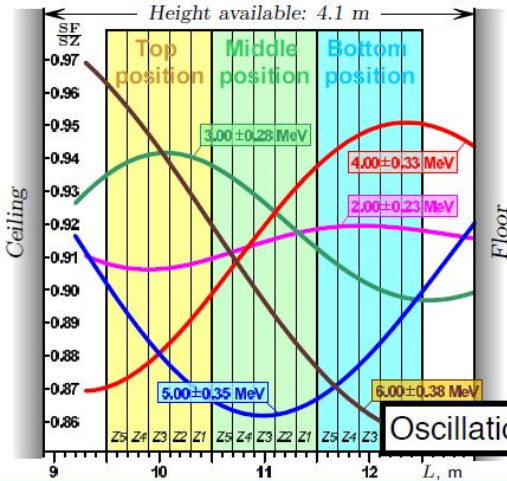
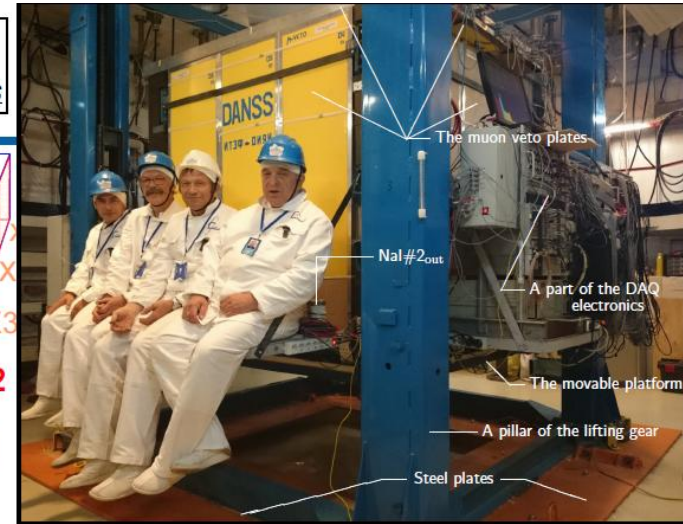
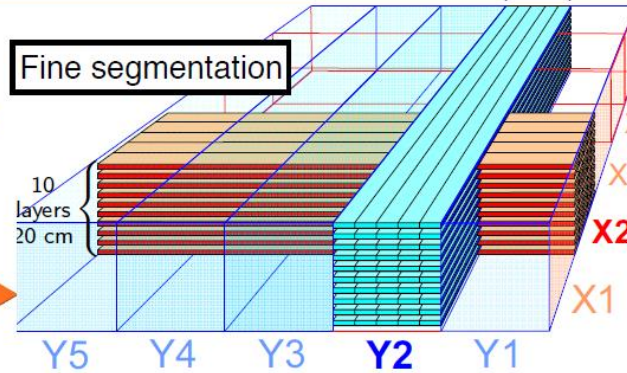
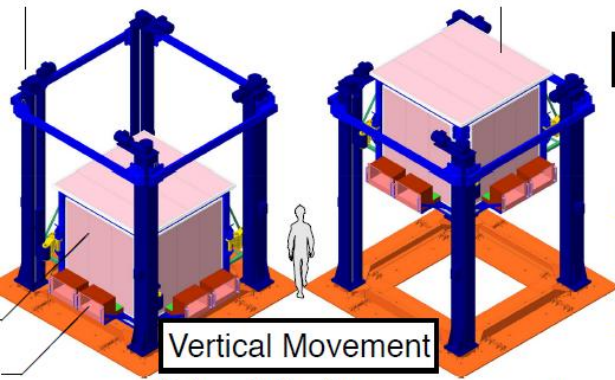


arxiv:1605.05909

DANSS

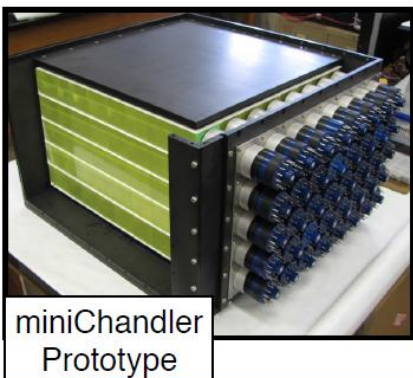
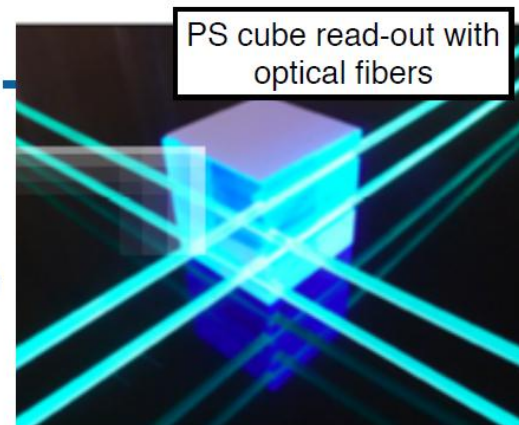
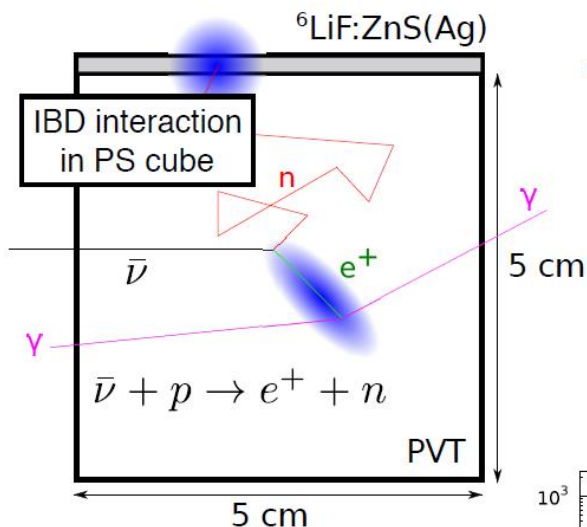
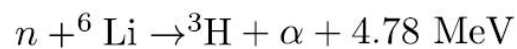
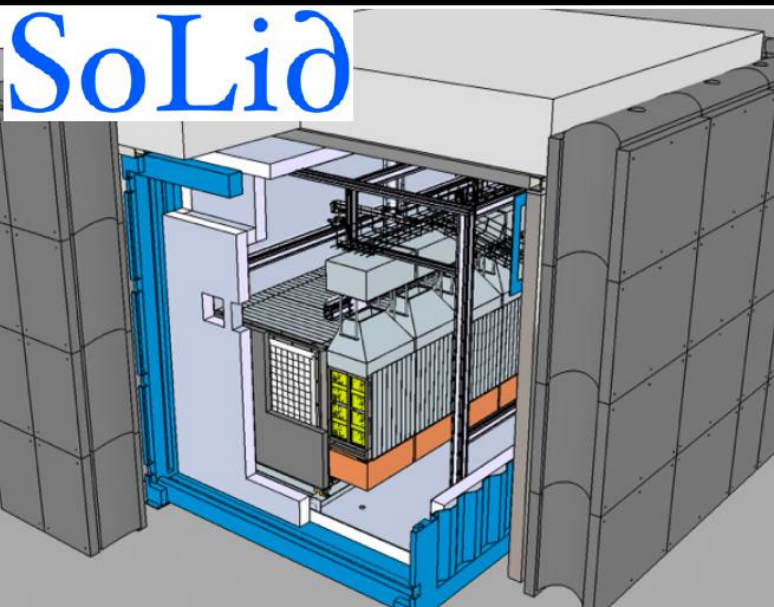
Alekseev et al. arXiv:1606.02896

Neutrino2016: https://youtu.be/jp_1cW-DO0E?t=1h10m36s

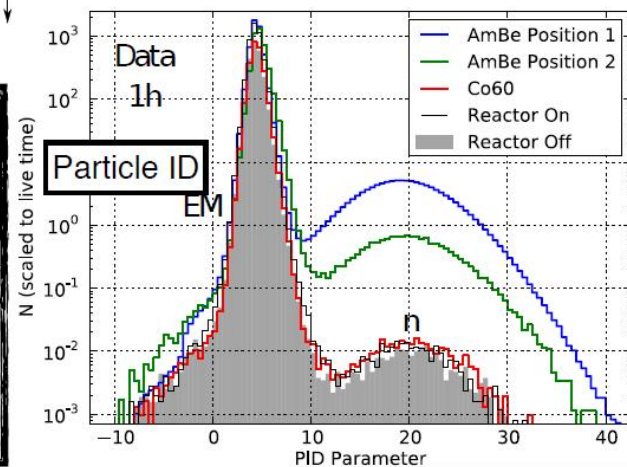


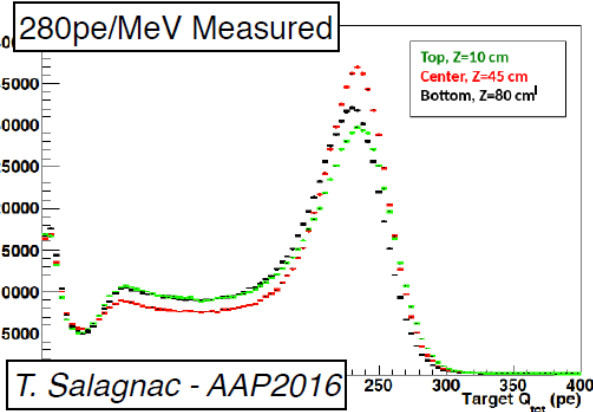
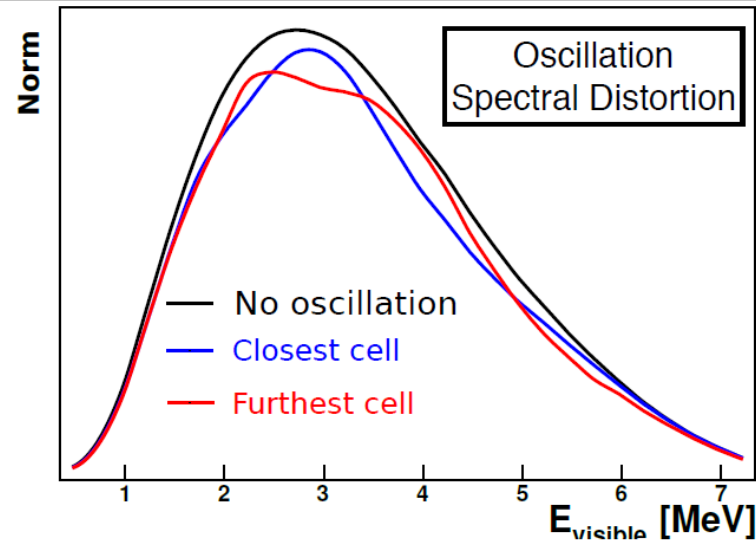
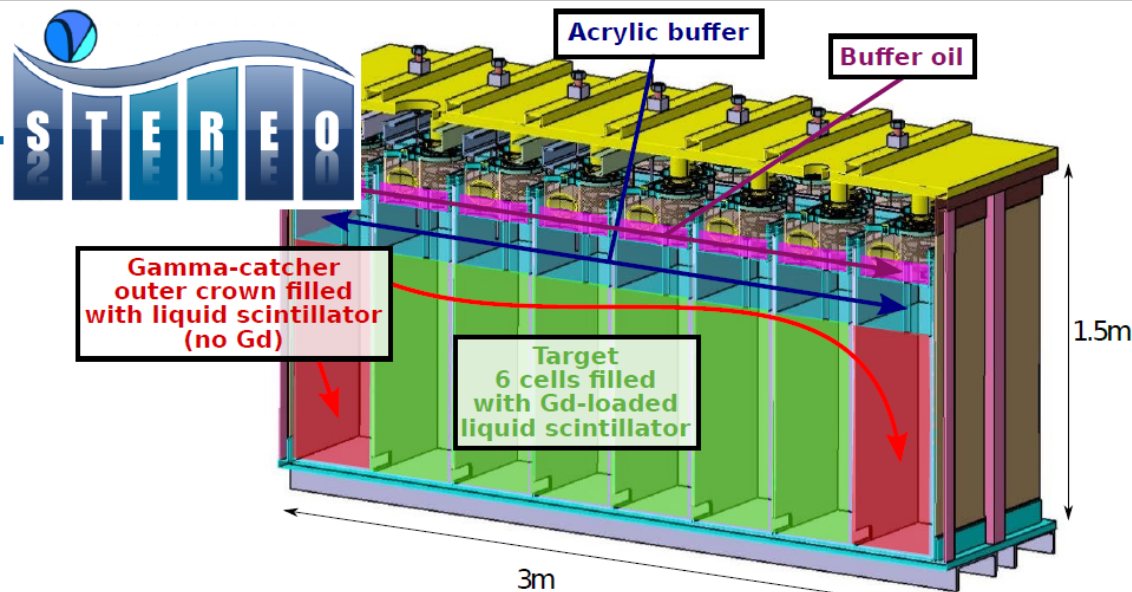
- Finely segmented plastic scintillator detector beneath 3GW power reactor, larger overburden
- Vertically movable, baseline span ~ 4 m, compare rate+spectrum versus baseline
- Running since mid 2016, initial results with ~ 25 days look promising
 - 5000 neutrinos/day, Signal:BG = 20:1

SoLiD

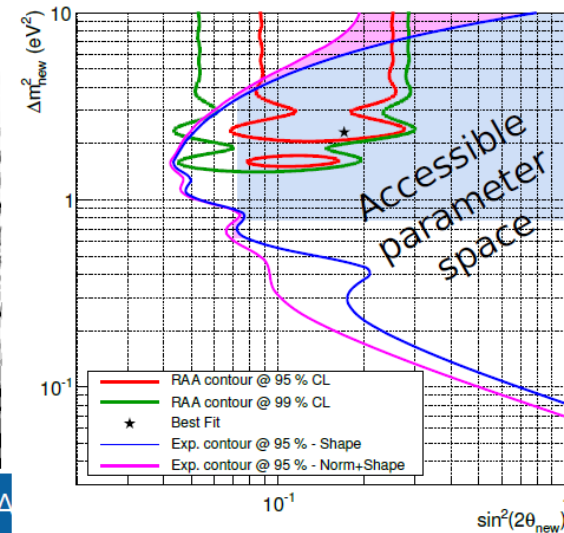


- 13000 5cm PS cubes read out by fiber
- Neutron tag from Li-loaded inorganic scintillator sheets surrounding cubes
- Deploy 1600kg detector at BR-2 reactor early 2017
- Detector R&D study (Chandler) underway, would expand high Δm^2 sensitivity

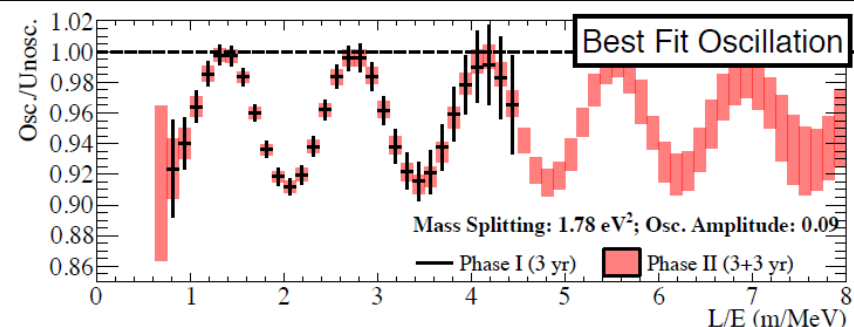
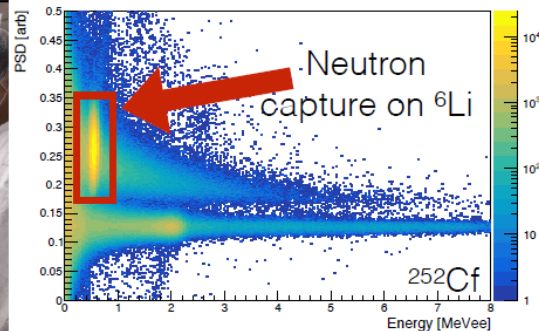
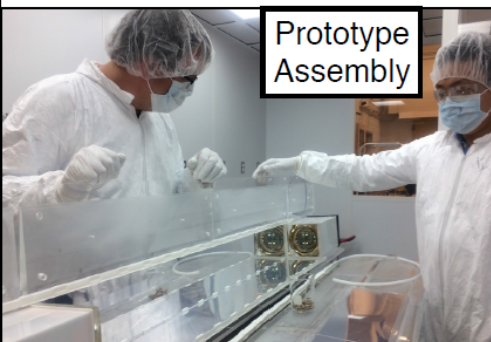
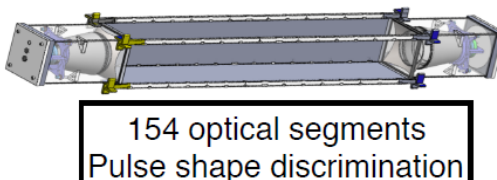
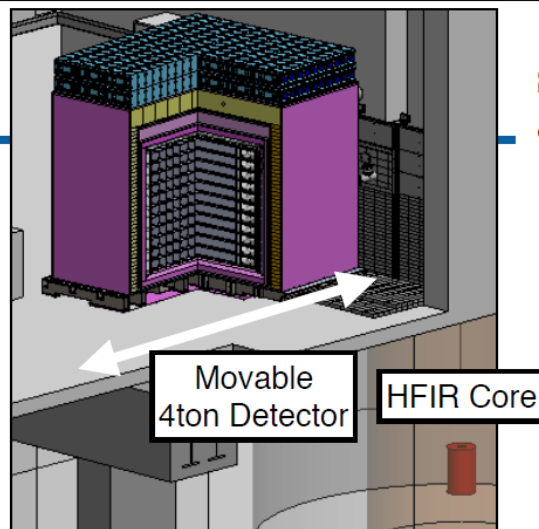
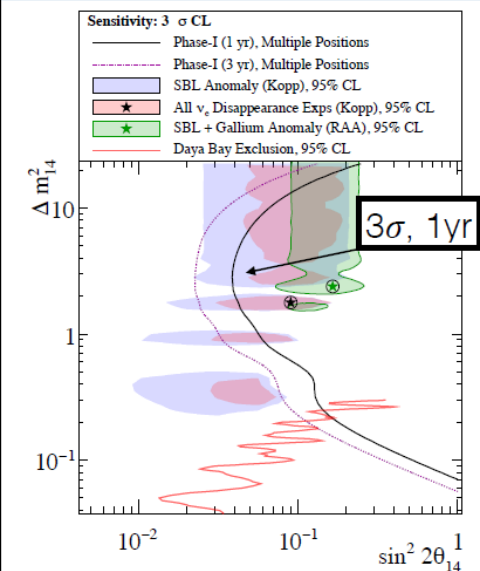




- 6 identical cells for oscillation search, spectral shape compared between each
- Positioned 8.9-11m from ILL HEU reactor
- Detector construction complete in Summer 2016, data collection underway
- **Expected results in 2017**



PROSPECT



- 4 ton movable $^6\text{LiLS}$ detector at HFIR HEU reactor (154 segments, double PMT readout)
- **160k detected neutrinos per year, ~1000/day. Signal:Background = 3:1**
- 5% energy resolution for precision spectral measurement of ^{235}U
- Extensive prototyping program, validated detector performance and background projections
- *Detector construction underway, installation this summer*

B9.00007: P. Surukuchi, B9.00008: X. Zhang, K11.00005: K. Commeford

PROSPECT Collaboration



Supported by:



U.S. DEPARTMENT OF
ENERGY

Office of
Science



**HEISING-SIMONS
FOUNDATION**

prospect.yale.edu

Best regards from Russia



**A Serebrov¹, V Ivochkin¹, R Samoilov¹, A Fomin¹,
A Polyushkin¹, V Zinoviev¹, P Neustroev¹, V Golovtsov¹,
A Chernyj¹, O Zhrebtsov¹, V Martemyanov²,
V Tarasenko², V Aleshin², A Petelin³, A Izhutov³,
A Tuzov³, S Sazontov³, D Ryazanov⁴, M Gromov³,
V Afanasiev³, M Zaytsev^{1, 4}, M Chaikovskii¹**

¹ Petersburg Nuclear Physics Institute NRC KI,
Gatchina, 188300 Russia

² NRC “Kurchatov institute”, Moscow, 123182 Russia

³ JSC “SSC RIAR”, Dimitrovgrad, 433510 Russia

⁴ DETI MEPhI, Dimitrovgrad, 433511 Russia



Спасибо за внимание

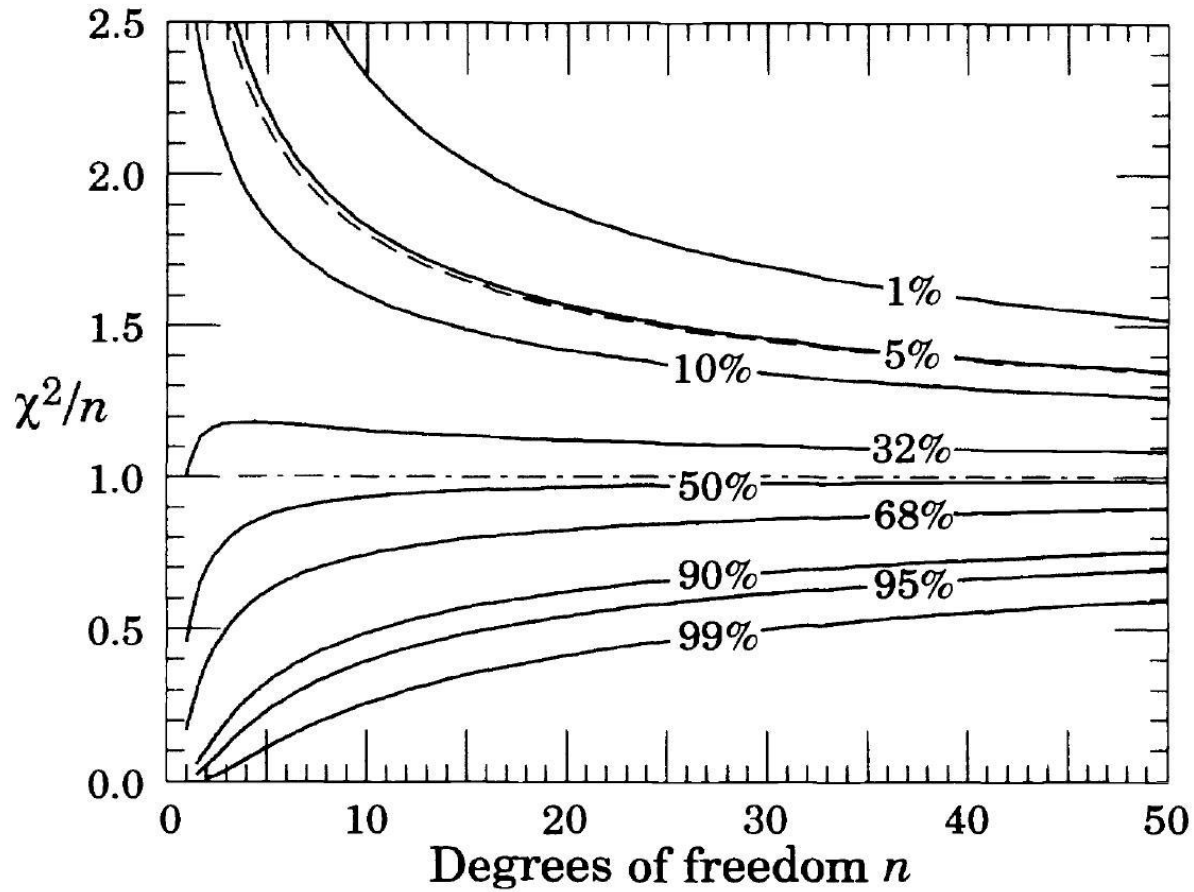


Fig. 3. Confidence limits as a function of the “reduced χ^2 ” $\equiv \chi^2/n$ and the number of degrees of freedom n . Curves are labeled by the probability of a measurement resulting in a value of χ^2/n greater than that given on the y axis; *e.g.*, for $n = 10$, a value $\chi^2/n \gtrsim 1.8$ will occur in 5% of a very large number of experiments. The dashed curve for CL = 5% is calculated using the approximation of Eq. (1.32).