



Исследования реакторных антинейтрино в эксперименте ν GeN

А.В.Лубашевский от коллаборации ν GeN
(в рамках продления проекта GEMMA)



Цели проекта vGeN

Эксперимент **vGeN** – продолжение предыдущих проектов **GEMMA**. Целью **vGeN** является исследование свойств **нейтрино** с помощью **германиевых детекторов** расположенных вблизи **энергетического реактора**. В частности осуществляется **поиск магнитного момента нейтрино, когерентного рассеяния нейтрино на ядрах германия**, и других процессов.

Магнитный Момент Нейтрино (ММН) – это фундаментальный параметр, исследование которого может привести к результатам, выходящим за рамки Стандартной Модели. Минимально Расширенная Стандартная Модель предсказывает очень малое значение магнитного момента для массивных нейтрино ($\mu_\nu < 10^{-19} \mu_B$), которое не может быть измерено в современных экспериментах. Однако, в большом количестве расширений Стандартной Модели предсказывается, что значение ММН может быть на уровне $10^{-(10 \div 12)} \mu_B$ для Майорановских нейтрино. Наблюдение значения ММН выше чем $10^{-14} \mu_B$ будет свидетельствовать об обнаружении физики за пределами Стандартной Модели и о Майорановской природе нейтрино.

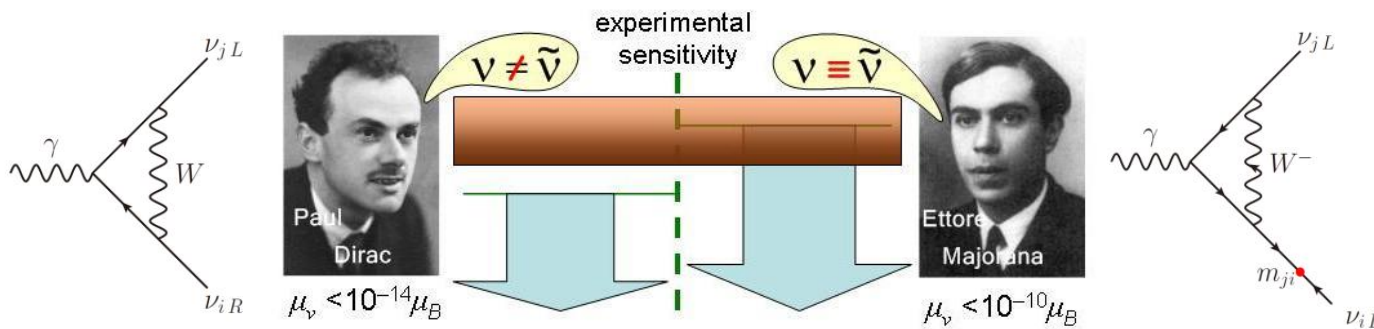


Figure 1: Magnetic moment diagram for Dirac neutrinos.

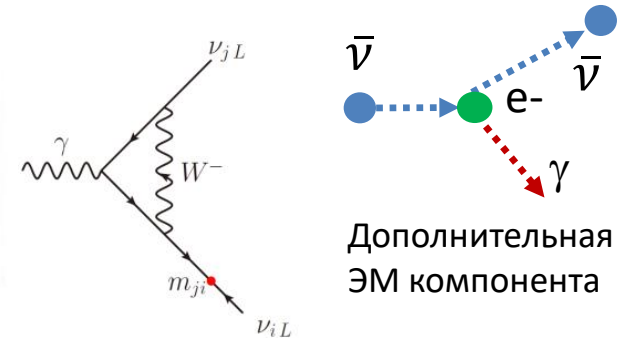


Figure 2: Magnetic moment diagram for Majorana neutrinos.

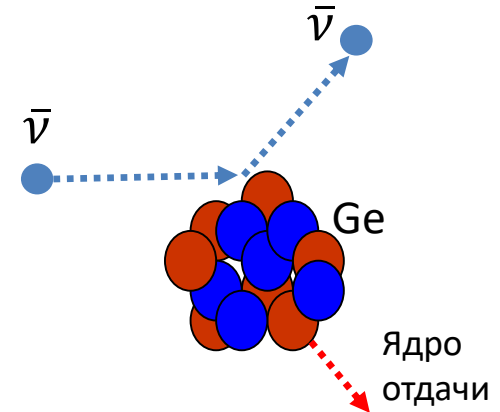
В эксперименте **GEMMA-I** поставлено **лучшее в мире лабораторное ограничение** $\mu_\nu < 2.9 \cdot 10^{-11} \mu_B$

Цели проекта vGeN

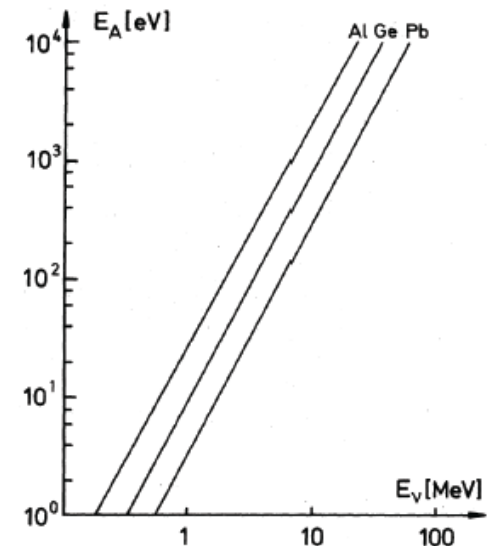
- **Когерентное рассеяние нейтрино на ядрах вещества (КРН)** – это процесс, предсказанный в рамках Стандартной модели.
- Никогда не был обнаружен для реакторных нейтрино.
- Детектирование этого процесса является важным тестом СМ.
- Большой интерес к этому процессу вызван еще тем, что с помощью него можно производить поиск нестандартных взаимодействий нейтрино, стерильного нейтрино, исследовать ядерные форм факторы и производить другие исследования.

- $E_\nu < 50$ МэВ (области полной когерентности ~ 30 МэВ)
- Сечение рассеяния увеличено на несколько порядков по сравнению с «обычным» рассеянием
- Пропорционально квадрату числа нейтронов N^2
- Энергия отдачи очень мала – меньше нескольких кэВ.

В настоящее время только в эксперименте COHERENT было заявлено об обнаружении КРН. Однако, эти результаты были получены с достаточно высокоэнергичными нейтрино, в области близкой к пределу когерентности. Проект vGeN нацелен на регистрацию этого процесса в области **полной когерентности**.



$$\sigma_{tot} \approx \frac{G_F^2}{4\pi^2} \cdot N^2 \cdot E_\nu^2$$





Коллаборация **vGeN** состоит из сотрудников ОИЯИ и ИТЭФ:

JINR (Dubna):

V.V.Belov, V.B.Brudanin, V.A.Evsenkin, S.A.Evseev, D.V.Filosofov, M.V.Fomina, L.Grubchin, U.B.Gurov, A.Kh.Inoyatov, S.L.Katulina, S.V.Kazarcev, S.P.Kiyanov, A.S.Kuznecov, A.V.Lubashevskiy, D.V.Medvedev, D.V.Ponomarev, D.S.Pushkov, A.V.Salamatin, K.V.Shakhov, Z.Kh.Khukhvatov, V.G.Sandukovsky, M.V.Shirchenko, E.A.Shevchik, S.V.Rozov, I.E.Rozova, V.P.Volnikn, I.V.Zhitnikov, E.A.Yakushev

ITEP (Moscow):

A. G. Beda, A. S. Starostin

Источник нейтрино - КАЭС

- ВВЭР-1000 на Калининской АЭС (3.1 ГВт – тепловая мощность)
- $\sim 6 \times 10^{20}$ нейтрино в секунду
- Дорога в пути от Дубны занимает ~ 4.5 часа (280 км).



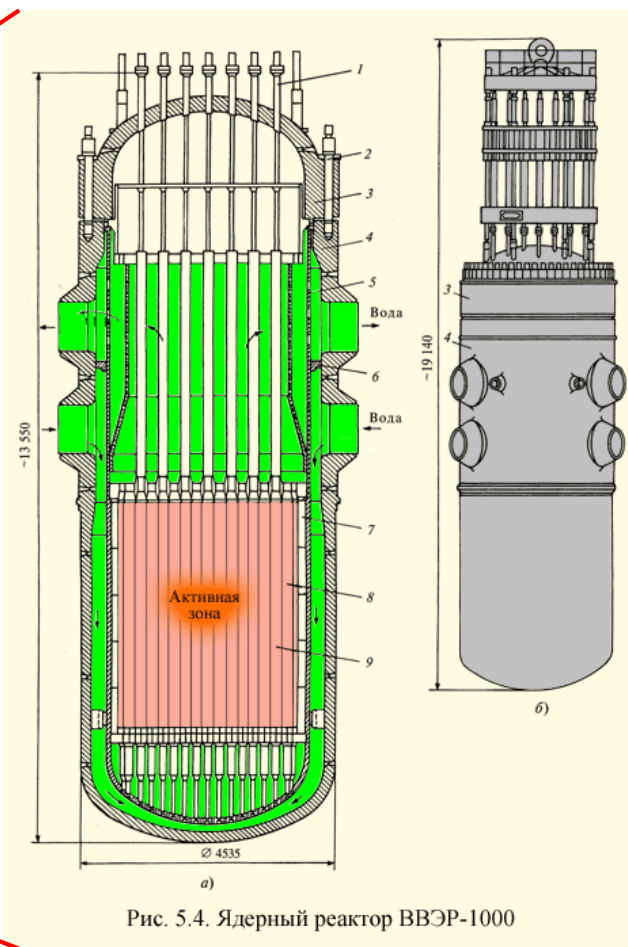
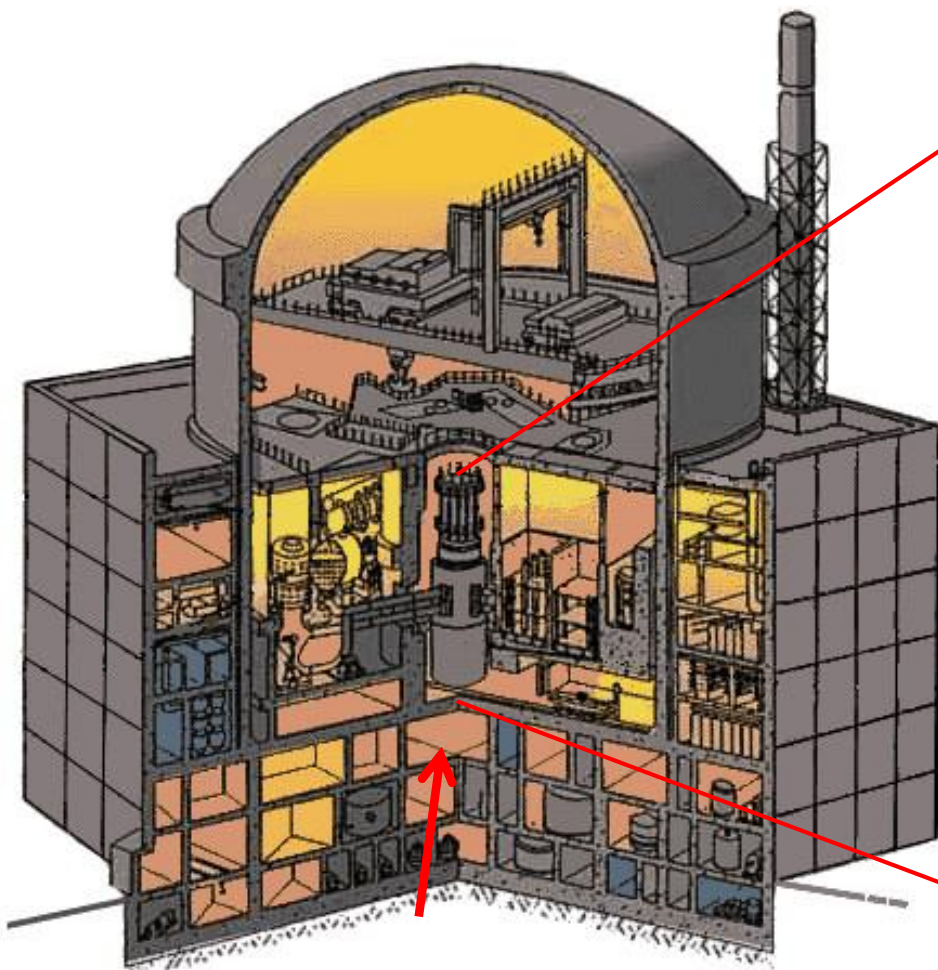
Smolensk



- ЛЯП имеет успешный опыт работы на КАЭС (более 15 лет)
- Исследования в рамках ν GeN ведутся в симбиозе с исследованиями для DANSS и RICOCHET.

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

Источник нейтрино



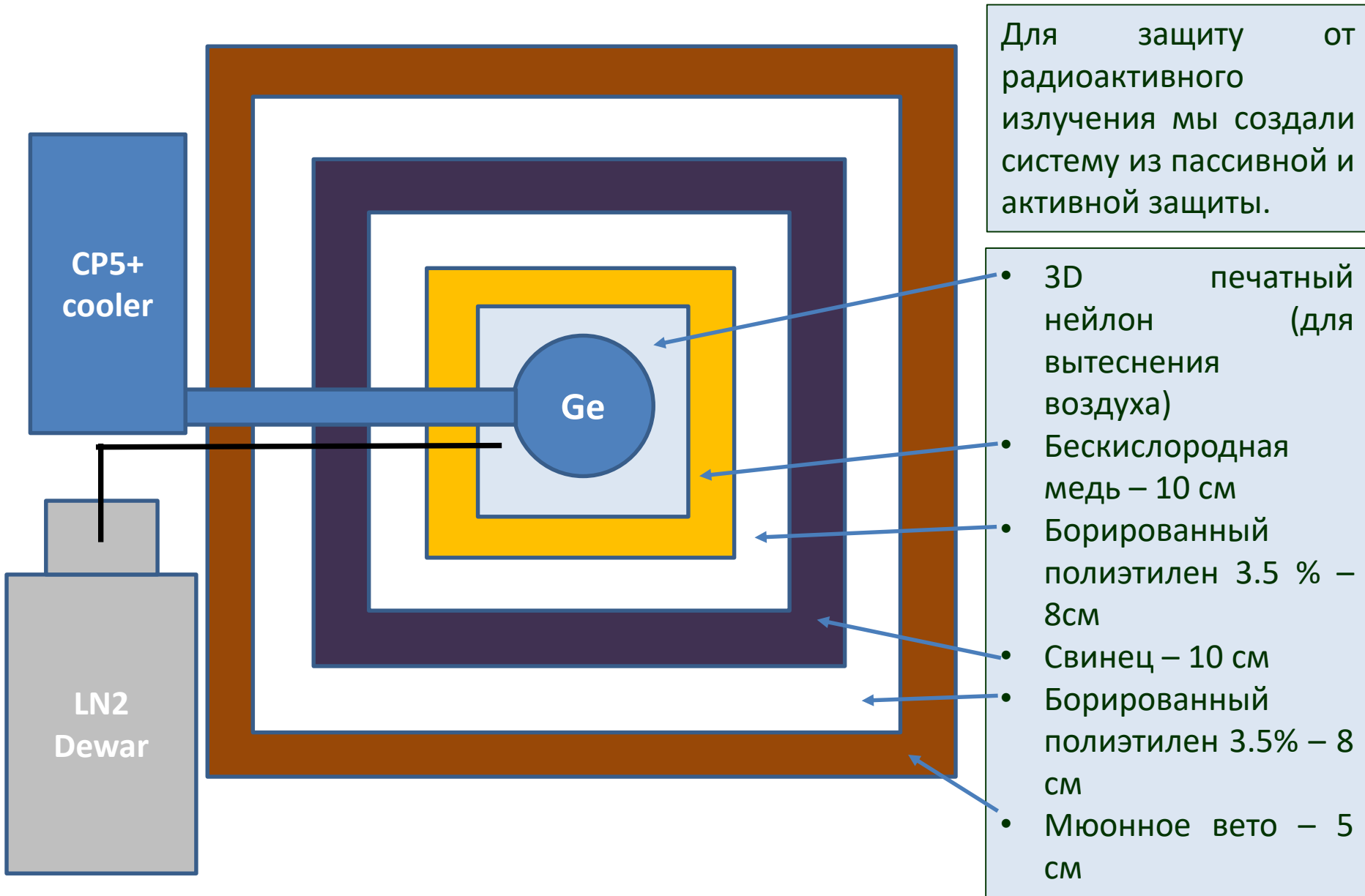
Экспериментальная установка строится в непосредственной близости от активной зоны реактора (~ 10 м), что дает поток нейтрино свыше $> 5 \cdot 10^{13}$ нейтрино/(сек·см²) – (рекордный поток!). Кроме того, расположение экспериментально зала позволяет иметь хорошую защиту от космического излучения ~ 50 м в.э.

HPGe detector for ν GeN

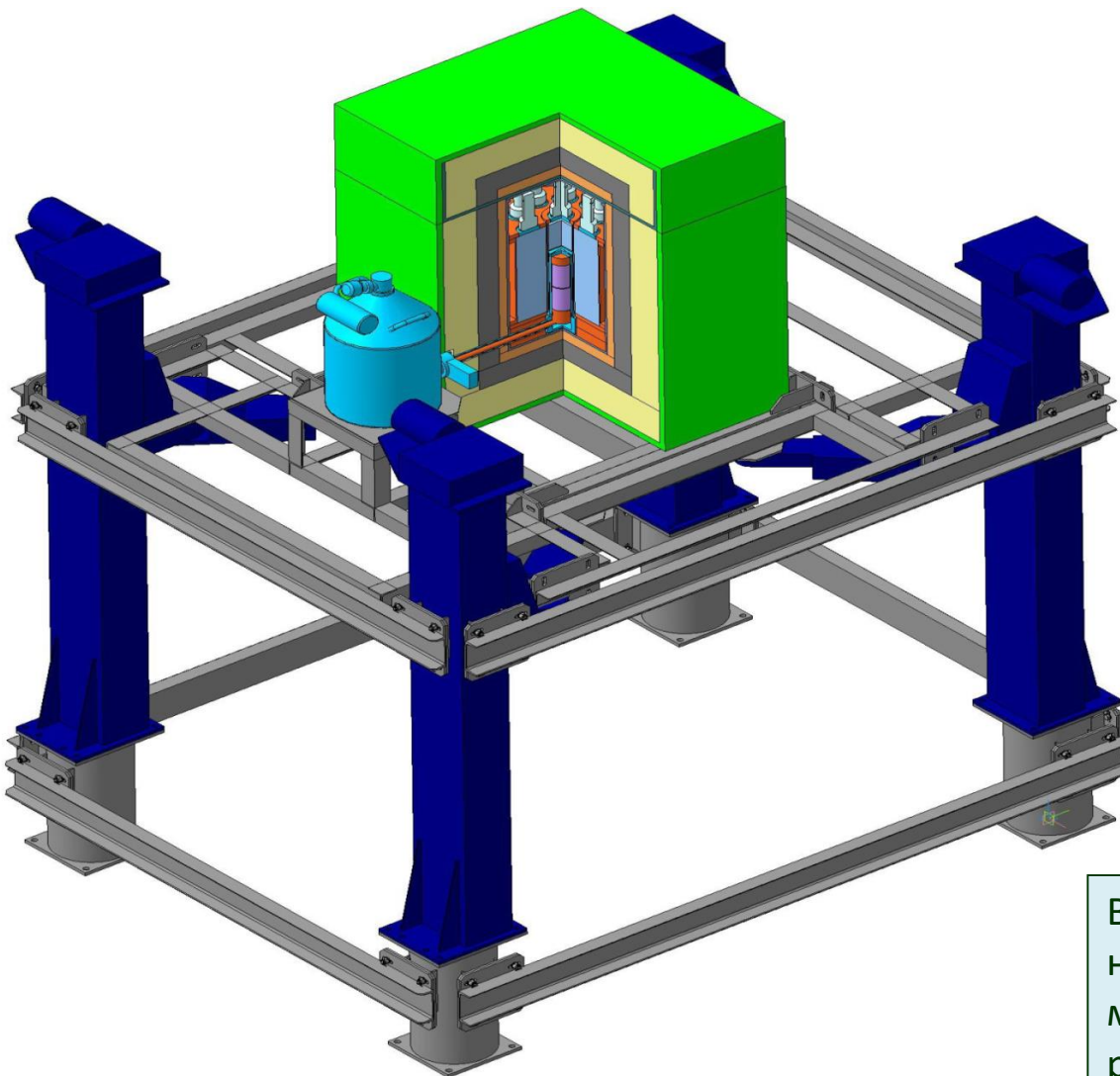


Для детектирования сигнала от нейтрино используются специально разработанные с учетом требований низкофонности и низкороговости HPGe детекторы производства CANBERRA (Mirion, Lingosheim). Используются детекторы с азотным и электронным охлаждением. Было изготовлено 4 детектора общей массой ~ 5.5 кг.

Схема защиты спектрометра



Подъемный механизм @ КАЭС



Нами был изготовлен специальный подъемник для различения искомого сигнала от фонового и шумового предусмотрен подъемный механизм, позволяющий изменять расстояние до активной зоны реактора.

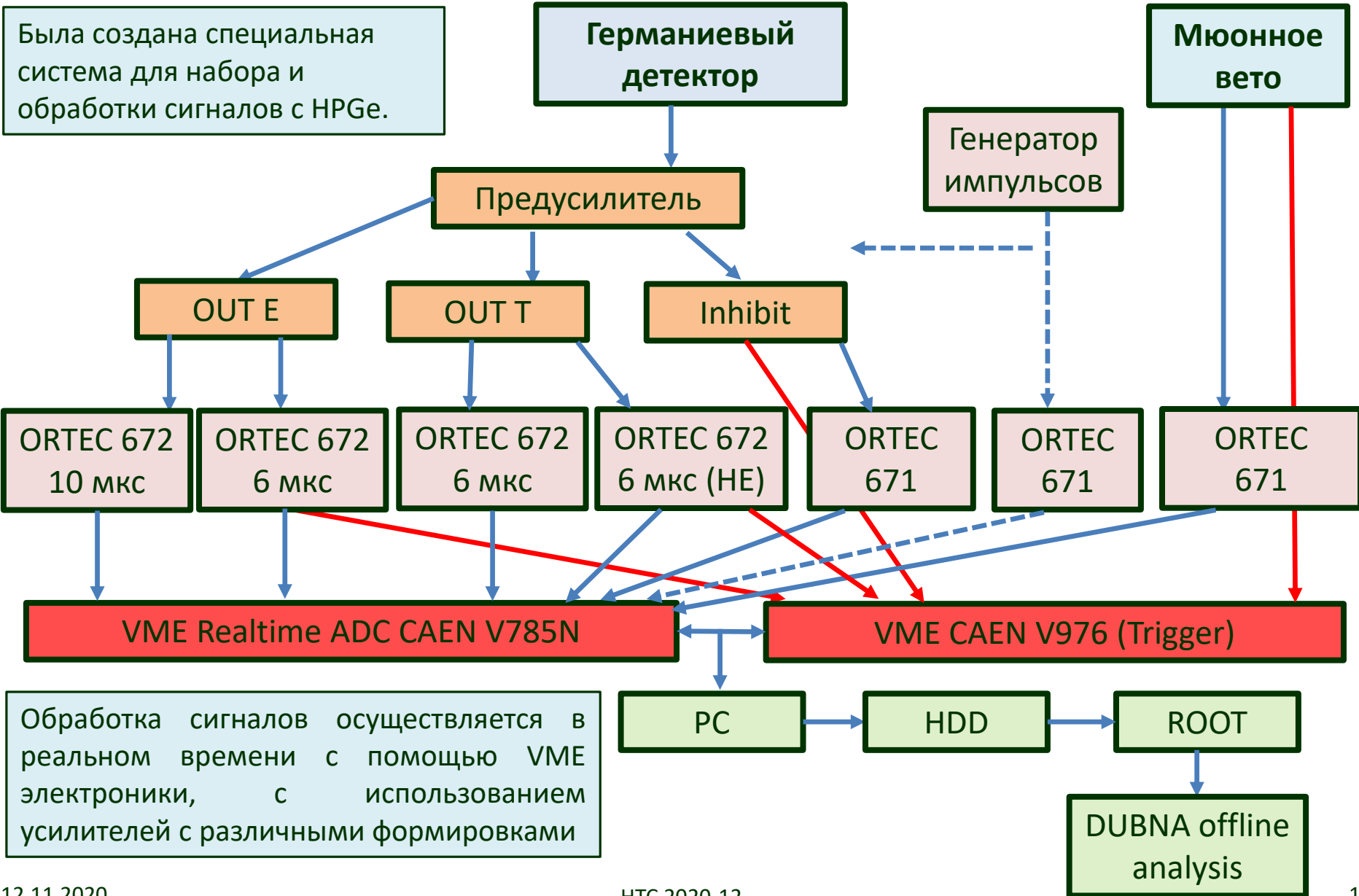
10.869 м - верхнее положение

Расстояние от детектора до центра активной зоны реактора:

11.935 м – нижнее положение

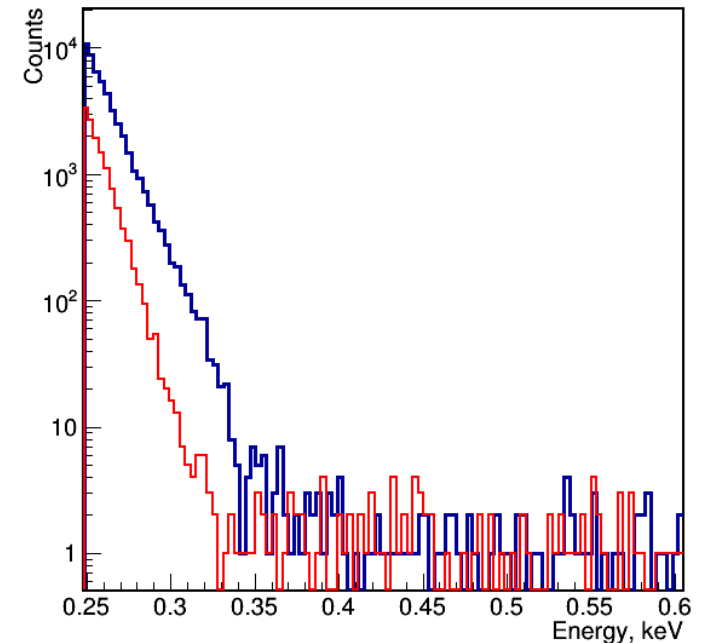
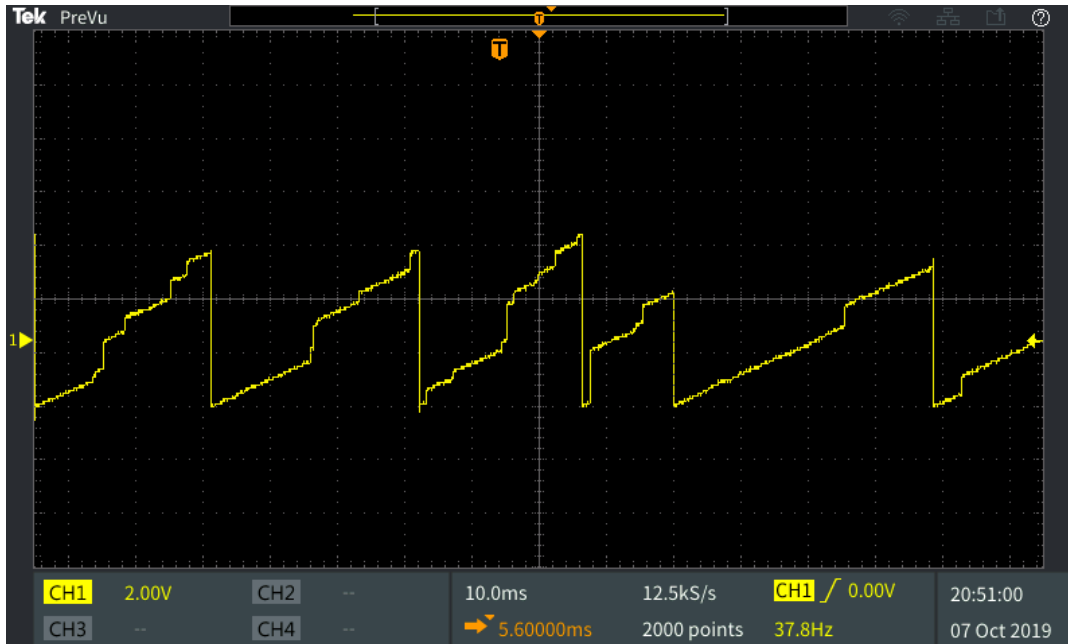
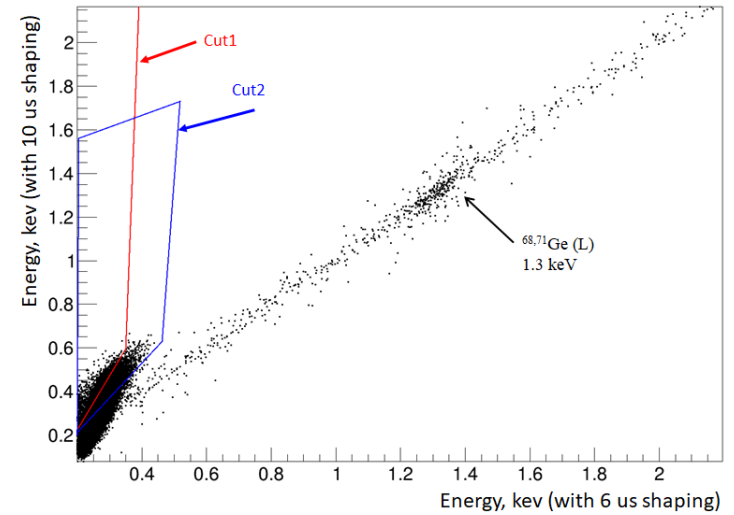
В ближайшее время планируется начать использование подъемного механизма, позволяющего изменять расстояние до активной зоны реактора.

Упрощенная схема измерений



Обработка данных

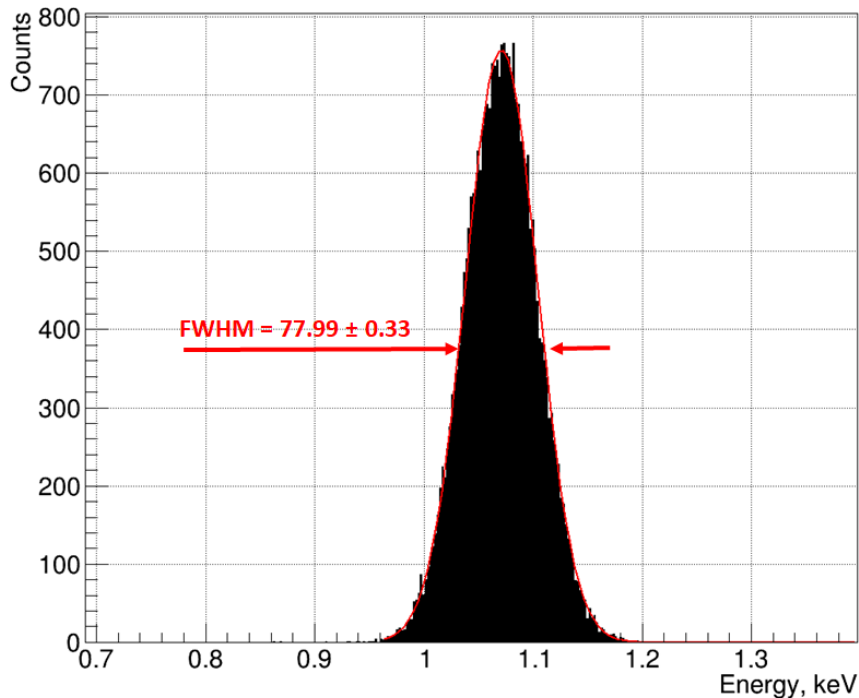
- Нами была создана специальная система для анализа данных получаемых на установке vGeN.
- Оптимизирована система восстановления сигналов для обеспечения наилучшего энергетического разрешения.
- Была разработана система подавления шумов. При этом используются различные формировки, производится сравнение двух параллельных каналов из предусилителя, и отбора сигналов по времени их регистрации



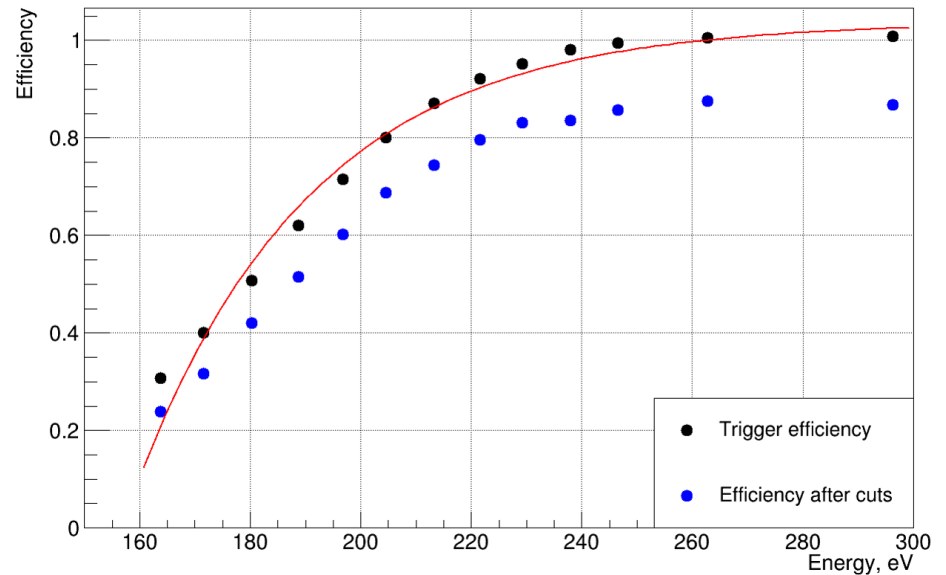
Тестирование детекторов

Тестирование и характеристика детекторов проводилось в отделе НЭОЯС и РХ и в подземной лаборатории LSM (Модан, Франция). Тестовые измерения показали, что достигнутое разрешение первого детектора с генератором импульсов составило **77.99(33) eV (FWHM)**. Из измерений с генератором импульсов было показано возможность достижения порога измерений ниже 200 эВ. Фоновые измерения в LSM показали достаточную радиоактивную чистоту материалов детектора.

Measurements with pulse generator

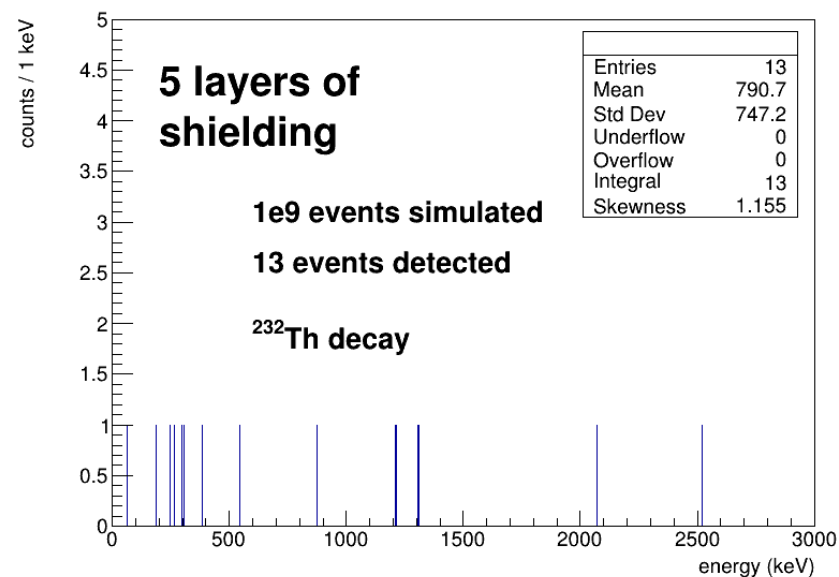
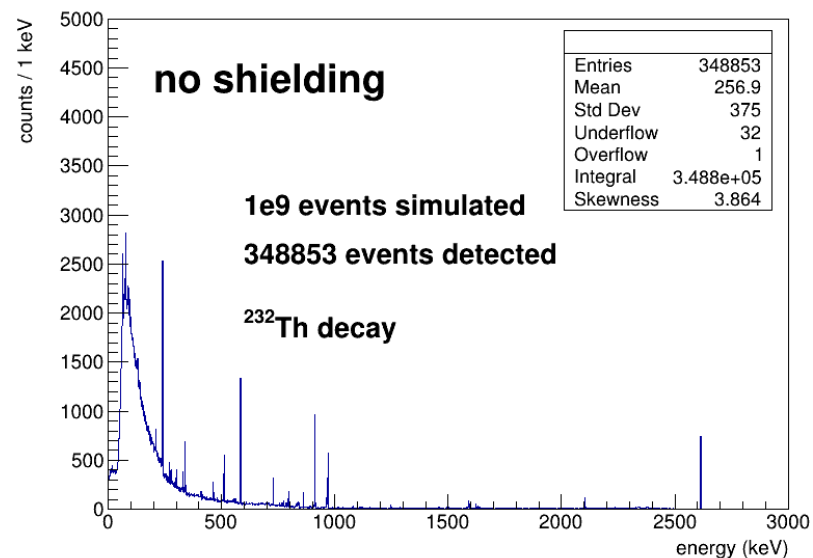
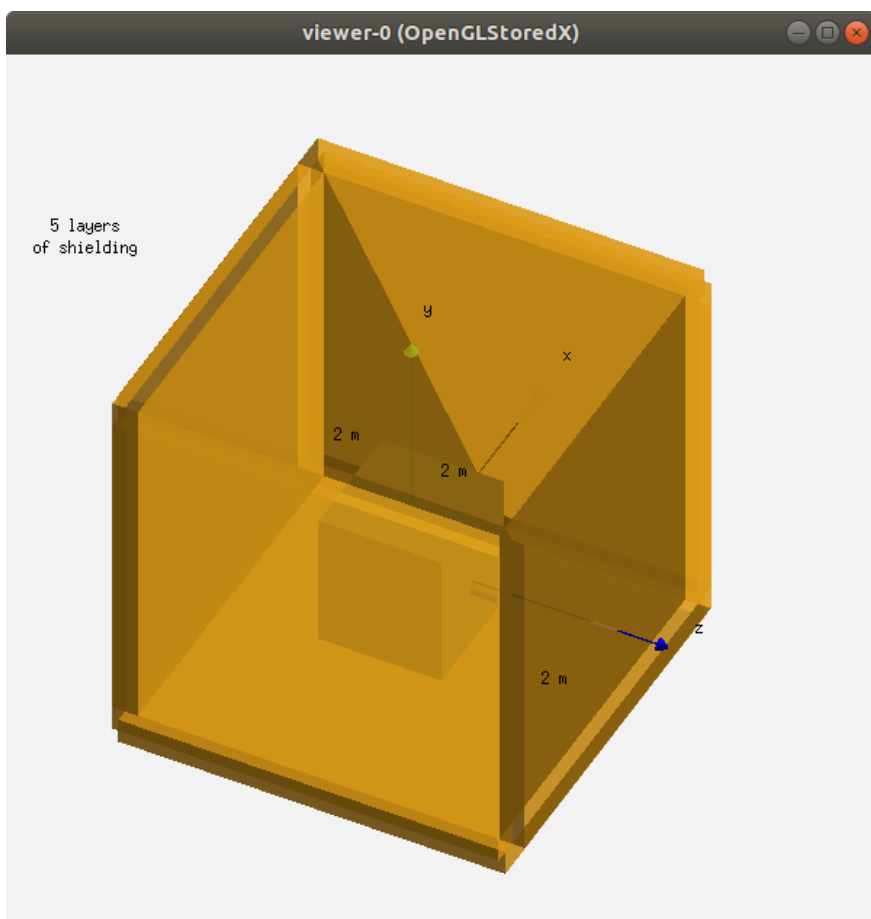


Efficiency measured with pulse generator



Моделирование установки

Для правильной интерпретации полученных результатов проводится моделирование экспериментальной установки с помощью пакета Geant4.



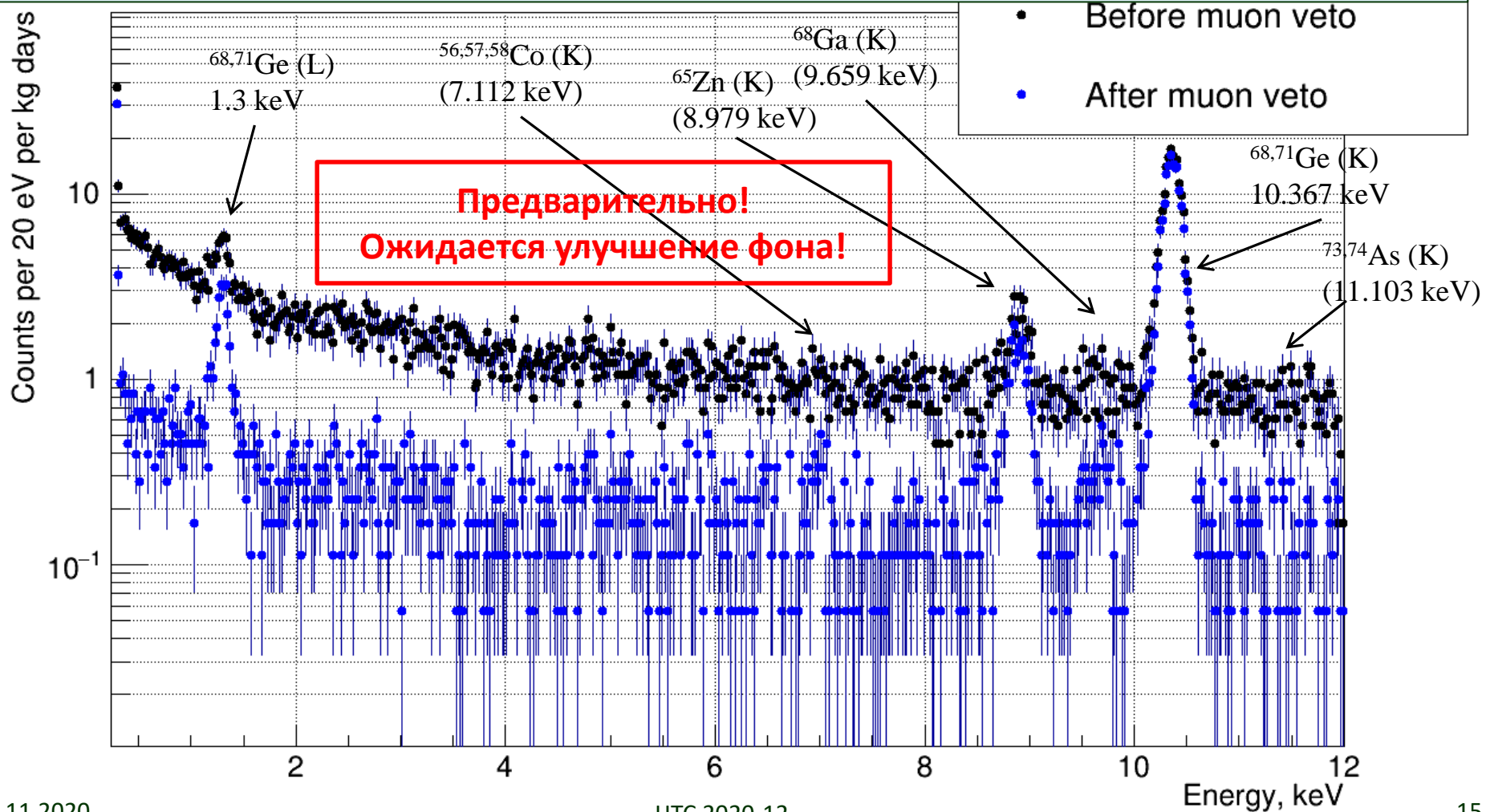
Установка на КАЭС

Экспериментальная установка собирается, тестируется и обслуживается силами сотрудников ЛЯП. В конце 2019 года первый детектор был завезен на станцию и начата установка спектрометра νGeN .



Набор и анализ получаемых данных

В настоящее время идет набор и анализ получаемых данных с экспериментальной установки. Производятся операции по оптимизации набора и анализа данных. Наблюдаемые линии в спектре вызваны наработкой космогенных изотопов и уменьшаются с течением времени.



Измерения на КАЭС

КР - 45 суток СР - 32 суток
 КР 36/ СР 18
 КР - СР - КР

Лицензии выданы:
 бл1 - до 28.06.2025г, бл2 - до 30.11.2038, бл3 - до 01.10.2034г., бл4 - до 20.10.2021г.

Дата ввода в эксплуатацию	Эн. блок	2019 год												2020 год												2021 год											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
24.06.2014	№1	39сут.												231 сут.												39сут.											
	КР 18.05.2014	20.04	СР			КР + ПСЭ 270 сут						СР						26.06 - 30сут - 31.07																			
25.12.1986	№2	КР												СР												КР											
	КР 15.04.2015	02.03	45сут			15.04						05.09 - 32сут						06.10																			
08.11.2005	№3	СР												КР												КР											
	КР 14.05.2014	10.12	21.09 - 32сут						22.10						20.03 - 60сут						18.05																
25.09.2012	№4	СР												КР												КР											
	КР 17.08.2017	48сут - 28.02	04.11						10сут - 15.11						11.07 - 45сут - 24.08																						

В марте 2021 года планируется остановка реактора (~ 60 дней), что позволит нам провести сравнение данных при работающем и остановленном реакторе. До этого времени предлагается закончить все работы по оптимизации работы оборудования и установить неизменные условия измерений, что позволит дать ограничение на СЕvNS и начать измерения данных для ММН.

Ближайшие планы:

- Исследование фонов: измерения нейтронного фона с помощью He^3 и NaI сцинтиллятора и другие фоновые измерения
- Оптимизация защиты: установка двух дополнительных пластин мюонного вето
- Возможна установка дополнительного NaI вето вблизи детектора.
- Рассматриваются и другие варианты по дальнейшему улучшению чувствительности экспериментальной установки: улучшение разрешения/порога измерений (вибрационная платформа, дальнейшая оптимизация электроники), создание нового детектора с лучшими характеристиками.
- Дальнейшая оптимизация анализа данных
- Начать измерения в разных позициях подъемника (на разных расстояниях от реактора)

Заключение

- Начаты измерения на спектрометре νGeN на КАЭС с первым германиевым детектором.
- Предварительные результаты измерений показали, что достигнутый уровень фона позволяет производить поиск CEvNS на КАЭС.
- Идет набор данных. В марте 2021 планируется остановка реактора на 2 месяца, что позволит сравнить данные при включенном и выключенном реакторе. Новые результаты ожидаются в ближайшем времени.
- Планируется впервые обнаружить CEvNS от реакторных нейтрино и улучшить чувствительность к MMN на уровне $(5-9) \cdot 10^{-12} \mu_{\text{B}}$ после нескольких лет измерений.

Задействованный персонал:

Name	Category	Responsibilities	FTE
V.V.Belov	Junior researcher	Muon veto, MC, data taking	0.2
V.B.Brudanin	Major researcher	Administrative work, project management	0.1
V.A.Evsenkin	Engineer	Constructions, detector building	0.5
S.A.Evseev	Engineer	Constructions, detector building	0.4
D.V.Filosofov	Head of sector	Calibration sources	0.1
M.V.Fomina	Junior researcher	Muon veto, MC	0.1
L.Grubchin	Leading researcher	Detector development	0.1
U.B.Gurov	Senior engineer	Detector development	0.2
A.Kh.Inoyatov	Head of sector	Spectroscopy measurements	0.1
S.L.Katulina	Senior engineer	Administrative work, materials preparations	0.1
S.V.Kazarcev	Junior researcher	Electronics, data taking	0.1
S.P.Kiyanov	Senior engineer	Data taking at KNPP	0.3
A.S.Kuznecov	Engineer	Data taking, MC	0.1
A.V.Lubashevskiy	Head of sector	Data analysis, MC, commissioning and administrative work	0.5
D.V.Medvedev	Researcher	Data analysis, MC	0.7
D.V.Ponomarev	Engineer	Constructions, detectors building, testing. Experiment running.	0.7
D.S.Pushkov	Senior engineer	3D modeling and design of experimental setup	0.2
A.V.Salamatin	Senior researcher	Electronics	0.1
K.V.Shakhov	Engineer	3D printing, construction	0.1
Z.Kh.Khukhvatov	Junior researcher	MC	0.2
V.G.Sandukovsky	Head of sector	Detector configuration, constructions	0.5
E.A.Shevchik	Senior engineer	Mu-veto, constructions	0.1
M.V.Shirchenko	Senior researcher	Data taking, analysis	0.1
S.V.Rozov	Engineer	Detector building, testing, calibration, running.	0.3
I.E.Rozova	Engineer	Data analysis, constructions	0.5
V.P.Volnikn	Engineer	Computer support	0.1
I.V.Zhitnikov	Junior researcher	Experiment running, data analysis	0.1
E.A.Yakushev	Head of department	Building, commissioning, running, data analysis	0.2

Total FTE (Engineers): 3.5, Total FTE (Scientific staff): 3.2, Total FTE: 6.7

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления проекта vGeN

Наименование узлов и систем установки, ресурсов, источников финансирования		Стоимость узлов (тыс.\$). установки. Потребности в ресурсах	Предложения Лабораторий по распределению финансирования и ресурсов			
			1 год	2 год	3 год	
Основные узлы и оборудование	1.Криогенное и вакуумное оборудования для детекторов. Новый германиевый детектор.		70.0	70.0		200
	2. Материалы для калибровок и пассивной защиты.		45.0	35.0	10.0	
	3. Электроника NIM		40.0	30.0	10.0	
	4. Электроника VME		40.0	30.0	10.0	
	Итого		395.0	165.0	30.0	200.0
Необходимые ресурсы	Нормо-часы	ООЭП ЛЯП	600	200	200	200
Источники финансирования	Бюджет	Затраты из бюджета	395.0	165.0	30.0	200.0
	Внебюджетные средства	Вклады коллаборантов. Средства по грантам. Вклады спонсоров Средства по договорам. Другие источники и т.д.	45.0	20.0	15.0	10.0

Смета затрат по проекту «vGeN»

№	Наименование статей затрат	Полная стоимость	1 год	2 год	3 год
1.	Компьютерная связь	6.0 тыс. \$	2.0	2.0	2.0
2	ООЭП ЛЯП	600 нормо/час	200	200	200
3.	Материалы	45.0 тыс. \$	35.0	10.0	5.0
4.	Оборудование	350.0 тыс. \$	130.0	20.0	200.0
5.	Оплата НИР, выполняемых по договорам	6.0 тыс. \$	2.0	2.0	2.0
6.	Командировочные расходы, в т.ч.	60.0 тыс. \$	20.0	20.0	20.0
	а) в страны нерублевой зоны		5.0	5.0	5.0
	б) в города стран рублевой зоны		15.0	15.0	15.0
Итого по прямым расходам		467 тыс.\$	189 тыс.\$	54 тыс.\$	224 тыс.\$

Backup slides

Сравнение мест для измерений

Эксперимент	Местоположение	Поток нейтрино [см ² в сек]	Защита от мюонов [м в. э.]
vGeN	КАЭС, Россия	5×10^{13}	~50
CONUS	Брукдорф, Германия	2.4×10^{13}	10-45
TEXONO	Куо-Sheng, Тайвань	6.4×10^{12}	-
RED-100	КАЭС, Россия	1.7×10^{13}	>50?
CONNIE	Angra 2, Бразилия	6.8×10^{12}	0
RICOCHET	ILL, Франция	2×10^{12}	~15
MINER	Texas A&M, США	2×10^{12}	~5
NUCLEUS	Chooz, Франция	2×10^{12}	~3

vGeN – обладает наилучшим в мире расположением установки среди всех экспериментов направленных на поиск CEvNS.

ЛЯП имеет богатый и успешный опыт работы на КАЭС (более 15 лет)