



Изучение свойств нейтрино с помощью низкофонового германиевого спектрометра GEMMA-III

Участники от ЛЯП, ОИЯИ:

Белов В.В., Бруданин В.Б., Егоров В.Г., Фомина М.В., Лубашевский А.В.,
Медведев Д.В., Пономарев Д.В., Ширченко М.В., Розов С.В., Розова И.Е.,
Житников И.В., Якушев Е.А., Зинатулина Д.Р.

ИТЭФ:

Беда А.Г., Старостин А.С.

МИФИ:

Гуров Ю.Б.

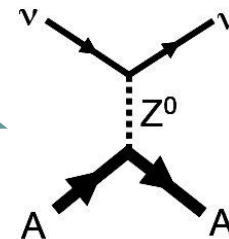
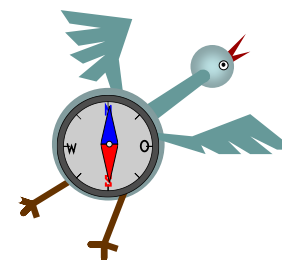
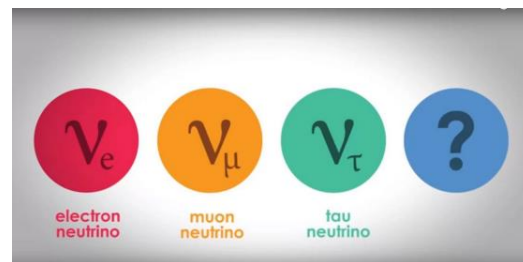
МОТИВАЦИЯ

С момента первого детектирования нейтрино уже прошло более 60 лет, однако многие свойства этой частицы до сих пор неизвестны. Интерес к изучению свойств данной частицы только возрастает в последние годы, так как она имеет важное значение для физики частиц, астрофизики и космологии.

Много свойств нейтрино до сих пор остаются неизученными:

- Масса нейтрино и ее иерархия
- Стерильное нейтрино?
- Магнитный момент нейтрино
- Природа нейтрино (Дирак или Майорана), ...

Детектирование нейтрино является непростой задачей вследствие его крайне слабого взаимодействия с веществом. Поэтому для регистрации нейтрино обычно используются достаточно большие детекторы. В проекте GEMMA-III планируется регистрировать нейтрино с помощью германиевых детекторов с массой всего около 1 кг.



Магнитный момент ν (ММН)

В минимально расширенной Стандартной Модели (μ_B - магнетон Бора)

$$\mu_\nu \sim 10^{-19} \mu_B \times (m_\nu / 1\text{eV})$$

В различных расширениях СМ магнитный момент нейтрино ожидается в пределах:

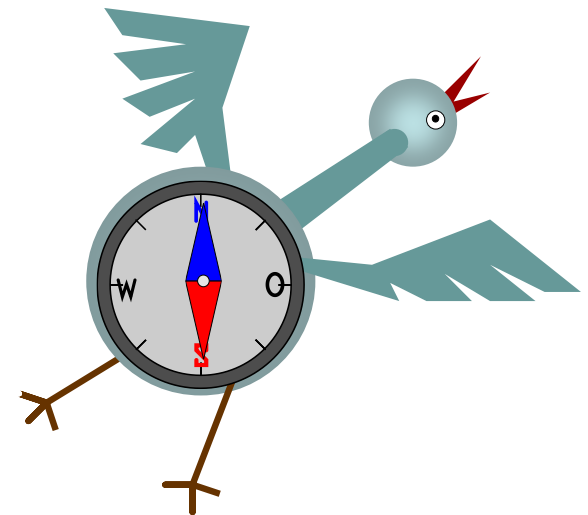
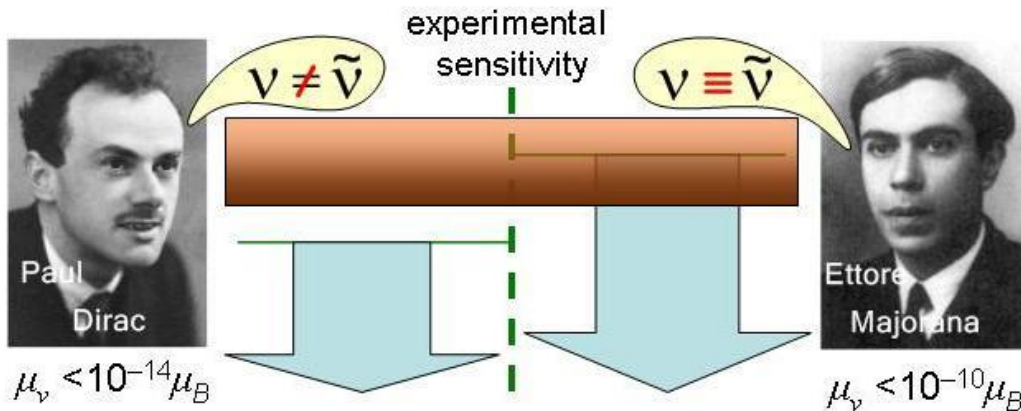
для нейтрино Майорана:

$$\mu_\nu = (10^{-11} \div 10^{-12}) \mu_B$$

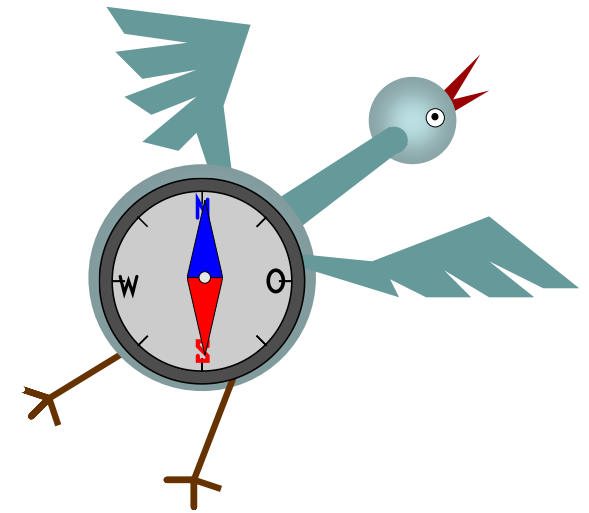
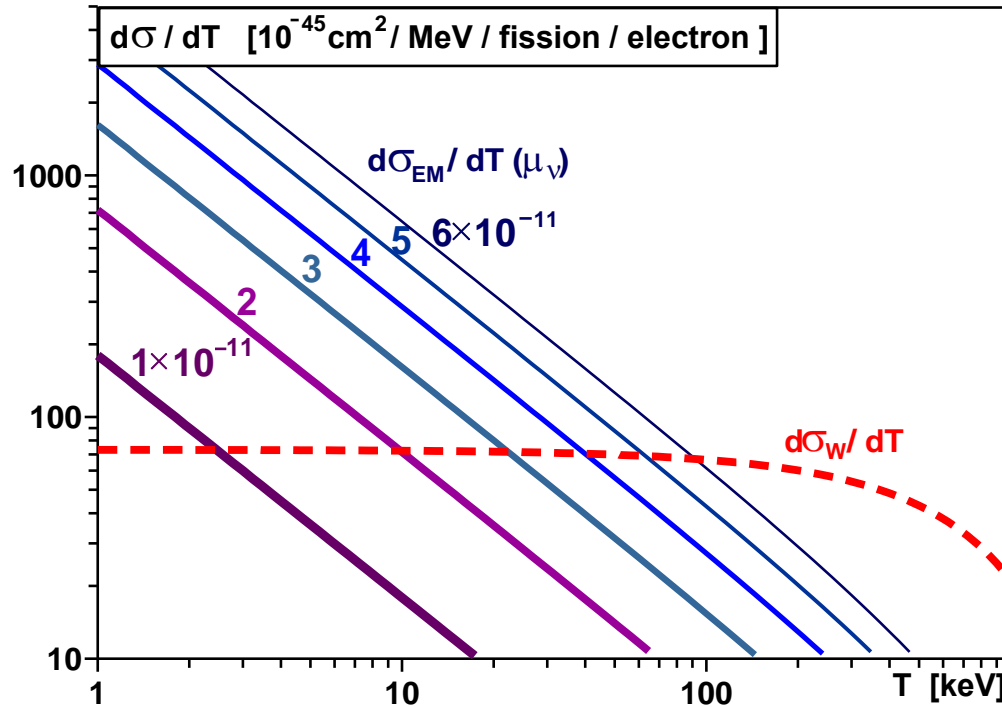
для нейтрино Дирака:

$$\mu_\nu < 10^{-14} \mu_B$$

Обнаружение магнитного момента нейтрино будет однозначно свидетельствовать о новой физике за пределами Стандартной Модели.



МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ ν



Сечение ЭМ рассеяния (анти)нейтрино на электронах:

$$\frac{d\sigma_{EM}}{dT} = \pi r_0^2 \left(\frac{\mu_\nu}{\mu_B} \right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{E_\nu} \right)$$

где $\pi r_0^2 = 2.495 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$,
 E_ν – энергия нейтрино

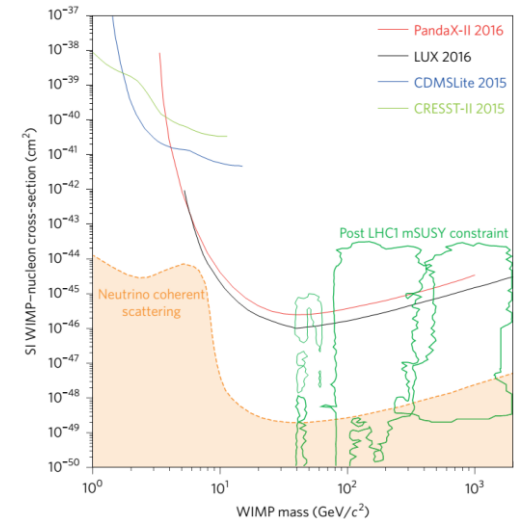
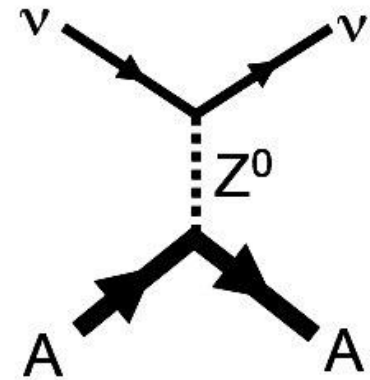
$$\mu_B = \frac{e \hbar}{2m_e}$$

Когерентное рассеяние ν (КРН)

Когерентное упругое рассеяние нейтрино на ядрах вещества это процесс разрешенный в Стандартной Модели (предсказан в 1974 году).

Исследование имеет большое значение для:

- Астрофизики и космологии (для ранней вселенной и формирования звезд).
- Хороший инструмент для поиска нестандартных взаимодействий нейтрино.
- Может использоваться для поиска стерильных нейтрино.
- Является фоном для экспериментов по поиску темной материи.
- Возможно практическое применение - мониторинг потока нейтрино от реакторов.



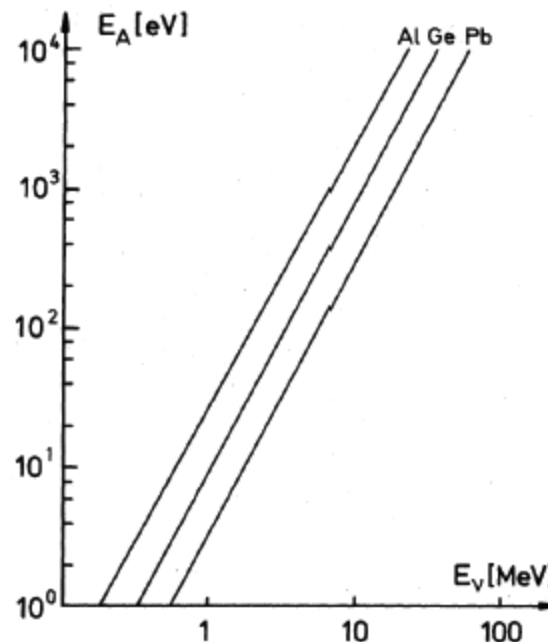
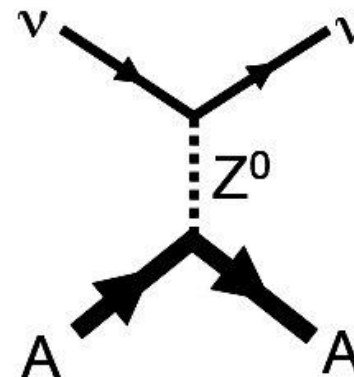
Когерентное рассеяние ν

Сечение КРН:

$$\frac{d\sigma_{CS}}{dT} = \frac{G_F^2 M}{2\pi} \left[2 - \frac{2T}{E_\nu} + \left(\frac{T}{E_\nu} \right)^2 - \frac{MT}{E_\nu^2} \right] \frac{Q_W^2}{4} F^2(Q^2)$$

E_ν – энергия нейтрино, G_F – константа Ферми,
 M – масса ядра, F – форм фактор, $\sin^2 \theta_W$ – угол Вайнберга,
 $Q_W = N - (1 - 4\sin^2 \theta_W)Z \approx N - 0.045 Z$
 N, Z – число нейтронов и заряд ядра

- $E_\nu < 50$ МэВ (полная когерентность ~ 30 МэВ)
- Пропорционально квадрату числа нейтронов.
- Сечение на несколько порядков выше обычного рассеяния.
- Энергия отдачи очень мала (обычно меньше нескольких кэВ).
- Более того, зачастую возможно детектирование только части отданной энергии (в германиевом детекторе $\sim 20\%$)

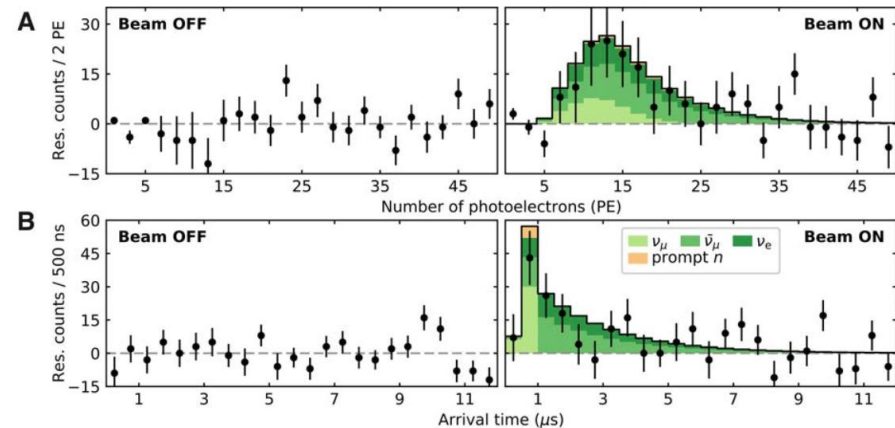
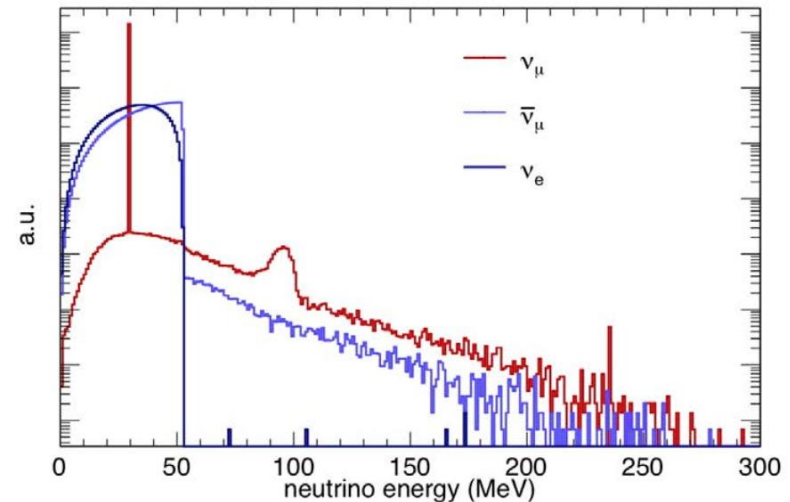


Average recoil energy, E_A , for various nuclei as a function of neutrino energy, from A. Drukier and Leo Stodolsky (Phys. Rev. D30, 1984, p2295)

Когерентное рассеяние ν

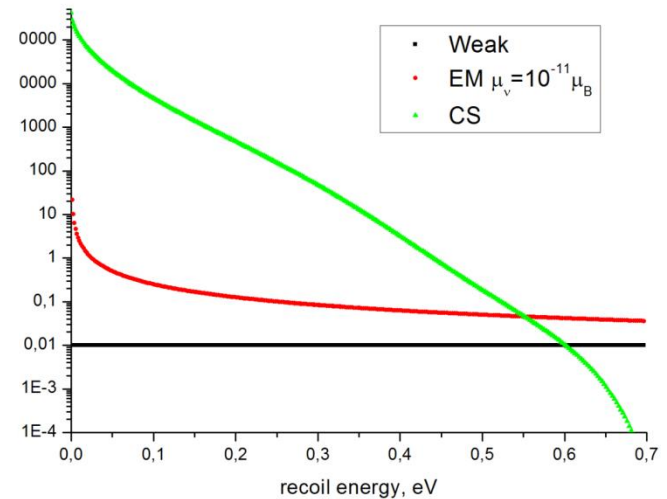
Поиск когерентного рассеяния нейтрино осуществляется во многих экспериментах: Ricochet, MINER, CONNIE, CONUS, COHERENT, ν GEN... В августе этого года коллаборация COHERENT заявила об обнаружении когерентного рассеяния нейтрино, от ускорителя SNS на сцинтилляторах CsI. Результаты получены с достаточно высокоэнергетическими нейтрино с энергиями близкими к границе когерентности.

В проекте GEMMA-III мы планируем проверить результаты эксперимента COHERENT с помощью нейтрино от реактора ($E_\nu < 10$ MeV). При этом отношение сигнал/фон будет значительно выше. Также планируется поиск нестандартных взаимодействий нейтрино.



Детектирование ν

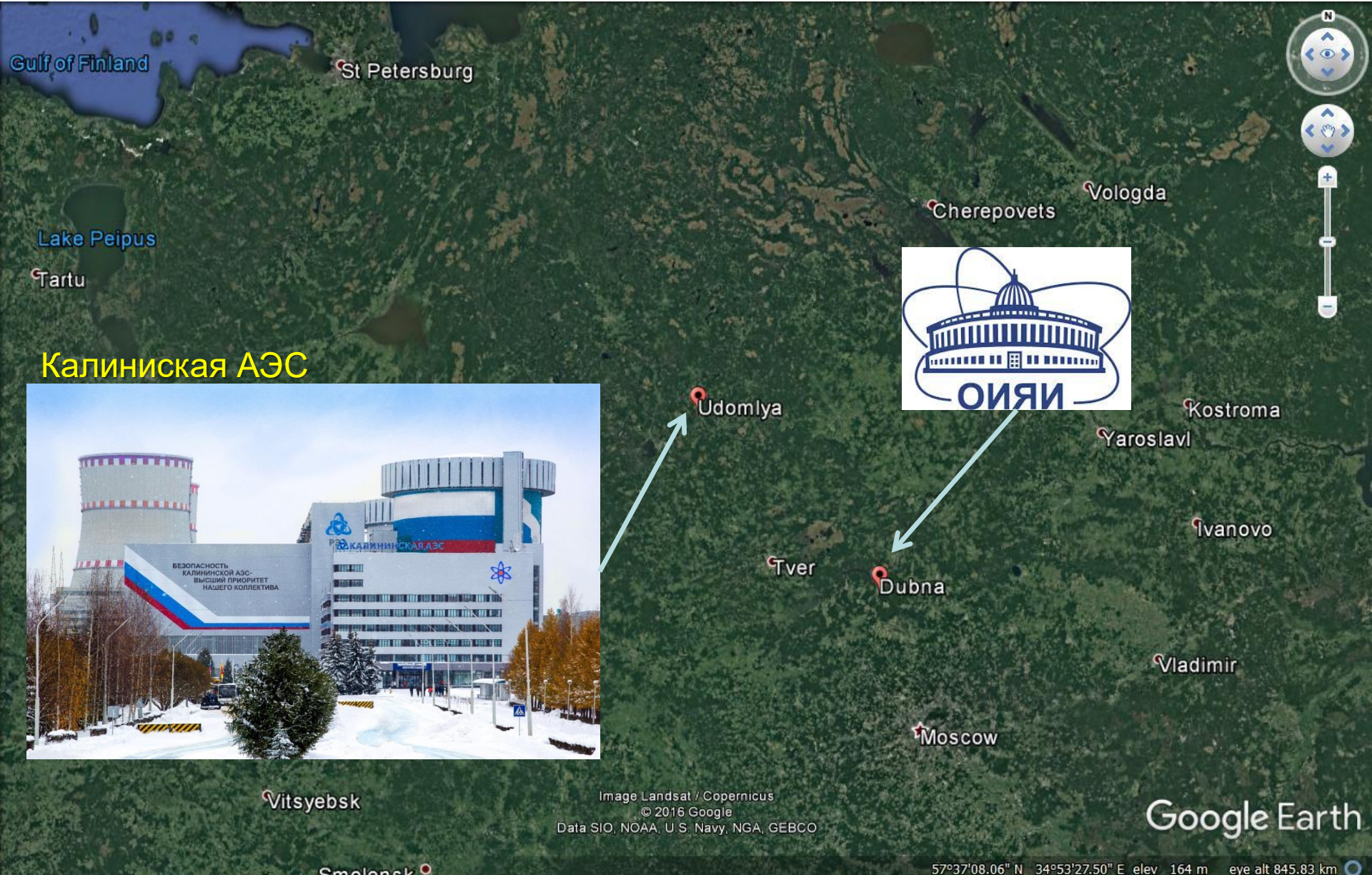
- Рассматриваемые события от рассеяния нейтрино - непрерывный спектр при низких энергиях.
- Сложно отделить сигнал от фона.
- Малое число событий.



Для детектирования КРН или ММН:

- Мощный источник нейтрино
- Детектор с очень низким порогом регистрации и хорошим разрешением
- Низкий уровень фона
- Четкое разделение искомых событий от фоновых
- Большая эффективность и масса детектора

КАЭС



Калининская АЭС

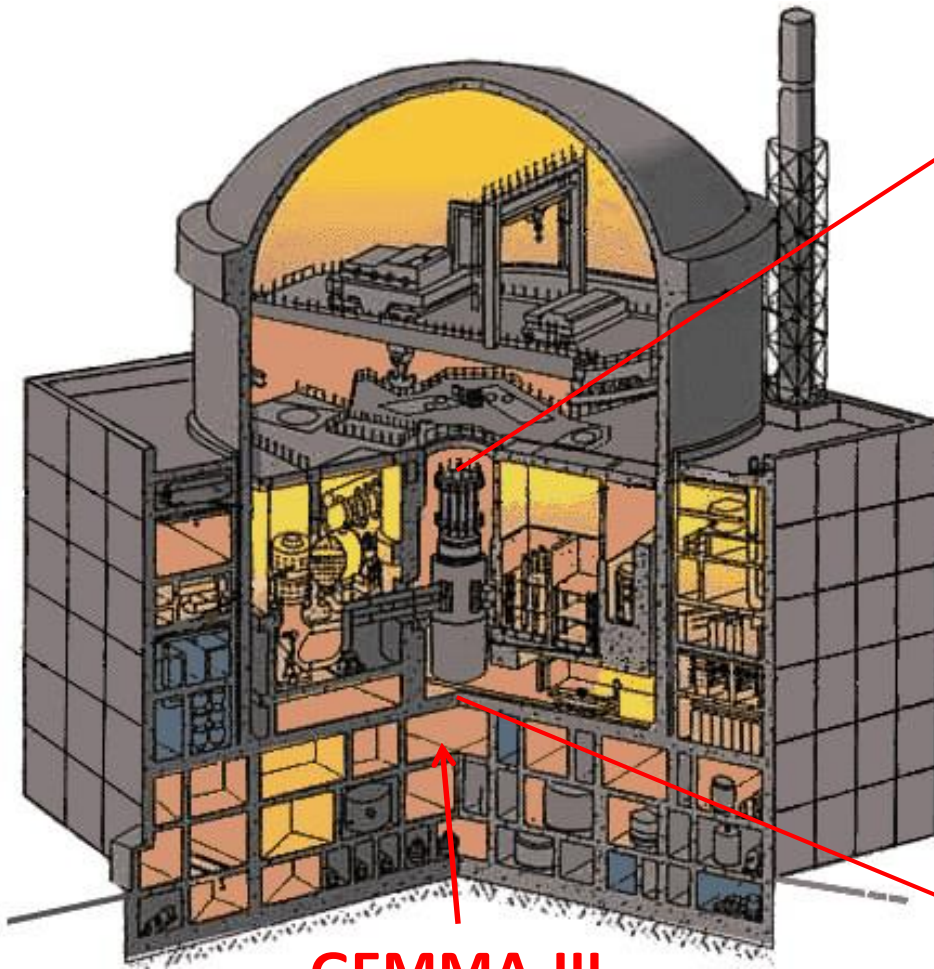


Image Landsat / Copernicus
© 2016 Google
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

Google Earth

57°37'08.06" N 34°53'27.50" E elev 164 m eye alt 845.83 km

Источник ν



GEMMA-III

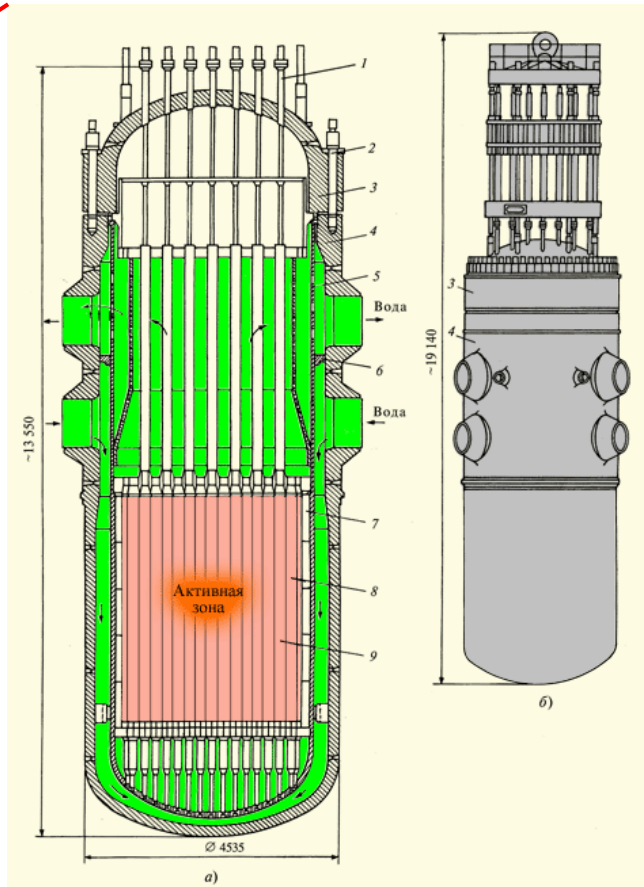


Рис. 5.4. Ядерный реактор ВВЭР-1000

Экспериментальная установка находится всего в 10 м от центра 3 ГВт реактора КАЭС (ВВЭР-1000). Поток нейтрино в $> 5 \cdot 10^{13} \nu/s/cm^2!!!$ Более того, комната находится под реактором, что дает дополнительно хорошую защиту у космических лучей (~50 м в.э.).

Проект GEMMA

GEMMA-I (выполнен)
1.5 кг HPGe, порог ~ 3 keV
14 м от реактора
фон ~ 2.5 cts/(keV kg day)

- Долгая и успешная история сотрудничества с КАЭС
- (В **GEMMA-I** получено лучшее в мире ограничение на $\mu_\nu < 2.9 \cdot 10^{-11} \mu_B$)

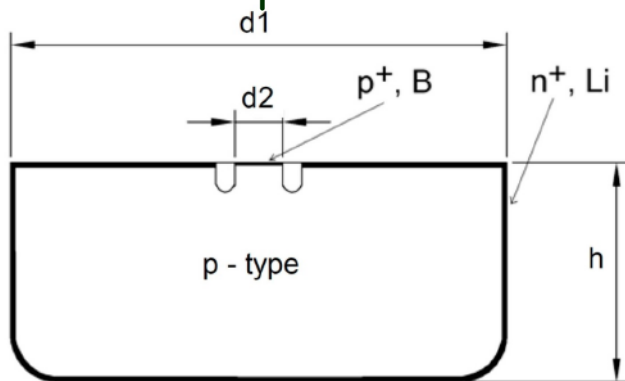
GEMMA-II (заморожен)
2x3 кг HPGe (ИТЭФ),
порог ~ 1.5 keV
10 м от реактора
фон < 1 cts/(keV kg day)

vGEN (строится)
~4x0.4 кг HPGe,
порог ~ 350 eV
10 м от реактора
фон ~ 1 cts/(keV kg day) at LSM

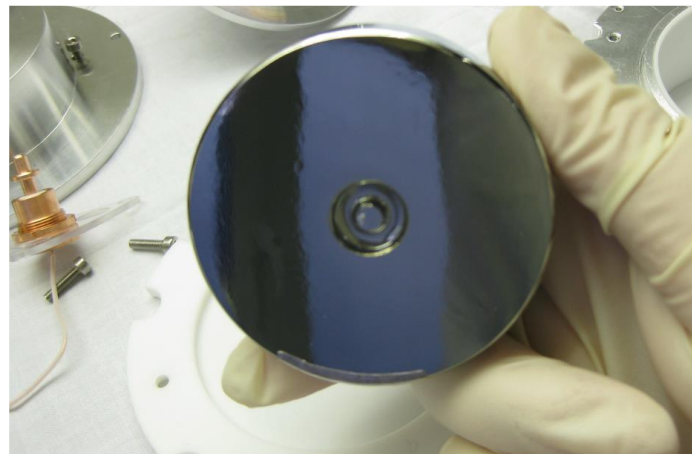
GEMMA-III (подготавливается)
4 HPGe (5.5 kg total)
порог < 200 eV
10 м от реактора
фон < 1 cts/(keV kg day)

Детекторы vGEN

Низкопороговые сверхчистые германиевые детекторы разработанные ОИЯИ совместно с BSI (Рига, Латвия). Более 50 образцов были исследованы в подземной лаборатории LSM и были найдены источники повышенного фона в GEMMA-II.

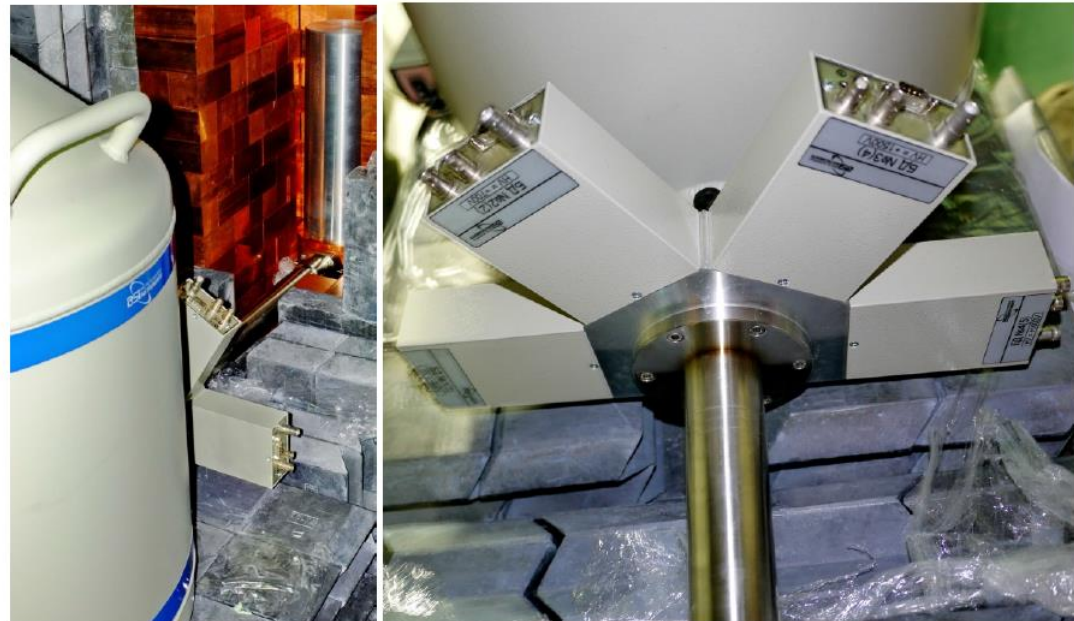
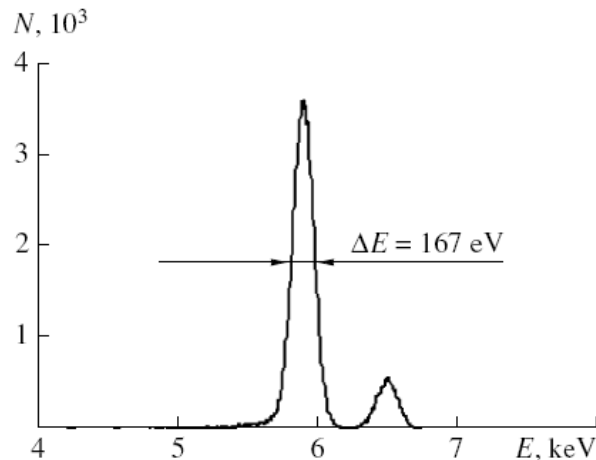
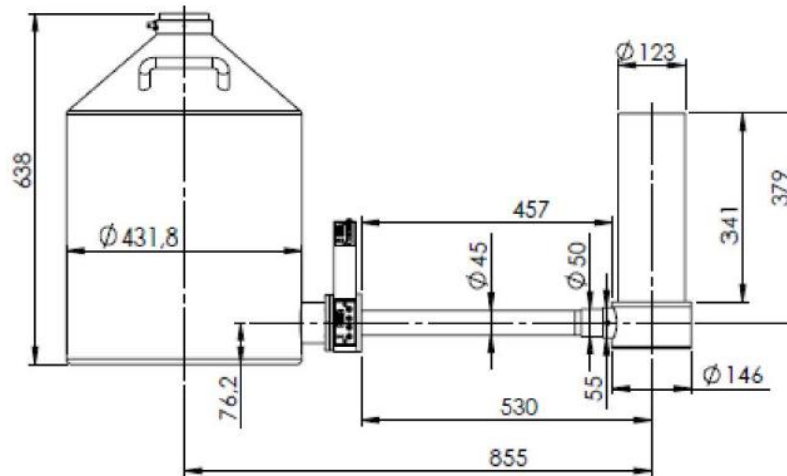


Mass ~ 400 g

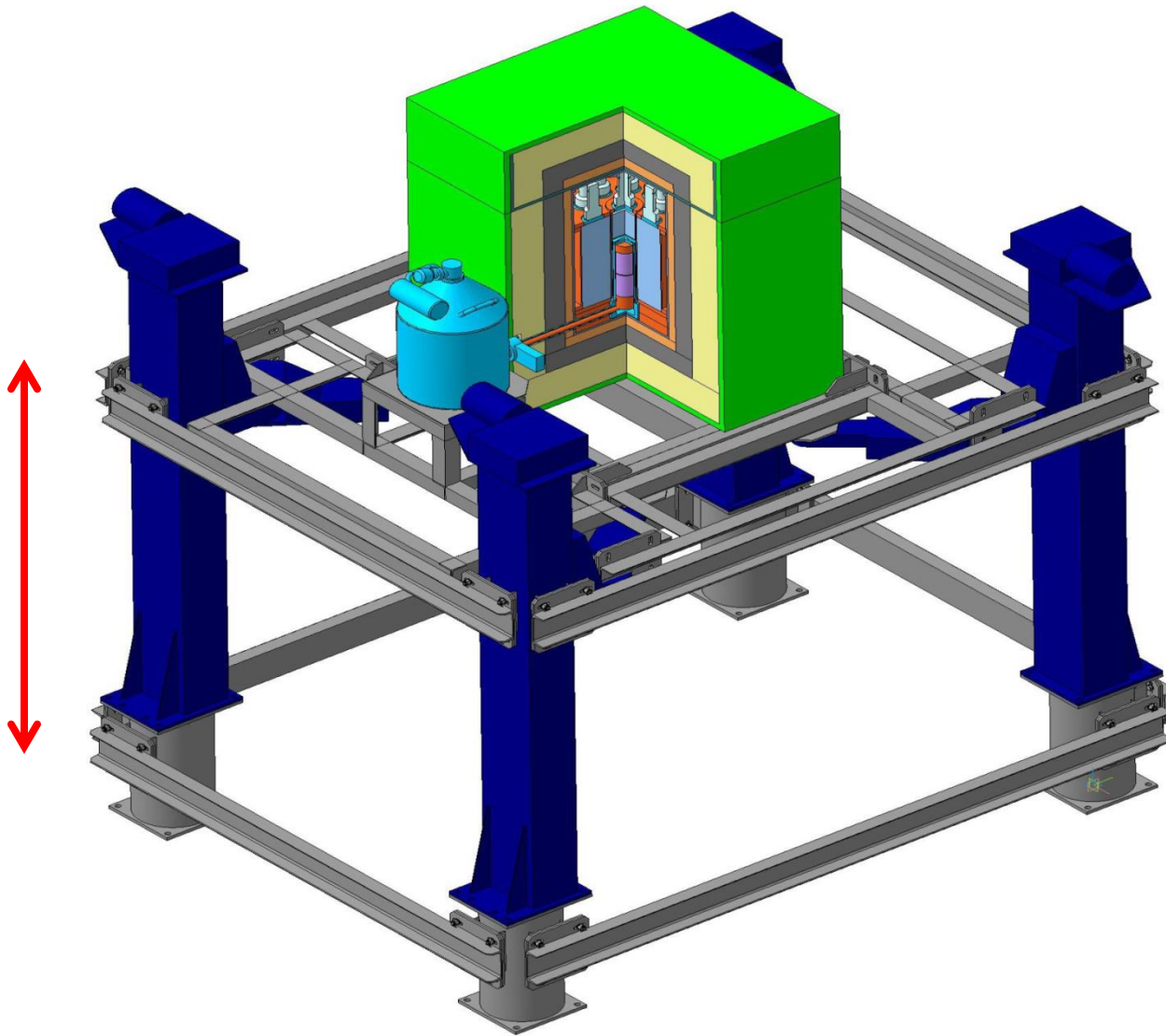


Спектрометр vGEN

- Разрешение детекторов ~ 170 eV (FWHM)
- Порог измерений ~ 350 eV
- Достаточно для детектирования когерентного рассеяния
- При таких параметрах детектора и уровне фона ~ 1 cts/(keV kg day) ожидается ~ 10 событий от КРН в день, (при уровне фона в 1 cts/day)



Подъемный механизм



Для определения сигнала будет использоваться:

- Данные Reactor OFF/ON.
- Подъемный механизм меняющий расстояние до ядра реактора (~10 - 12.5 m). Это позволяет значительно снизить систематическую погрешность при определении уровня фона.

Измерения в LSM

Измерение радиоактивной чистоты детекторов ν GEN было произведено в подземной лаборатории LSM (Модан) с использованием защиты эксперимента EDELWEISS-I. Для энергетического региона (100 - 600) keV индекс фона составил 0.66 ± 0.03 cpd/kg/keV. Для (20 - 100) keV - 1.11 ± 0.07 cpd/kg/keV. Эти данные были получены с упрощенной схемой электроники без анализа по форме импульса.

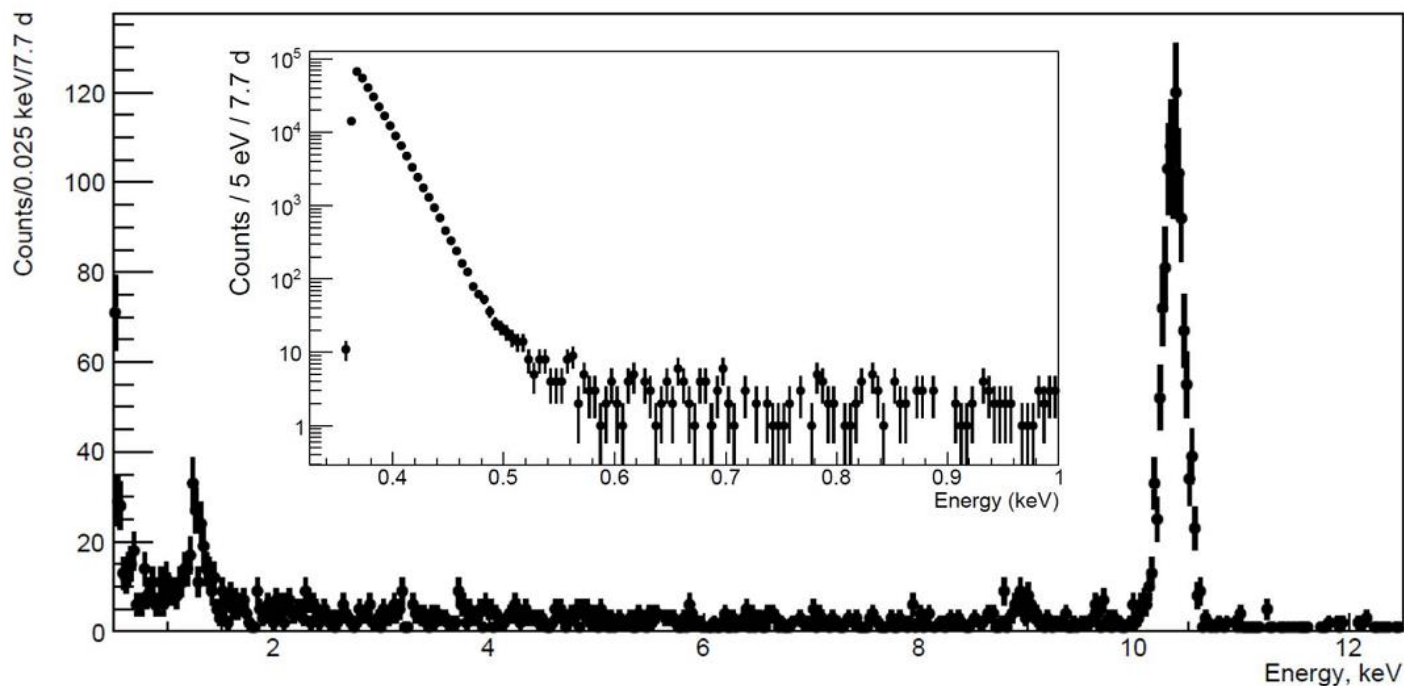


Figure 5. The low energy spectrum for detector N4. The energy scale was calibrated with clearly detected 1.3 keV and 10.37 keV cosmogenic lines. The low energy part of the spectrum is shown as the insert with the logarithmic scale.

V.Belov et. al, 2015 JINST 10 P12011

Припороговые события

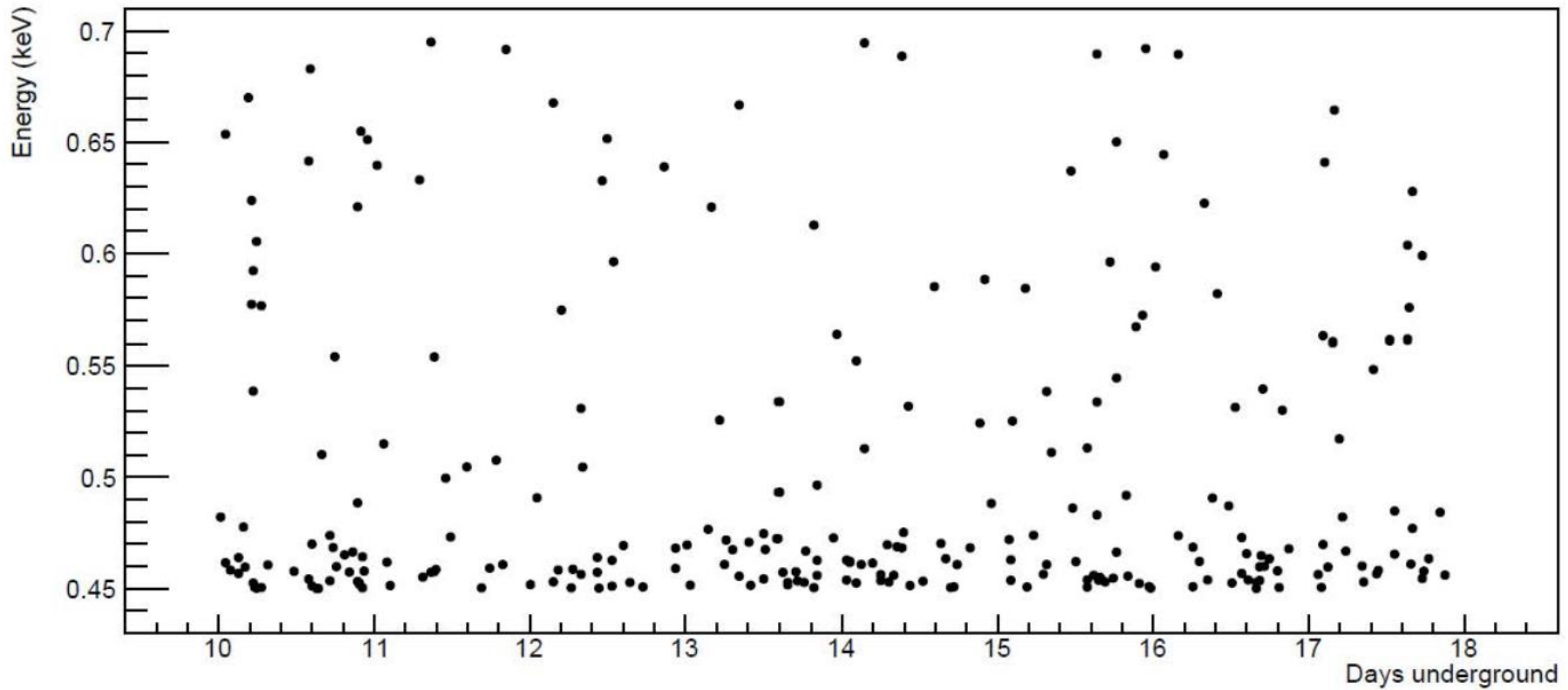


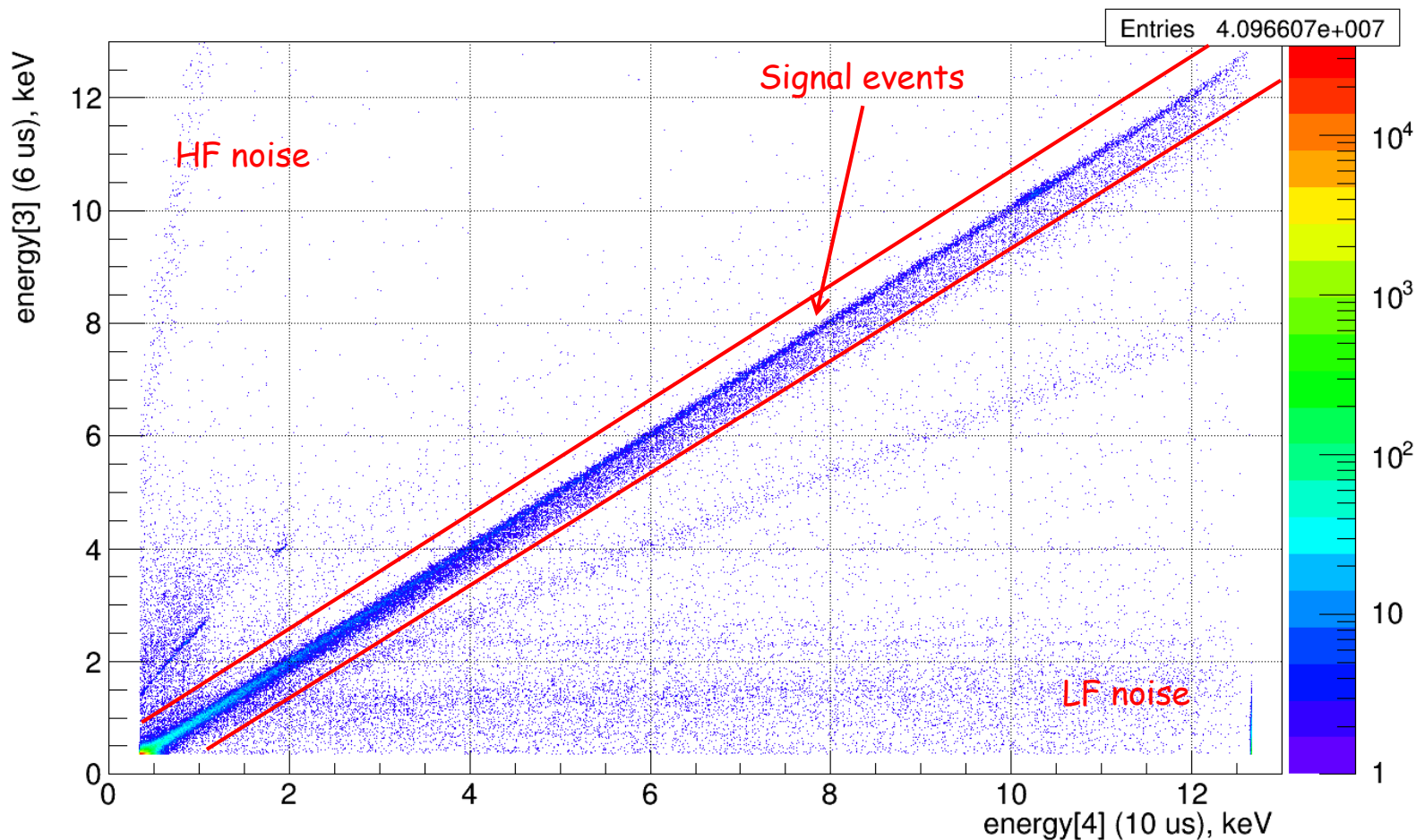
Figure 7. Events detected by detector N3 during 7.7 days. Only low energy part from 0.45 to 0.7 keV region is shown.

V.Belov et. al, 2015 JINST 10 P12011

Измерения в ОИЯИ

После измерений в подземной лаборатории детекторы были перевезены в ОИЯИ. Была установлена новая электроника и программа набора данных позволяющая записывать события в режиме реального времени. При этом набор данных ведется с использованием разных формировок, что позволяет значительно подавить фоновые события.

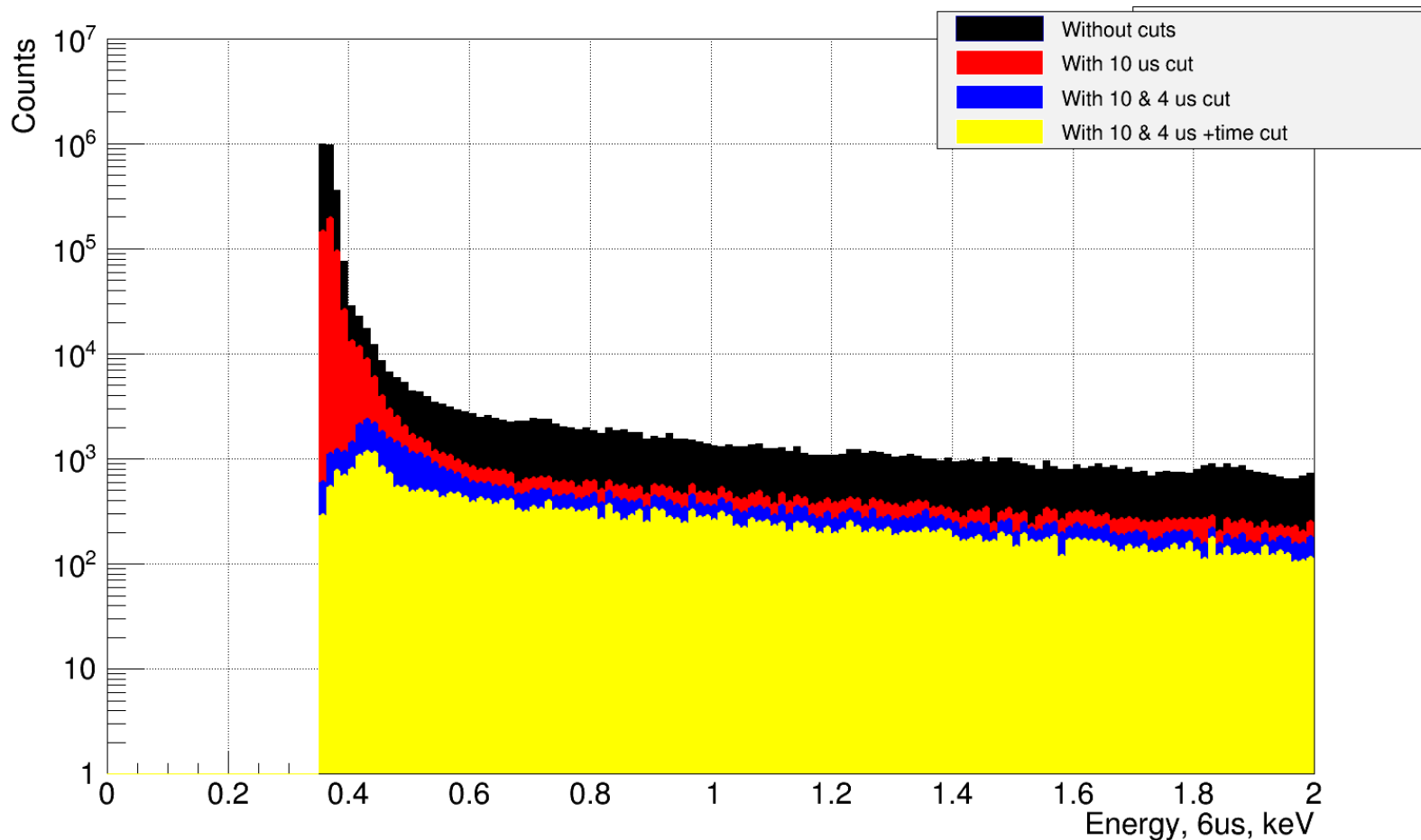
Part of the spectrum of germanium detector 4 taken for 3.01 days



Измерения в ОИЯИ

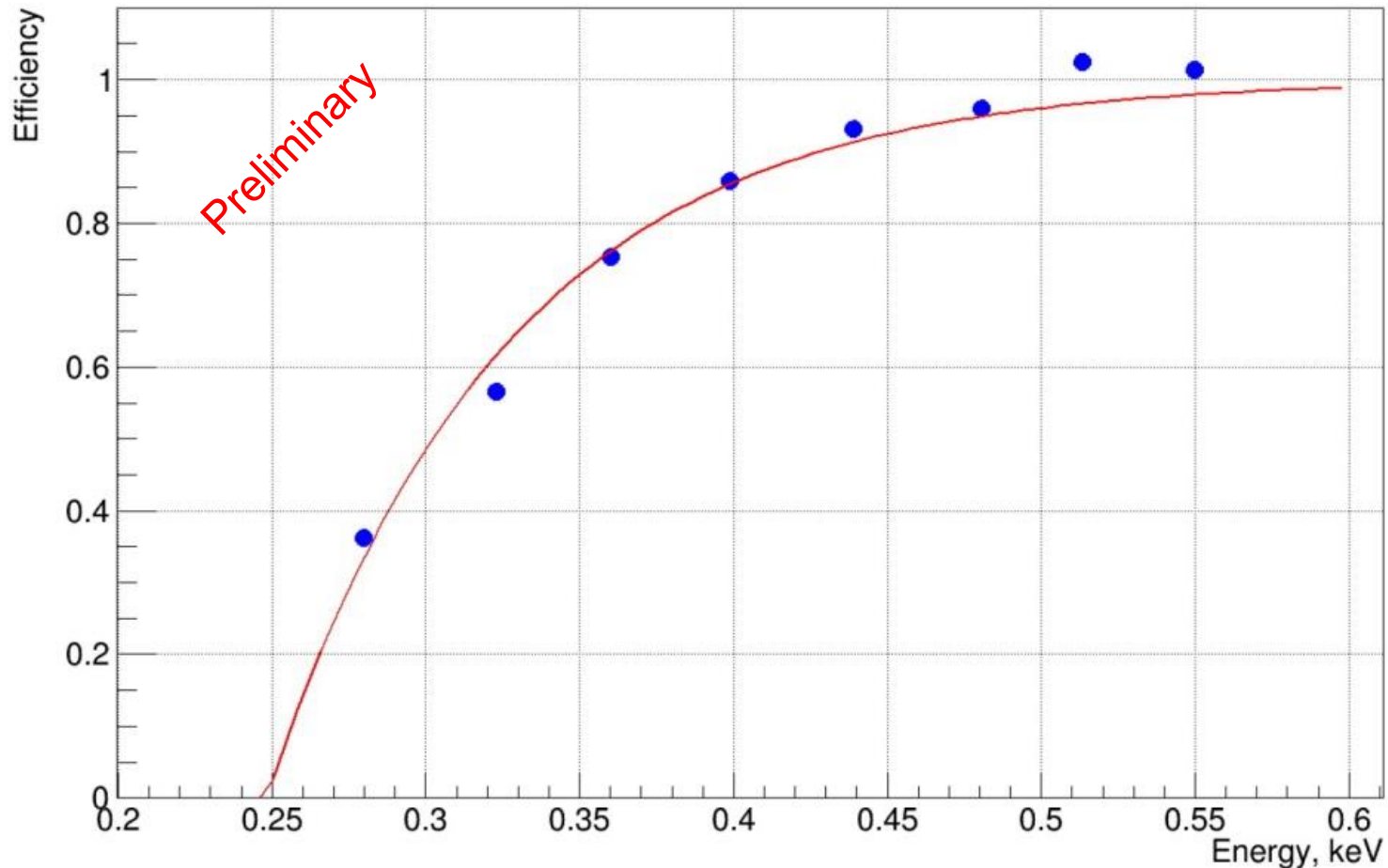
Использование различных формировок позволяет значительно подавить высоко- и низкочастотный шум. Кроме этого из анализа данных, мы исключаем периодический шум.

Part of the spectrum of germanium detector 4 per 3.01 days



Эффективность регистрации

Эффективность регистрации событий измерялась с помощью генератора импульсов. Было показано, что эффективность регистрации событий после отбора остается достаточно высокой при энергиях > 350 эВ. Что достаточно для регистрации КРН.



Установка на КАЭС

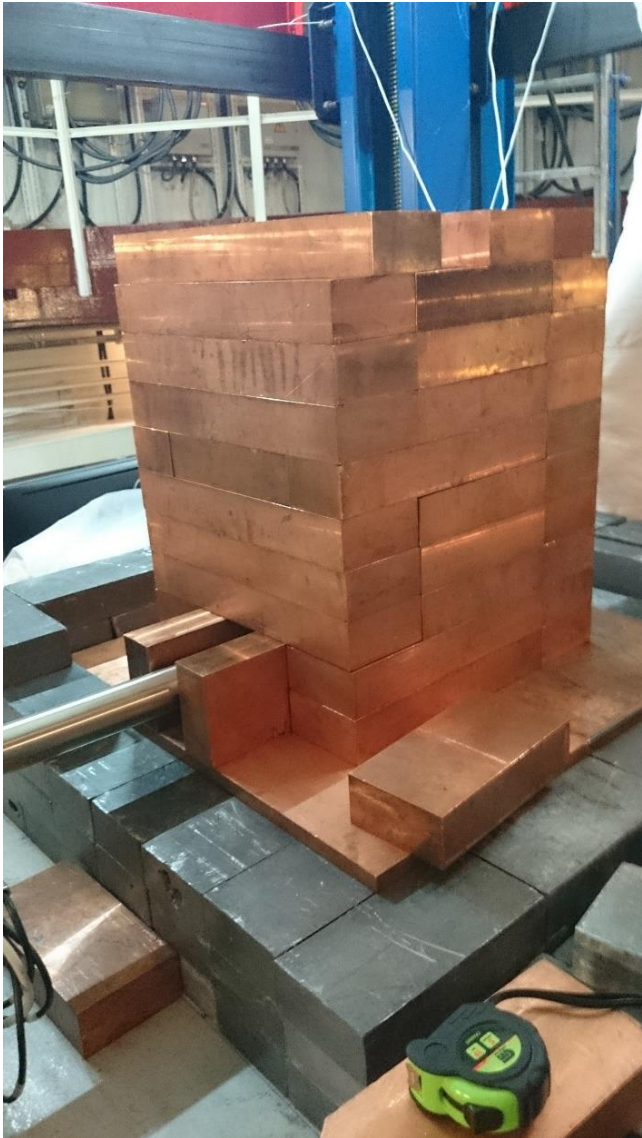
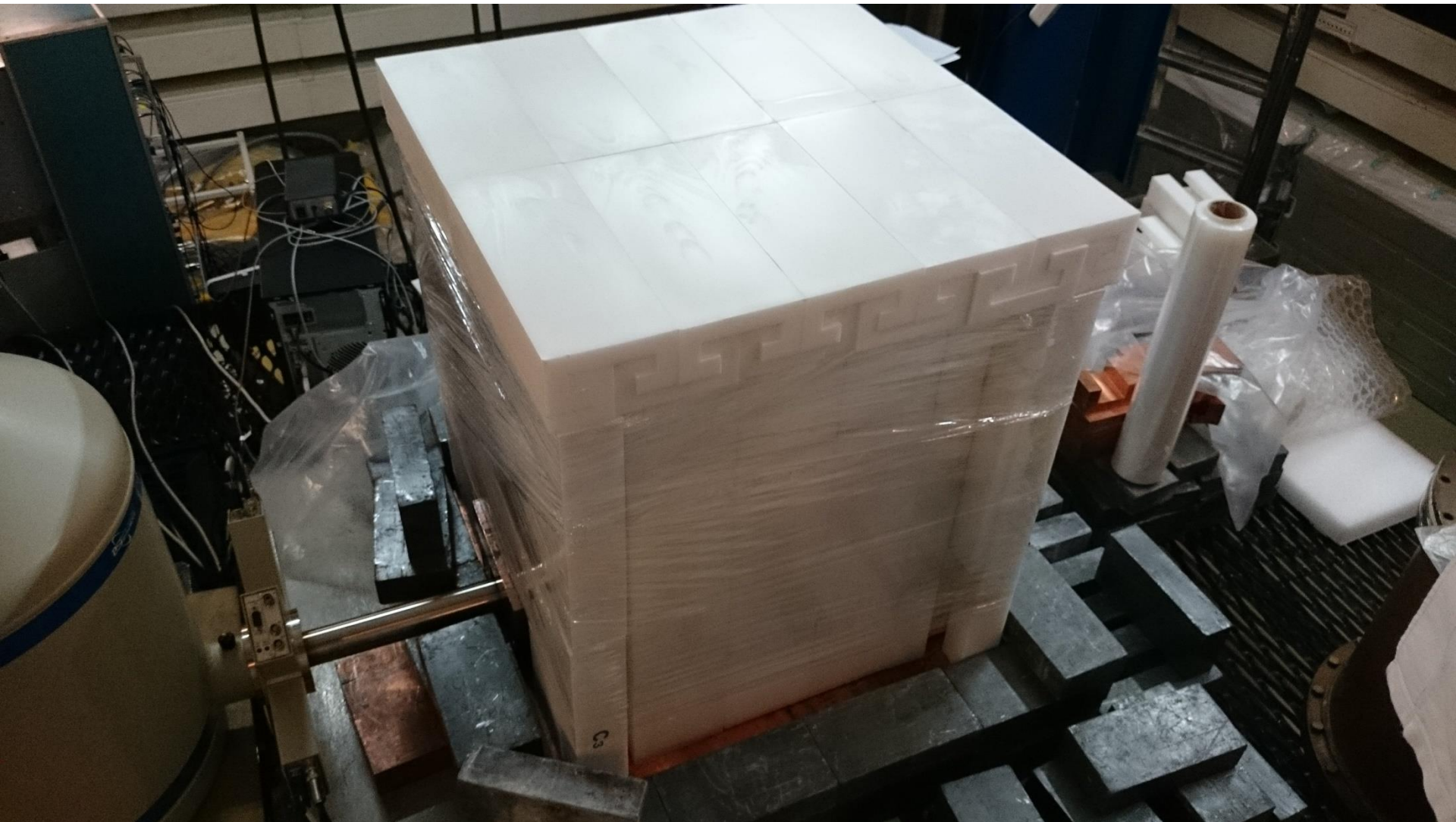


Схема пассивной защиты vGEN:

- 10 см меди
- 8 см борированный полиэтилен (3%)
- 10 см свинец
- 8 см борированный полиэтилен

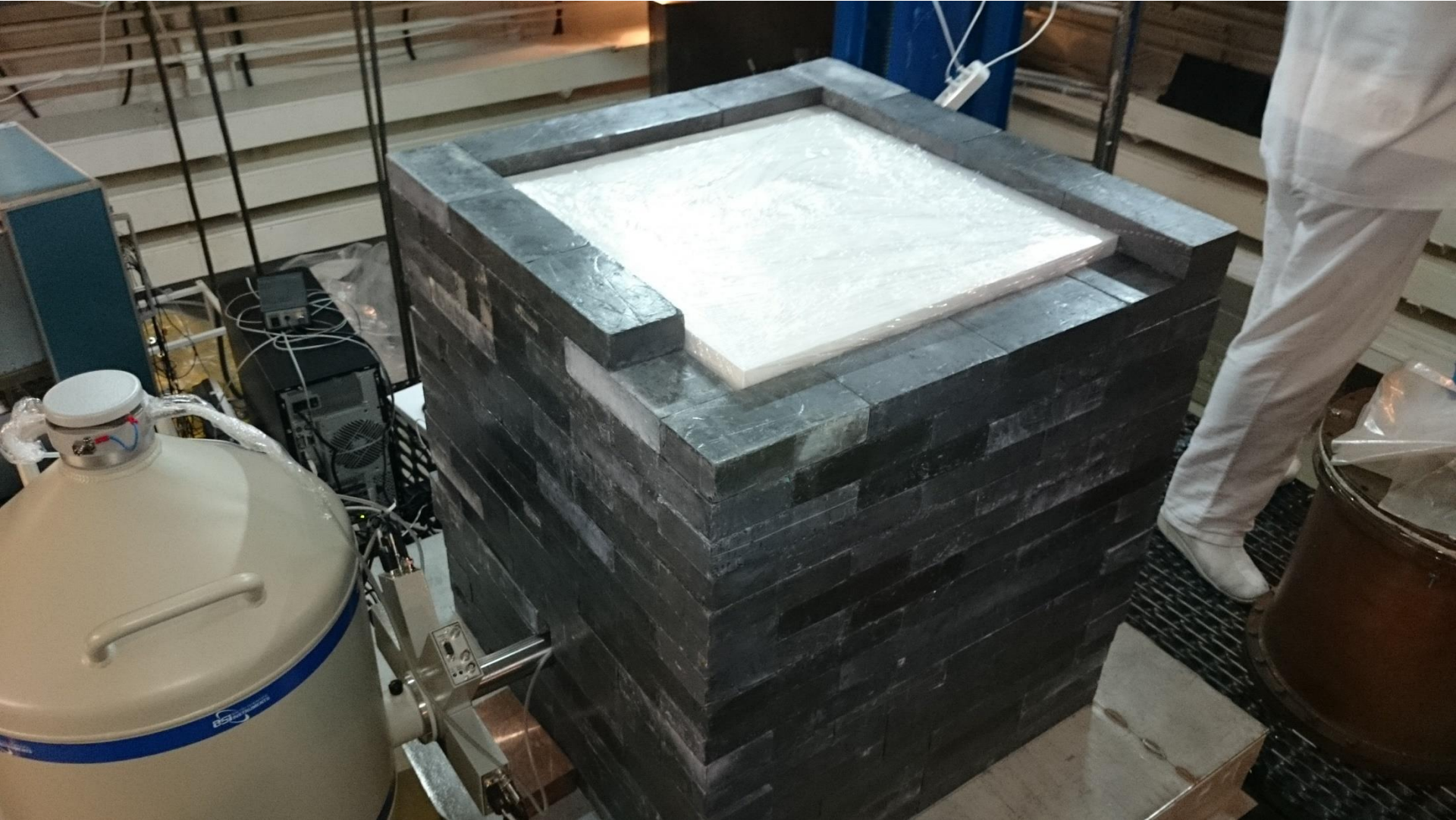
+ мюонное veto (5 см)

Установка на КАЭС



Для снижения уровня радона внутренняя часть защиты вентилируется азотом

Установка на КАЭС



Установка на КАЭС



Первые измерения с vGEN показали, что медная защита (от GEMMA-I) имеет загрязнение ^{137}Cs выше приемлемого уровня. Были проведены несколько операций по ее очистке, которые однако были недостаточно эффективными. Поэтому была приобретена новая сверхчистая медь, которая будет установлена вместо имеющейся. Ее чистота была проверена в подземной лаборатории LSM (в октябре 2017).

Приготовление μ -вето



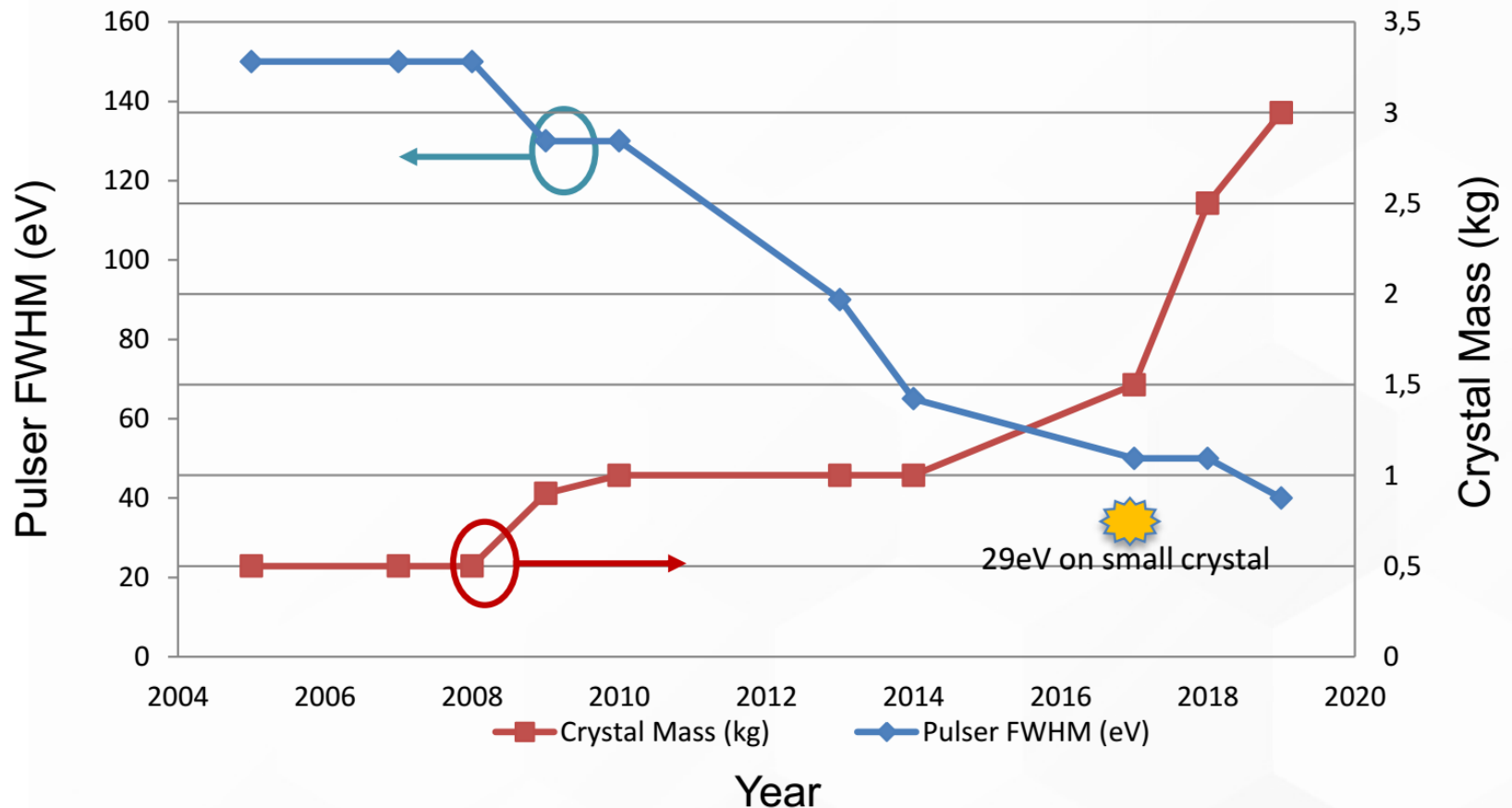
Сцинтилляционные пластины (5 см толщиной) для мюонного вето изготовлены и тестируются в НЭОЯС и РХ (ЛЯП), к 117.

Планы по ν GEN

- Установить новую защиту установки совместно с мюонным вето.
- Проверить уровень фона установки ν GEN под реактором.
- В случае повышенного фона мы можем также использовать внутреннюю защиту из NaI.
- Детекторы от BSI не являются пассивными -> проблемы при долгосрочном использовании.
- Произвести апгрейд установки с использованием новые детекторы (CANBERRA) с лучшим разрешением и порогом (GEMMA-III установка).

Детекторы для GEMMA-III

В последнее время технологии изготовления детекторов сильно продвинулись. CANBERRA может изготавливать детекторы с массой > 1 кг при этом разрешение составляет лучше 80 эВ (FWHM), что позволит достичь порога регистрации лучше 200 эВ.

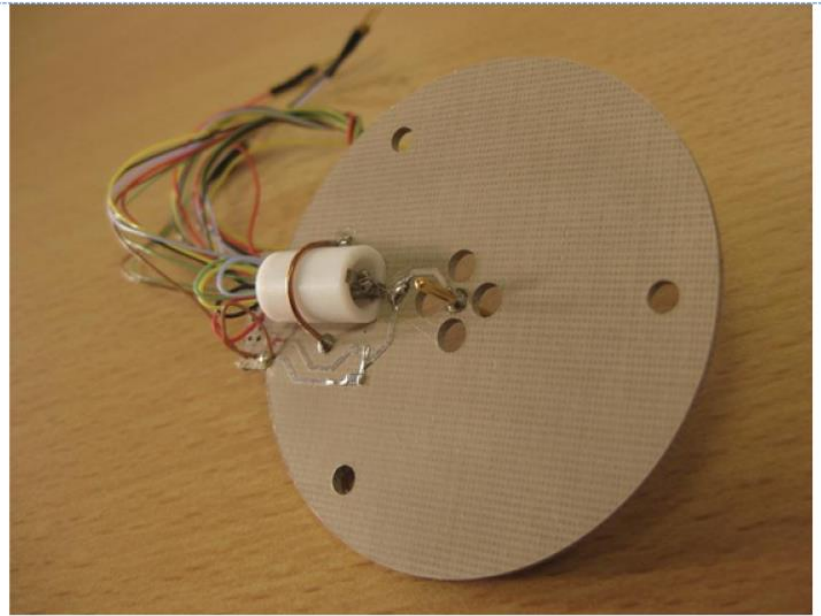
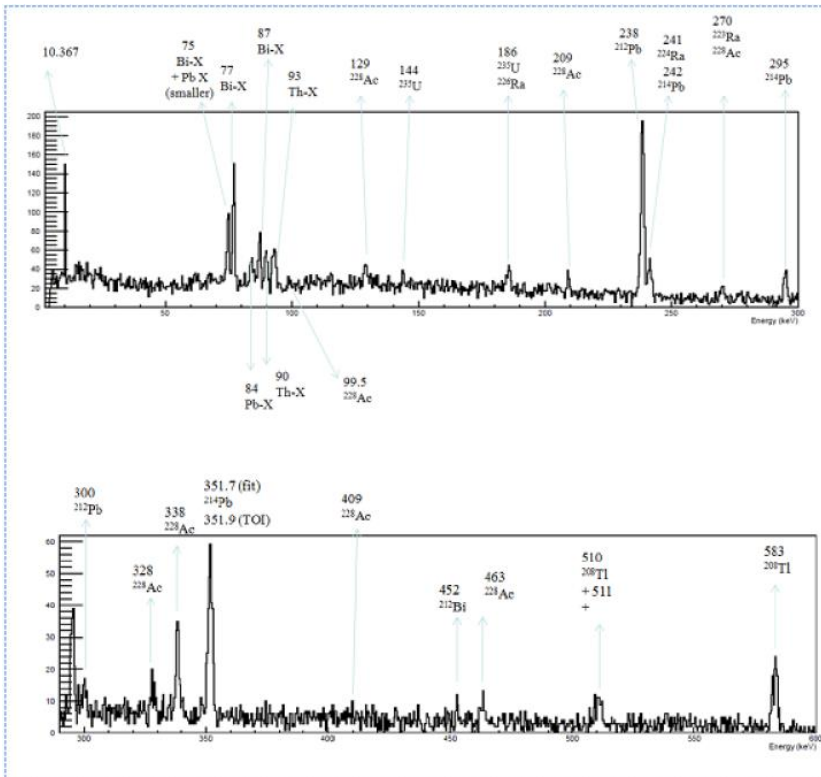


Планы по GEMMA-III

- В начале 2018 года должен быть изготовлен первый детектор по проекту GEMMA-III. Размеры 62x62 мм. Масса ~ 1 кг, разрешение около 80 эВ (FWHM).
- После успешного тестирования детектора в LSM -> произвести замену детекторов vGEN.
- Всего планируется использовать 4 детектора с общей массой ~ 5.5 кг.
- Планируемая чувствительность к ММН ~ $9 \cdot 10^{-12} \mu\text{B}$ после нескольких лет измерений.
- Оцениваемое число событий от КРН ~ 200 в сутки, это позволит изучать нестандартные взаимодействия нейтрино, стерильное нейтрино, ...

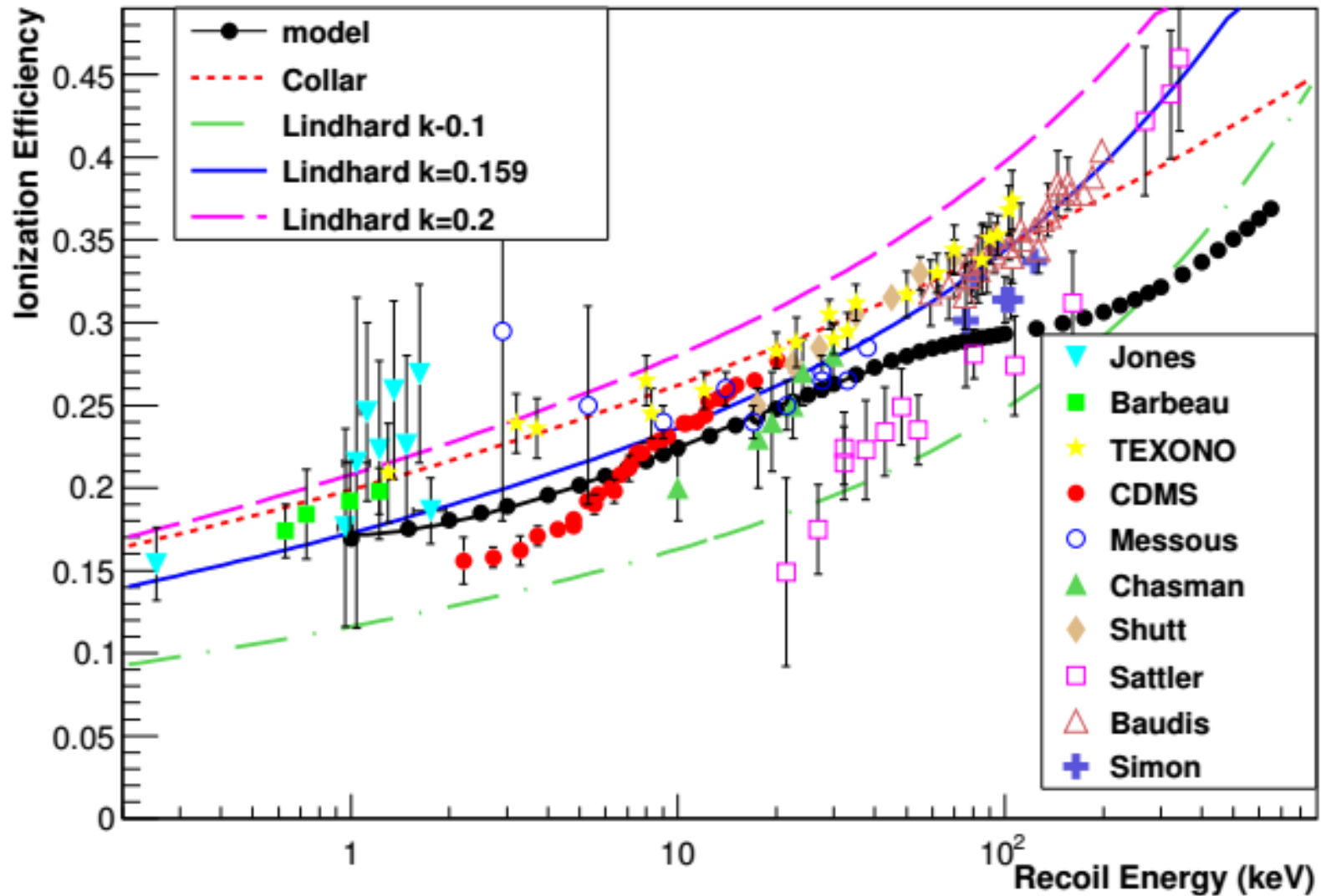
Back up

GEMMA-II



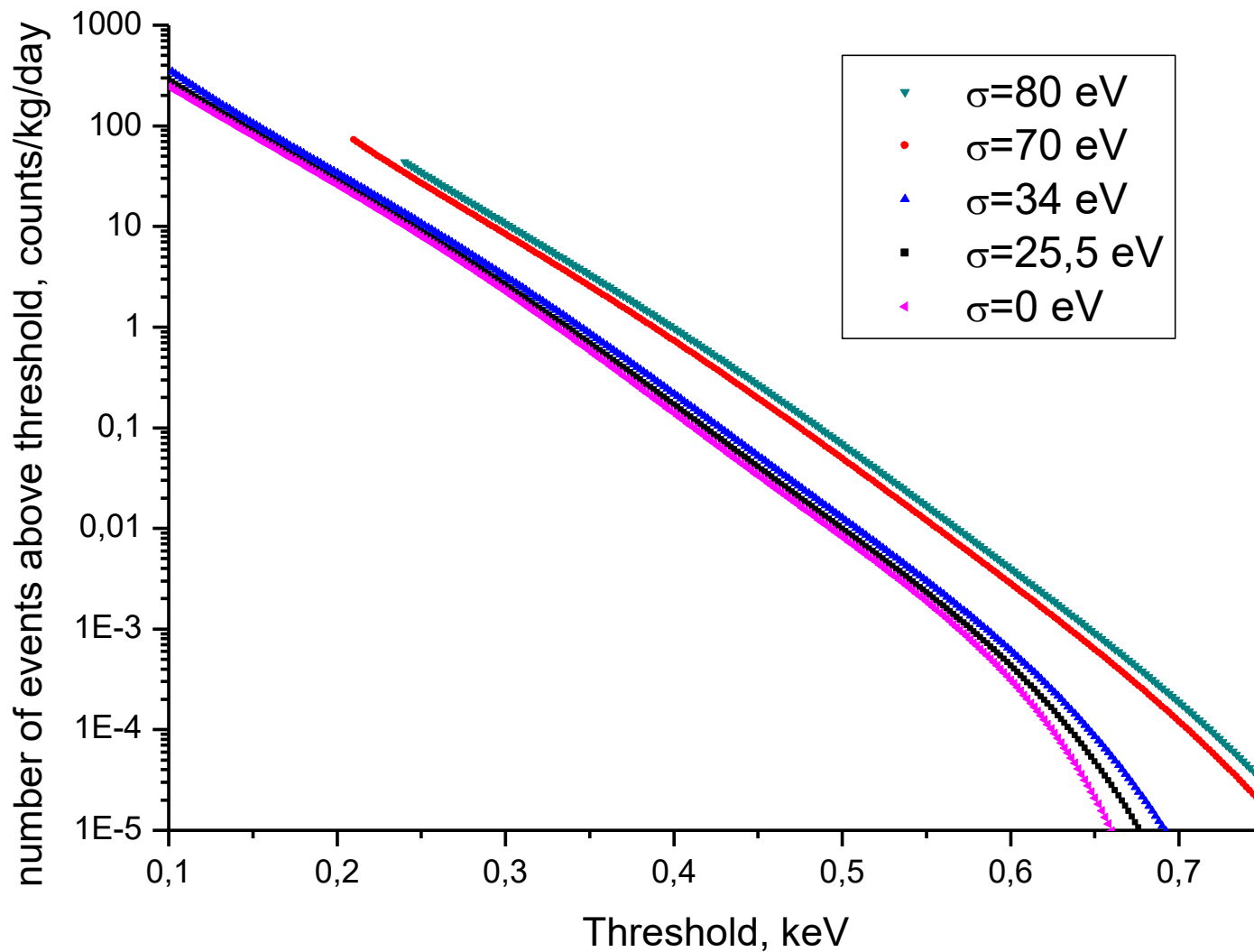
Main problem is background (level is ~100 times higher of desired value)

Quenching



D.Barker, D.M.Mei, *Astropart.Phys.* 38 (2012) 1-6

Expected number of events



Sensitivity

$$\mu_{\nu} \propto \frac{1}{\sqrt{N_{\nu}}} \left(\frac{B}{mt} \right)^{\frac{1}{4}}$$

N_{ν} : number of signal events expected

B : background level in the ROI

m : target (=detector) mass

t : measurement time

$$N_{\nu} \sim \varphi_{\nu} (\sim \text{Power} / r^2) \\ \sim (T_{max} - T_{min} / T_{max} * T_{min})^{1/2}$$

$$\varphi_{\nu} \sim 2.7 \times 10^{13} \text{ } \nu / \text{cm}^2 / \text{s}$$

$$t \sim 4 \text{ years}$$

$$B \sim 2.5 \text{ keV}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$$

$$m \sim 1.5 \text{ kg}$$

$$T_{th} \sim 2.8 \text{ keV}$$

Investigation of neutrino properties with
the low-background germanium spectrometer GEMMA-III

GEMMA-III

CODE OF THEME 03-2-1100-2010/2018

V.V.Belov, V.B.Brudanin, V.G.Egorov, M.V.Fomina, A.V.Lubashevskiy, D.V.Medvedev,
D.V.Ponomarev, M.V.Shirchenko, S.V.Rozov, I.E.Rozova, I.V.Zhitnikov, E.A.Yakushev,
D.R.Zinatulina

Laboratory of Nuclear Problems, JINR

NAMES OF PROJECT LEADERS: V.B.Brudanin

NAME OF PROJECT DEPUTY LEADERS: A.V.Lubashevskiy, E.A.Yakushev

DATE OF SUBMISSION OF PROPOSAL OF PROJECT TO SOD _____

DATE OF THE LABORATORY STC _____ DOCUMENT NUMBER _____

STARTING DATE OF PROJECT January 2019 (FOR EXTENSION OF
PROJECT — DATE OF ITS FIRST APPROVAL) 07.02.2014

Detail information about JINR group human resources:

Name	Category	Responsibilities	Time that each participant will give to the work under the Project in relation to its Full Time Equivalent(FTE)
V. Brudanin	Head of department	Administrative work, project management	0.2
V. Belov	Junior researcher	Muon veto, MC	0.2
V. Egorov	Head of sector	Management, constructions, data analysis	0.3
M. Fomina	Junior researcher	Muon veto, MC	0.3
A. Lubashevskiy	Senior Researcher	Data analysis, MC, commissioning and administrative work	0.5
D. Medvedev	Researcher	Data analysis, MC	0.6
D. Ponomarev	Engineer	Constructions, detectors building, testing. Experiment running.	0.5
M. Shirchenko	Researcher	Experiment running. Data analysis	0.3
S. Rozov	Engineer	Detector building, testing, calibration, running.	0.5
I. Rozova	Engineer	Data analysis	0.5
I. Zhitnikov	Junior researcher	Experiment running, data analysis	0.2
E. Yakushev	Head of sector	Building, commissioning, running, data analysis	0.3
D. Zinatulina	Researcher	Muon veto, MC	0.2
Total FTE (Engineers): 1.5, Total FTE (Scientific staff): 3.1, Total FTE: 4.6			