

Тема: Неускорительная нейтринная физика и астрофизика
Non-Accelerator Neutrino Physics and Astrophysics

Проекты:

**SuperNEMO,
GERDA (Legend),
Monument,
EDELWEISS/Ricochet,
GEMMA(ν GeN),
DANSS,
BAIKAL-GVD**

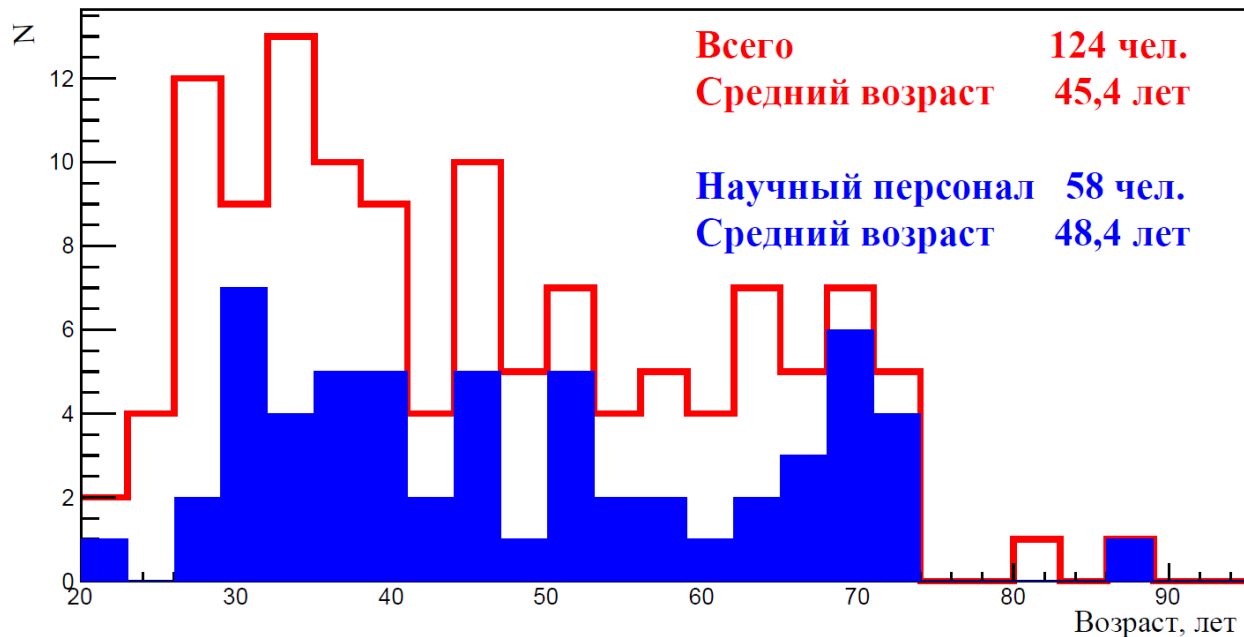
Партнеры: Азербайджан, Болгария, Германия, Казахстан, Польша, Россия, Словакия, Узбекистан, Чехия, Великобритания, Финляндия, Франция

Неускорительная нейтринная физика и астрофизика

Тема выполняется НЭОЯСиРХ

Отдел имеет:

- 50 летний опыт прецизионной ядерной спектроскопии с использованием полупроводниковых, сцинтилляционных и других типов детекторов;
- 30-летний опыт исследования редких процессов в различных подземных лабораториях;
- 15-летний опыт проведения нейтринных экспериментов на энергетических реакторах;



Отдел обладает знаниями, персоналом и возможностями для создания установок мирового класса, проведения измерений с ними и получения результатов на мировом уровне.

Направления исследований:

- Двойной бета распад и природа массы нейтрино;
- Определение ядерных матричных элементов 2β -распадов;
- Фундаментальные свойства нейтрино (магнитный момент, смешивание со стерильным состоянием, когерентное рассеяние на ядрах);
- Мониторинг ядерных реакторов при помощи нейтрино;
- Прямой и косвенный поиск частиц темной материи;
- Исследования галактических и экстрагалактических нейтрино;
- Спектрометрия ядер, удаленных от полосы бета-стабильности;
- Изучение атомных процессов, сопровождающих радиоактивный распад;
- Разработка и реализация методик разделения макроколичеств вещества от примесей, синтез материалов из ультрачистых прекурсоров;
- Исследования сверхтонких взаимодействий с помощью метода возмущенных угловых корреляций на ядрах-зондах в твердотельных и жидких образцах.

Эксперименты проводятся: ЛЯП, Подземные лаборатории, Калининская АЭС, Озеро Байкал

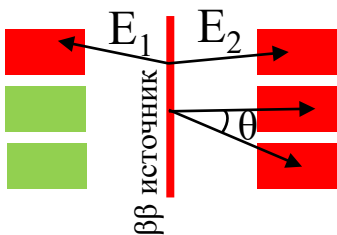
Основная задача: Использование методов ядерной спектрометрии для изучения различных процессов, представляющих интерес на современном этапе развития науки, включая редкие процессы.

Исследование 2β распада, поиск $0\nu 2\beta$

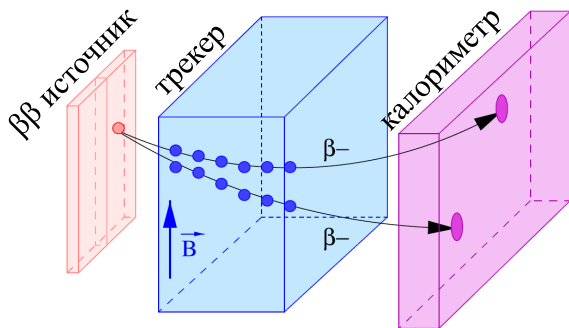
два основных подхода:

Треко-калориметрический подход

Самый простой вариант



Улучшенный эксперимент



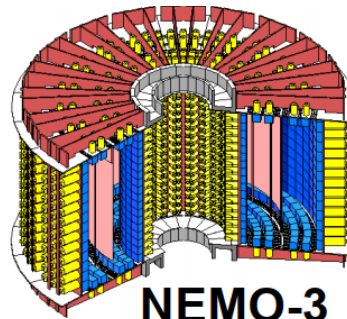
- Полная информация о событии (энергия каждого электрона, идентификация частицы и места вылета, угловое распределение);
- **Чувствителен к нестандартным модам $0\nu 2\beta$ распадов;**
- Возможность измерения разных (практически любых) изотопов в одном детекторе;
- **Уникальная информация по $2\nu 2\beta$ распадам.**

Калориметрический подход

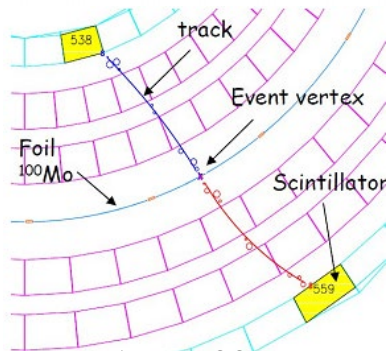


- Детектор = источник;
- Эффективность близка к 100%;
- Компактность = возможность высокоэффективного применения дополнительных активных и пассивных методов борьбы с фонами, минимизация количества используемых материалов вблизи детекторов (уменьшение фона);
- Несколько детекторов (или выделение чувствительного объема) = систематика, однородность;
- Отбор событий (форма импульса, два канала измерения, отсутствие множественности (если несколько детекторов...));
- **Достижение большей массы и низкого фона (лучшего результата на $0\nu 2\beta$ распад) с меньшими затратами.**

Изотоп	$E_{0\nu 2\beta}$	% в природе
^{48}Ca	4273.7	0.187
^{76}Ge	2039.1	7.8
^{82}Se	2995.5	9.2
^{100}Mo	3035.0	9.6
^{130}Te	2530.3	34.5
^{136}Xe	2461.9	8.9
^{150}Nd	3367.3	5.6



NEMO-3



Событие $\beta\beta$, зарегистрированное NEMO-3

$t_{1/2}(10^{21} \text{ yr})$	ISOTOPE	TRANSITION METHOD	DOCUMENT ID
••• We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. •••			
> 0.87	^{134}Xe	EXO-200	1 ALBERT 17C
0.82 ± 0.02 ± 0.06	^{130}Te	CUORE-0	2 ALDUINO 17
0.00690 ± 0.00015 ± 0.00037	^{100}Mo	CUPID	3 ARMENGAUD 17
0.0274 ± 0.0004 ± 0.0018	^{116}Cd	NEMO-3	4 ARNOLD 17
0.064 + 0.007 + 0.012 - 0.006 - 0.009	^{48}Ca	NEMO-3	5 ARNOLD 16
0.00934 ± 0.00022 + 0.00062 - 0.00060	^{150}Nd	NEMO-3	6 ARNOLD 16A
1.926 ± 0.094	^{76}Ge	GERDA	7 AGOSTINI 15A
0.00693 ± 0.00004	^{100}Mo	NEMO-3	8 ARNOLD 15
2.165 ± 0.016 ± 0.059	^{136}Xe	EXO-200	9 ALBERT 14
9.2 + 5.5 - 2.6 ± 1.3	^{78}Kr	BAKSAN	10 GAVRILYAK 13
2.38 ± 0.02 ± 0.14	^{136}Xe	KamLAND-Zen	11 GANDO 12A
0.7 ± 0.09 ± 0.11	^{130}Te	NEMO-3	12 ARNOLD 11
0.0235 ± 0.0014 ± 0.0016	^{96}Zr	NEMO-3	13 ARGYRADES 10
0.69 + 0.10 - 0.08 ± 0.07	^{100}Mo	$0^+ \rightarrow 0^+_1$ Ge coinc.	14 BELLI 10
0.57 + 0.13 - 0.09 ± 0.08	^{100}Mo	$0^+ \rightarrow 0^+_1$ NEMO-3	15 ARNOLD 07
0.096 ± 0.003 ± 0.010	^{82}Se	NEMO-3	16 ARNOLD 05A
0.029 + 0.004 - 0.003	^{116}Cd	$^{116}\text{CdWO}_4$ scint ¹⁷	DANEVICH 03

	NEMO3	SuperNEMO
Изотоп	Mo-100	Se-82 (Nd-150)
Эффективность	18%	30%
Энергетическое разрешение для электронов 3 МэВ	8% (FWHM)	4% (FWHM)
Основные фоны		Уменьшить в 10 и более раз



Demonstrator Module (2.5 year run)

17.5 kg·yr initial exposure :

$$T_{1/2}^{0\nu} > 5.9 \times 10^{24} \text{ yr}$$

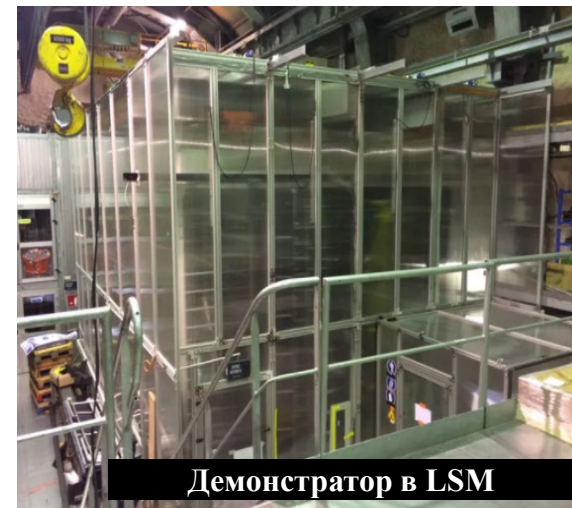
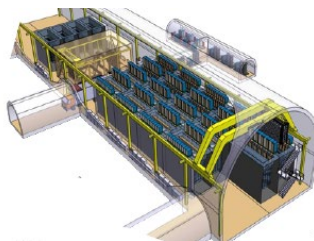
$$\langle m_\nu \rangle < 0.20 - 0.55 \text{ eV}$$

Full SuperNEMO

500 kg·yr :

$$T_{1/2}^{0\nu} > 10^{26} \text{ yr}$$

$$\langle m_\nu \rangle < 40 - 110 \text{ meV}$$



Демонстратор в LSM

$0\nu\beta\beta$ поиск с HP^{76}Ge полупроводниковыми детекторами в жидком аргоне GERDA – LEGEND



GERDA фаза II

Фон

$\sim 10^{-3}$ cts/(keV kg yr)

$5.2_{-1.3}^{+1.6} \times 10^{-4}$ cts/(keV kg yr)

Статистика

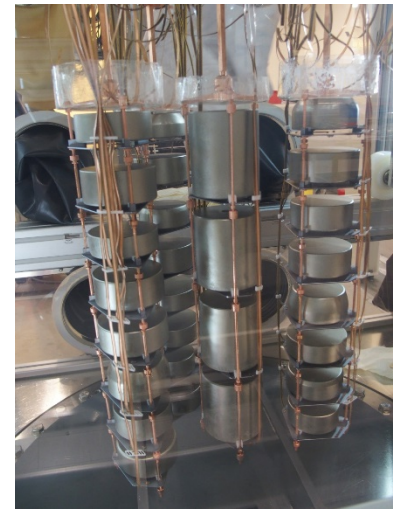
≥ 100 kg yr

103.7 kg yr

Чувствительность

$T_{1/2}^{0\nu} \geq 10^{26}$ yr

$T_{1/2}^{0\nu} > 1.8 \times 10^{26}$ yr

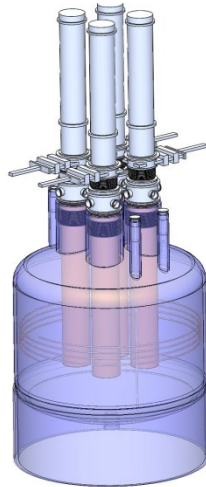
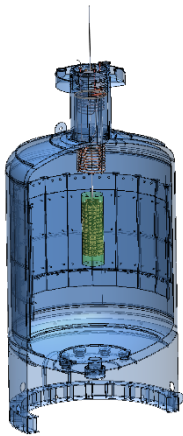


LEGEND-200

- ✓ Первая фаза на пути к тонне ^{76}Ge
- ✓ Улучшения:

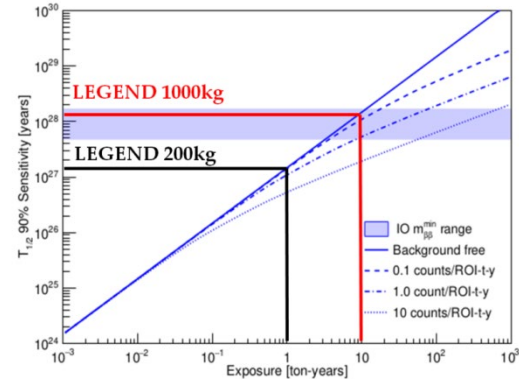
- больше масса каждого из детекторов (в среднем)
- улучшенное LAr вето
- меньше масса материалов, новые кабели (более чистые)
- новая электроника с низкими шумами

- ✓ Оценки по улучшению фона: $\sim \times 5$ к GERDA
- ✓ 200 кг ^{76}Ge
- ✓ Цель: $T_{1/2} \geq 10^{27}$ лет



LEGEND-1000

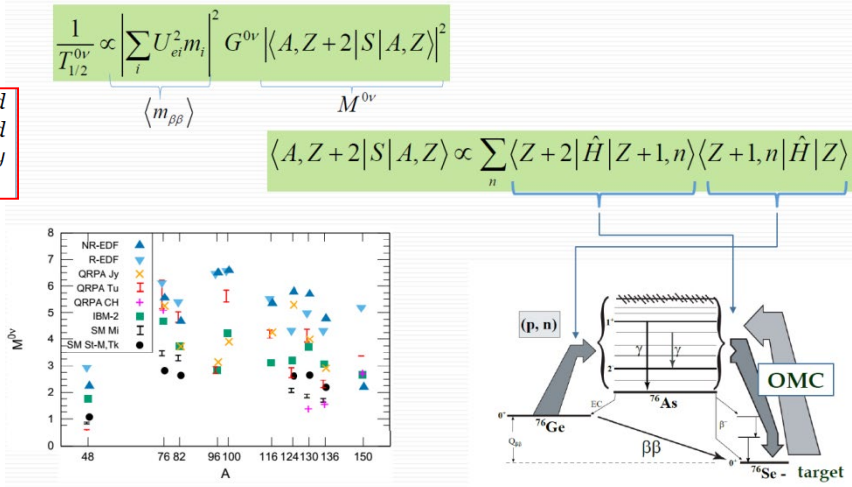
- ✓ Новая инфраструктура и дизайн (использовать опыт Majorana)
- ✓ Улучшения на основе LEGEND-200
- ✓ 1000 кг ^{76}Ge
- ✓ Цель: $T_{1/2} \geq 10^{28}$ лет



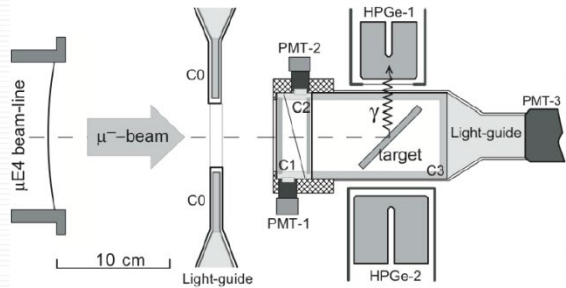
От периода полураспада к массе нейтрино: ключевая информация в ядерных матричных элементах

APPEC-2019, Recommendation 6: *The computation of nuclear matrix elements is challenging and currently is affected by an uncertainty which is typically quantified in a factor of 2-3... An enhanced effort is required and a stronger interactions between the particle physics and nuclear community would be highly beneficial. Dedicated experiments may be required.*

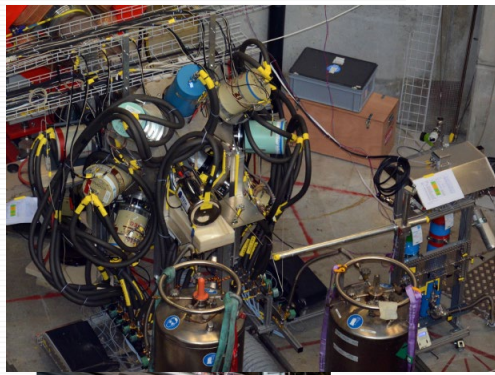
Мы исследуем эту проблему в рамках нового проекта MONUMENT (Измерение обычного мюонного захвата (ОМЗ) для проверки ядерных матричных элементов 2β -распадов)



Measurement set-up

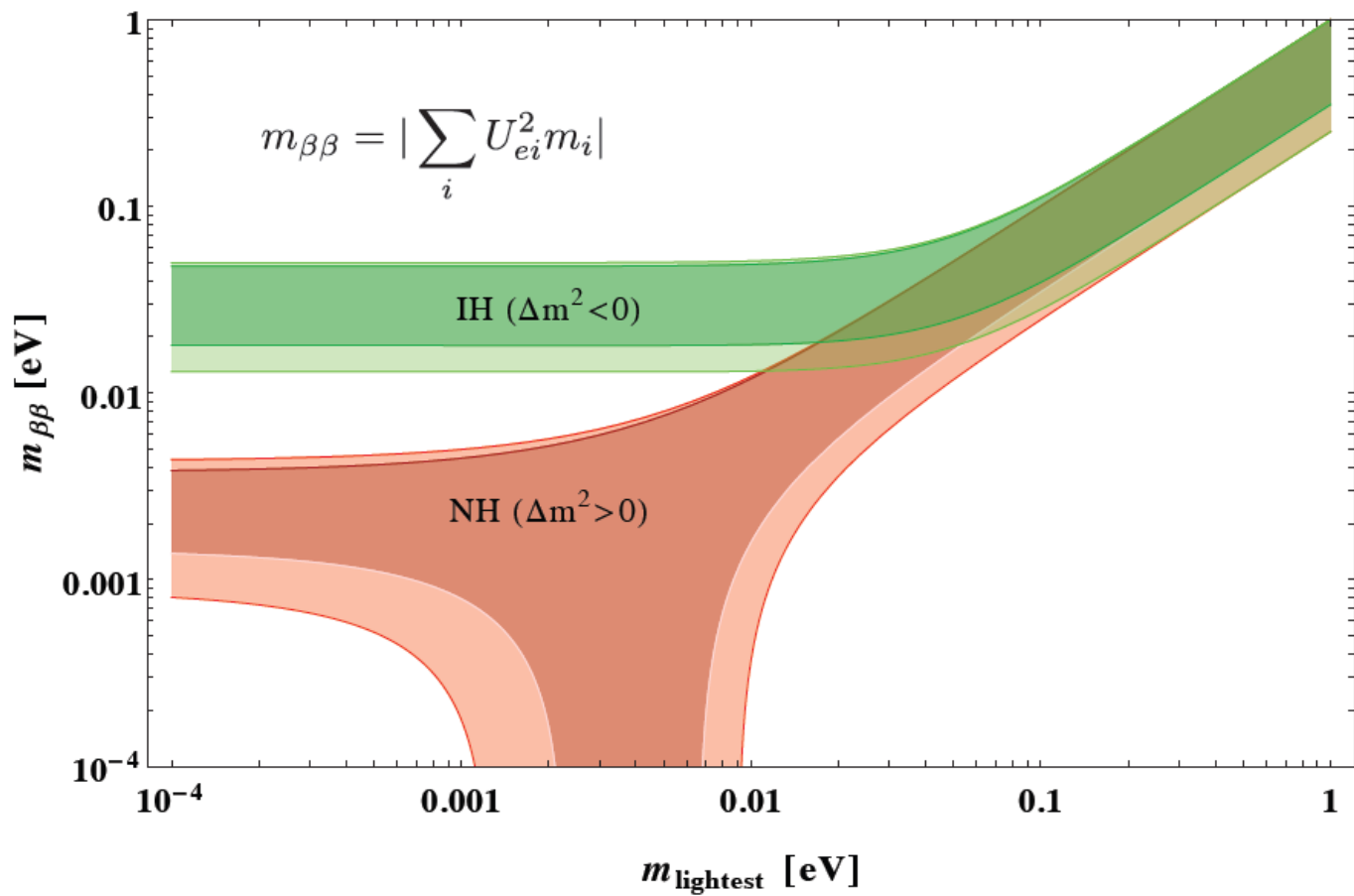


$$\mu_{\text{stop}} = \overline{C0} \wedge C1 \wedge C2 \wedge \overline{C3}$$



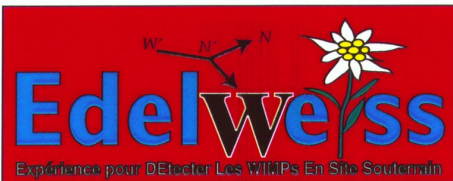
В период с 2021 по 2023 гг., планируется провести измерения ОМЗ для изотопов ^{136}Ba , ^{76}Se и ^{96}Mo . ОМЗ на ^{136}Ba и ^{76}Se имеет особое значение для запланированных ведущих экспериментов по поиску $0\nu 2\beta$ распада – ^{136}Xe - nEXO, KamLAND2-Zen, NEXT, DARWIN и PandaX-III – и ^{76}Ge – LEGEND.

Кроме того, мы собираемся провести измерения изотопов ^{40}Ca , ^{56}Fe , ^{32}S и ^{100}Mo , результаты которых важны для экспериментальной проверки корректности теоретических расчетов, а также могут быть полезны для астрофизики.



EDELWEISS/RICOCHET

Объединенный проект прямого поиска темной материи и прецизионного исследования CEvNS с новыми криогенными детекторами



EDELWEISS: Прямой поиск частиц темной материи, HPGe детекторы при температуре ~ 20 мК, низкофоновые условия в глубокой подземной лаборатории (LSM).

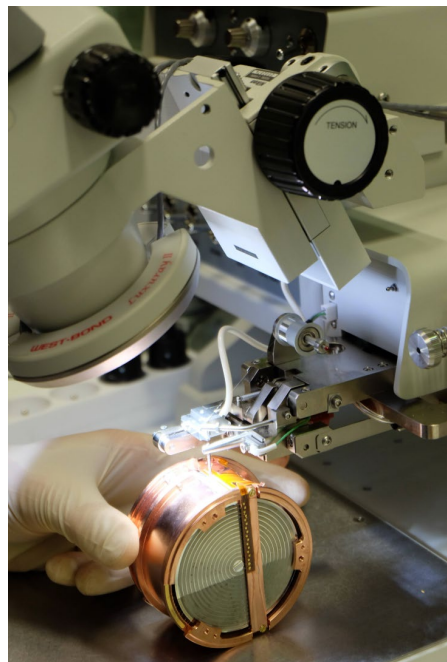
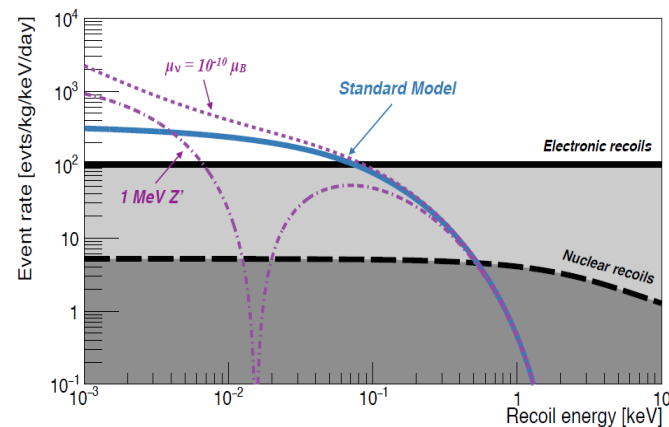
В последние 25 лет EDELWEISS является лидирующим экспериментом по прямому детектированию темной материи с HPGe детекторами-болометрами.

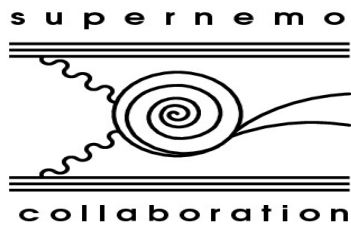
Новые детекторы-болометры, разработанные EDELWEISS, обладают уникальными свойствами по регистрации низкоэнергетических ядер отдачи.

Предлагается расширить использование детекторов, разработанных EDELWEISS, на исследования CEvNS в области полной когерентности (реакторные антинейтрино). Эта часть проекта получила название Ricochet.

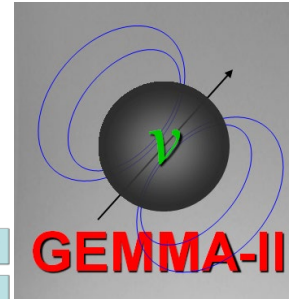
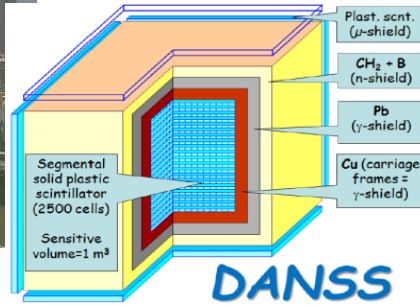


Благодаря новейшим разработкам эксперимент остается конкурентоспособным в областях, недоступных большим Ar/Xe экспериментам.



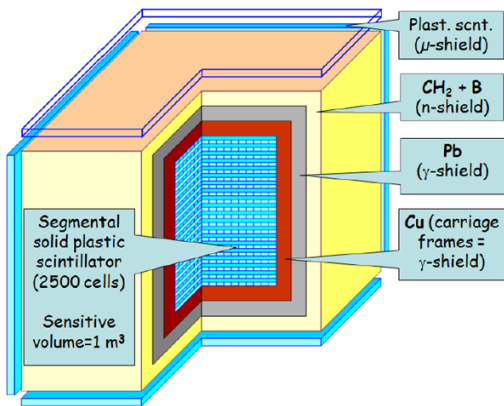


Наше участие в международных экспериментах с рекордными чувствительностями к ультра редким процессам дало и обеспечивает надежную базу для домашних нейтринных экспериментов



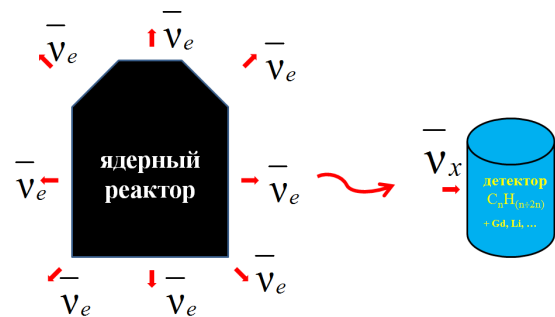
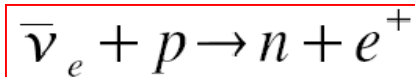
DANSS

Исследования реакторных антинейтрино на КАЭС с детектором обратного бета распада



- DANSS расположен под 4-м блоком КАЭС (ВВЭР-1000, 6×10^{20} $\bar{\nu}_e$ в секунду);
- Защита от космических лучей ~ 50 м.в.э.;
- Подвижная платформа позволяет изменять расстояние до реактора от 10,9 до 12,9 метров;
- За 4 года измерений было зарегистрировано почти 4 млн. реакторных антинейтрино (~ 5000 соб./сутки);
- Получены лучшие в мире результаты по поиску осцилляций в стерильное нейтрино в реакторных экспериментах;
- Не было обнаружено значимого сигнала осцилляций в стерильное нейтрино

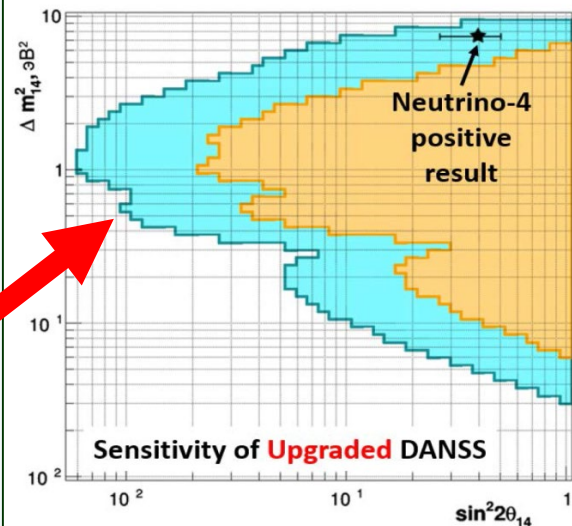
Компактный (1 м^3) сильно-сегментированный (2500 пластин из пластического сцинтиллятора) нейтринный спектрометр DANSS нацелен на поиск осцилляций в стерильное нейтрино, а также мониторинга мощности реактора и состава ядерного топлива.



От DANSS к DANSS2:

- ✓ Новая пластины $2 \times 5 \times 120 \text{ см}^3$ с двухсторонним светосбором;
- ✓ 60 слоев x 24 пластин: $1,7 \text{ м}^3$, та же защита и подвижная платформа;
- ✓ Gd: фольги между слоями.

Цель: Энергетическое разрешение:
 $34\%/\sqrt{E} \rightarrow 15\%/\sqrt{E}$

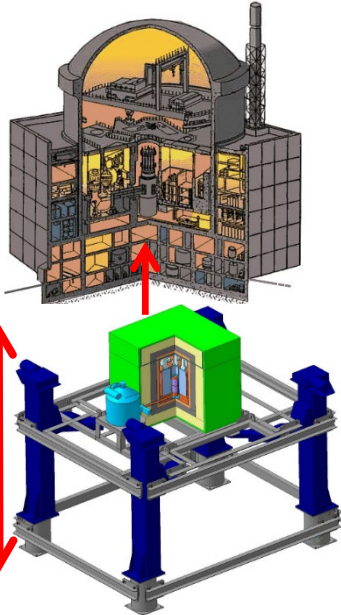
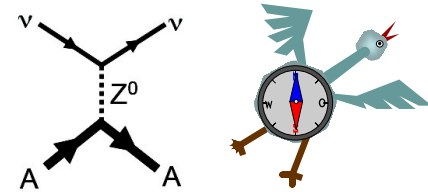


vGen

эксперимент на КАЭС

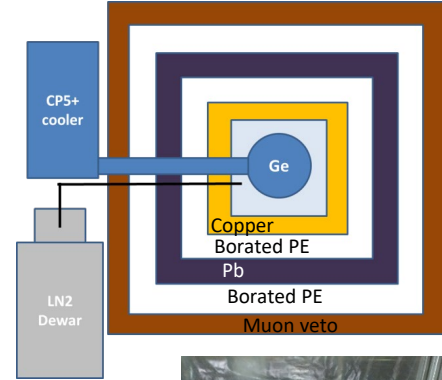


Проекты vGEN/GEMMA нацелены на исследование фундаментальных свойств нейтрино. В частности, производится поиск когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядре германия и магнитного момента нейтрино. Экспериментальная установка строится под реактором Калининской АЭС, находящейся на расстоянии 285 км от Дубны. В эксперименте используются новейшие HPGe детекторы с ультра низким энергетическим порогом.



От GEMMA-I к vGEN:

- ✓ Порог: 2 keV → **200 eV**
- ✓ Нейтринный поток: $2,6 \cdot 10^{13}$ $\nu/(\text{сек} \cdot \text{см}^2)$ → **$5 \cdot 10^{13}$ $\nu/(\text{сек} \cdot \text{см}^2)$**
(новое место, подъемник!)
- ✓ Масса: 1,5 кг → 5,5 кг
- ✓ $\mu_\nu < 2,9 \cdot 10^{-11} \mu_B$ (лучшее ограничение в мире из прямых измерений) → $\mu_\nu < (5-9) \cdot 10^{-12} \mu_B$ (через несколько лет)





Самый большой нейтринный телескоп в северном полушарии BAIKAL-GVD

Нейтринный телескоп дает важную информацию существенно дополняющую данные других наблюдений (оптические, радио телескопы и др.)



Основной принцип: **определение направления и энергии высокоэнергичных заряженных частиц, возникающих при взаимодействии нейтрино, с помощью излучения Вавилова-Черенкова**

Развитие: 1980 г. первые тесты и R&D, первые измерения в 1993 г.

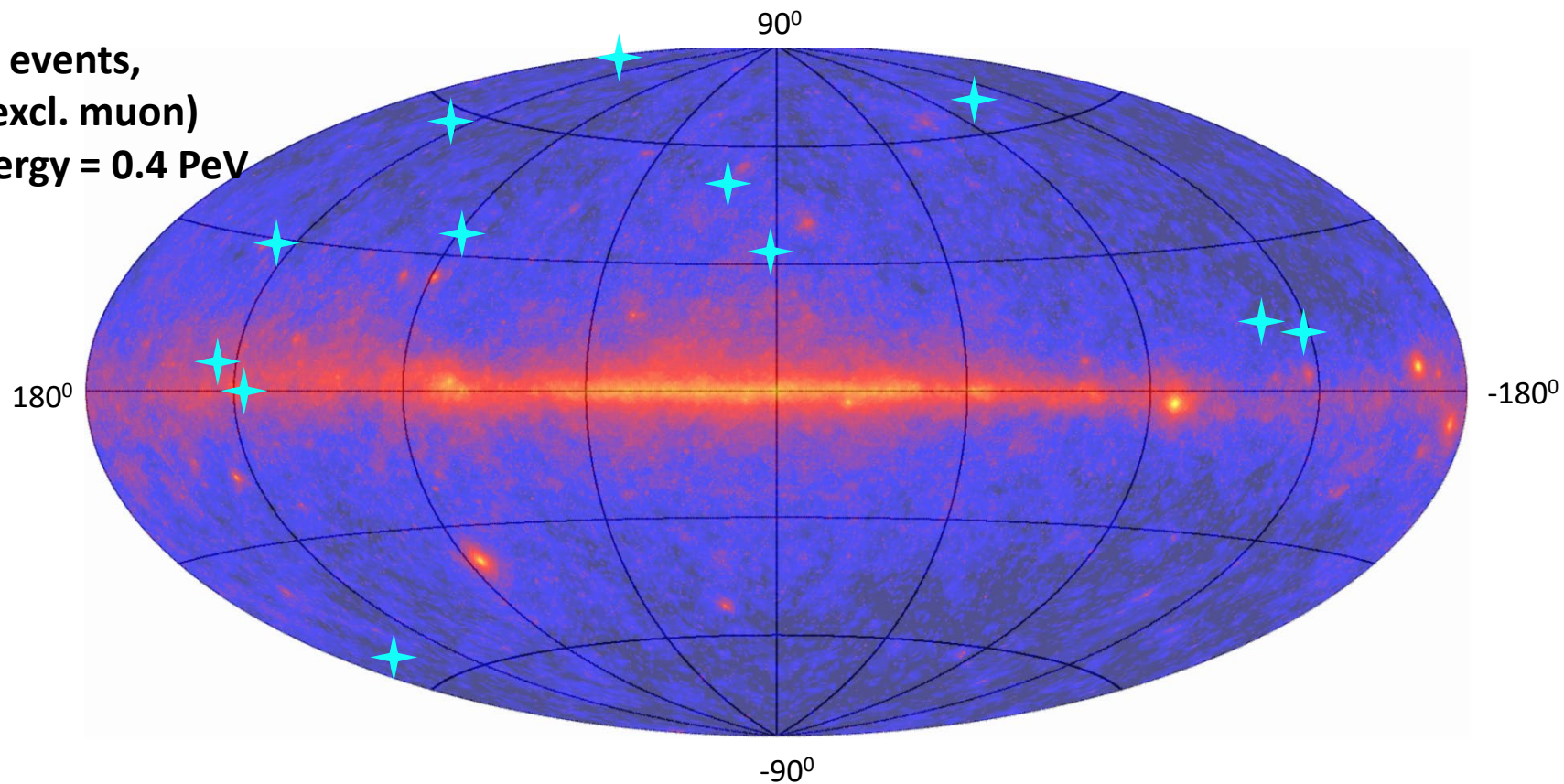
Сейчас – создание GVD (**Gigaton Volume Detector**)

Физика:

- Исследование галактических и вне галактических (точечных) источников нейтрино;
- Диффузный нейтринный поток – энергетический спектр, локальные и глобальные анизотропии, состав (e , μ , τ);
- Поиск темной материи;
- Экзотические частицы: – монополи, Q-боллы, нуклеариты, ...

Baikal-GVD 2016,2018,2019 cascade events >100 TeV

12 events,
NC, CC (excl. muon)
Max. energy = 0.4 PeV

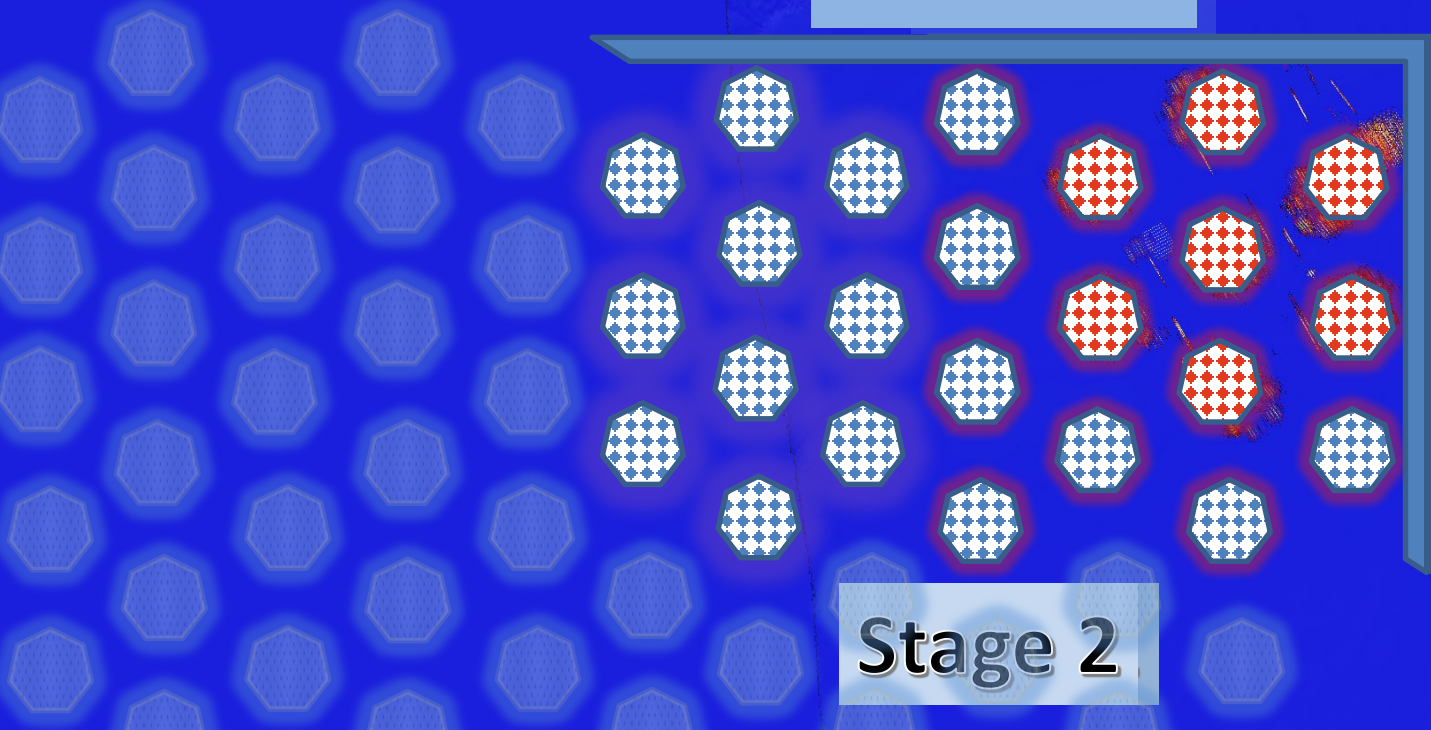


Status Baikal-GVD 2020

~1.7 km

~1 km

Stage 2





- 1) Комплексная научная программа, отражающая название темы “Неускорительная нейтринная физика и астрофизика”;**
- 2) Участие в лидирующих экспериментах;**
- 3) Внедрение современных know-how и культуры эксперимента для “домашних” проектов;**
- 4) Создание инфраструктуры в ЛЯП для обеспечения текущих и будущих проектов на современном уровне;**
- 5) В среднем 25 публикаций в год.**

Просим НТС ЛЯП поддержать продолжение исследований в рамках темы

СМЕТА ЗАТРАТ ПО ТЕМЕ

COST ESTIMATE FOR THE THEME 03-2-1100-2010/2024

бюдж.код	тема	ответств.	описание							
1576	1100	Бруданин В.Б., Ковалик А.., Якушев Е.А.	Неускорительная нейтринная физика и астрофизика (проекты SuperNEMO, GEMMA-III, EDELWEISS-LT, G&M, DANSS, БАЙКАЛ-ГВД)							
3821	1100	Бруданин В.Б.	Проект "БАЙКАЛ"							
3258	1100	Бруданин В.Б.	Грант директора							
Статья	1576	3821	3258	Польша, пр.75,107,140	Словакия, пр.164,170	Болгария, пр.182	Чехия, пр.202,204	Азербайджан, пр.273	Всего	
1. Заработная плата	2 022.6								2 022.6	
2. Страховые взносы	610.8								610.8	
3. Соцбытфонд	131.6								131.6	
4. Международное сотрудничество	220.0			6.1	28.5		28.1		282.7	
а) командирование в страны-участницы	13.0						16.7		29.7	
б) командирование в страны-неучастницы	97.0				11.0		9.4		117.4	
в) командирование на территории России	90.0								90.0	
г) прием иноспециалистов	5.0			6.1	2.5		2.0		15.6	
д) проведение совещаний, представительские расходы	15.0				15.0				30.0	
5. Материалы	5 300.0			5.0	20.0	5.0	15.1		5 345.1	
6. Оборудование	2 428.6			20.5	36.0		33.8	1.5	2 520.4	
10. Услуги научно-исследовательских организаций	110.0			2.5					112.5	
14. Капитальный и текущий ремонт зданий, сооружений, оборудования	394.9								394.9	
б) текущий ремонт зданий и сооружений	375.0								375.0	
в) ремонт оборудования	19.9								19.9	
16. Транспортные услуги	87.0								87.0	
б) грузовой транспорт	87.0								87.0	
17. Содержание помещений, территорий, объектов социальной инфраструктуры	334.0								334.0	
е) прочие	334.0								334.0	
ИТОГО:	11 639.5			34.1	84.5	5.0	77.0	1.5	11 841.6	
КБ	40.9								40.9	
ОЭП	229.7								229.7	
Административно-хозяйственные расходы	1 567.5								1 567.5	
ИТОГО без инфр.ОИЯИ	13 477.6			34.1	84.5	5.0	77.0	1.5	13 679.7	
Инфраструктура ОИЯИ	2 926.4								2 926.4	
ВСЕГО:	16 404.0			34.1	84.5	5.0	77.0	1.5	16 606.1	