



НИЦ Курчатовский Институт  
ККТЭФ



# Поиск Майорановских нейтрино с помощью nEXO

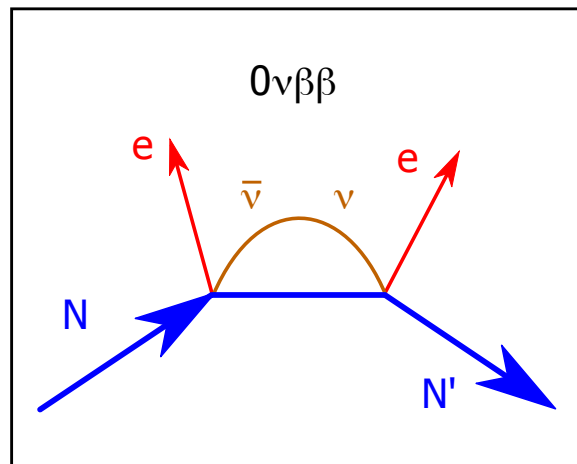
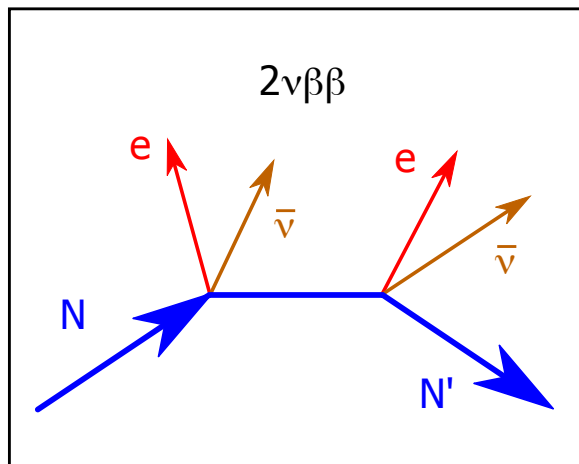
Белов В.А.  
для коллаборации nEXO



*Секция ядерной физики Отделения  
физических наук Российской академии наук*

*Объединенный институт ядерных  
исследований*

# Двойной бета-распад

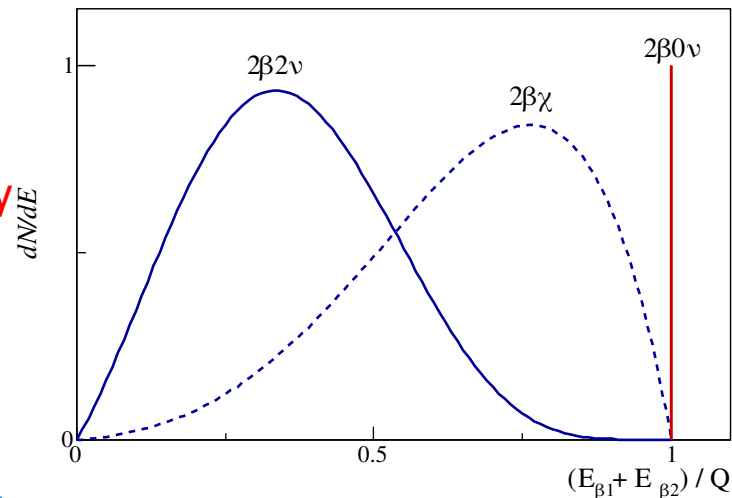


$2\nu$  канал  
обычный процесс 2-го  
порядка в Стандартной  
модели, обнаруженный  
для многих изотопов.

$0\nu$  канал  
это гипотетический процесс  
всегда означает Новую Физику  
Это поиск:  
Нарушения лептонного числа  
Майорановских фермионов

Для достижения высокой  
чувствительности измерений для  
канала  $0\nu$  требуется:

- Высокое энергетическое разрешение
- Большая масса изотопа
- Низкий фон



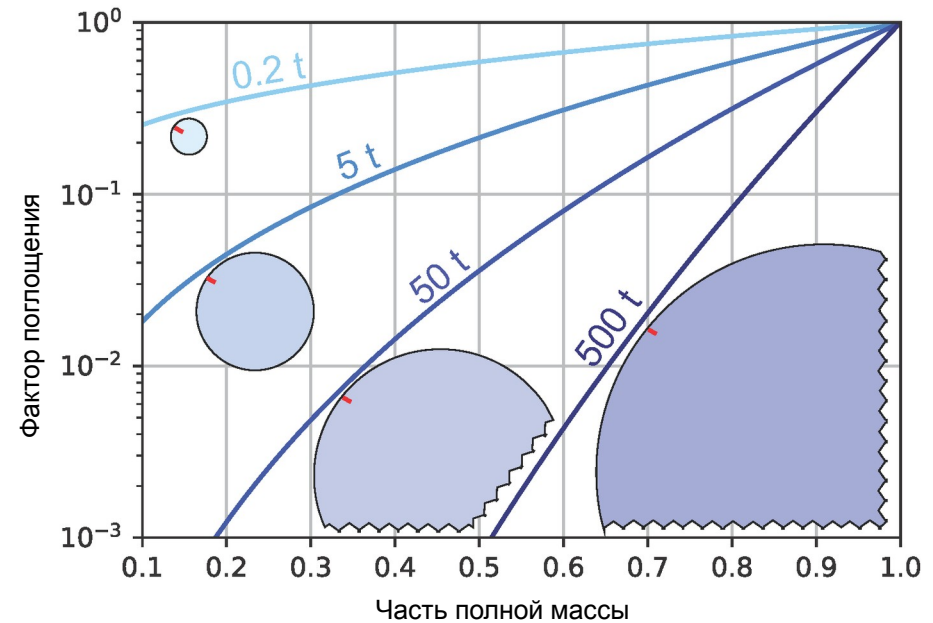
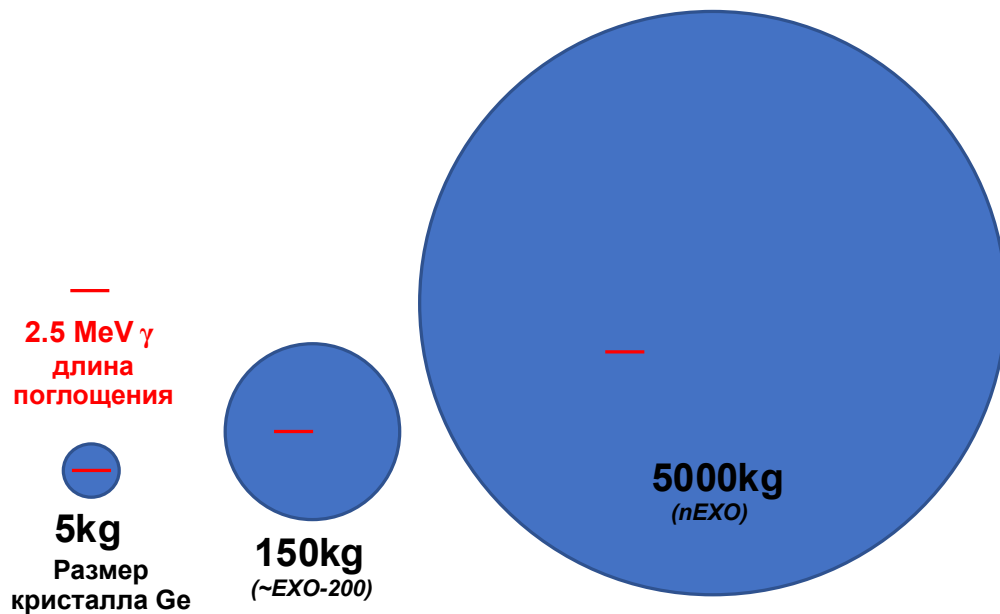
# Почему ксенон

*Несмотря на не самое лучшее энергетическое разрешение, ксенон обладает весомыми преимуществами:*

- Возможность использовать мишень как детектор, очень хорошо для достижения больших масс детектора, также – эффект самоэкранировки
- Достаточно большое значение Q, расположенное в области, сравнительно свободной от естественной радиоактивности
- Легкость изотопного обогащения, т. к. благородный газ, плюс  $^{136}\text{Xe}$  – самый тяжёлый изотоп
- Легко очищать и перегружать из детектора в детектор, без необходимости растить кристаллы
- Слабая активация космическими лучами, отсутствие долгоживущих изотопов
- Возможность улучшения энергетического разрешения за счёт наличия антикорреляции между ионизацией и сцинтилляцией
- Ограниченная возможность идентификации частиц ( $\alpha, \beta, \gamma$ )
- Уникальная способность – подавление фона за счёт тагирования распада по дочернему ядру Ba [М.Мое PRC 44, R931, 1991]

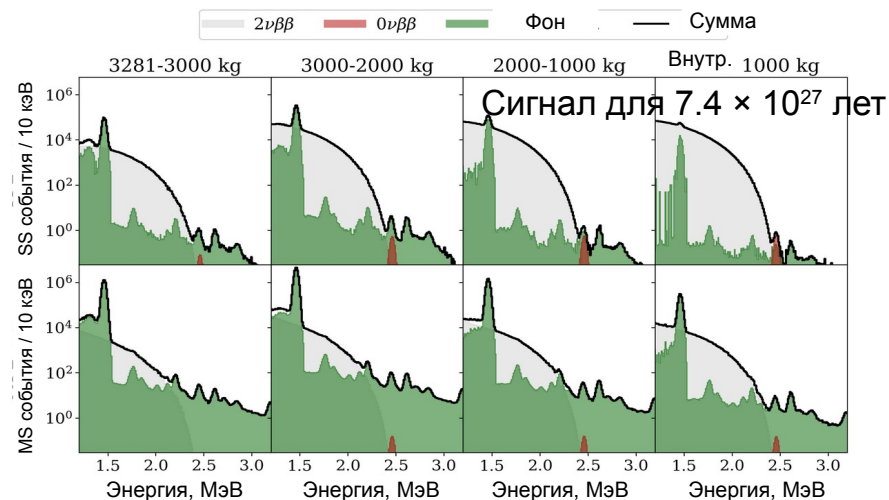
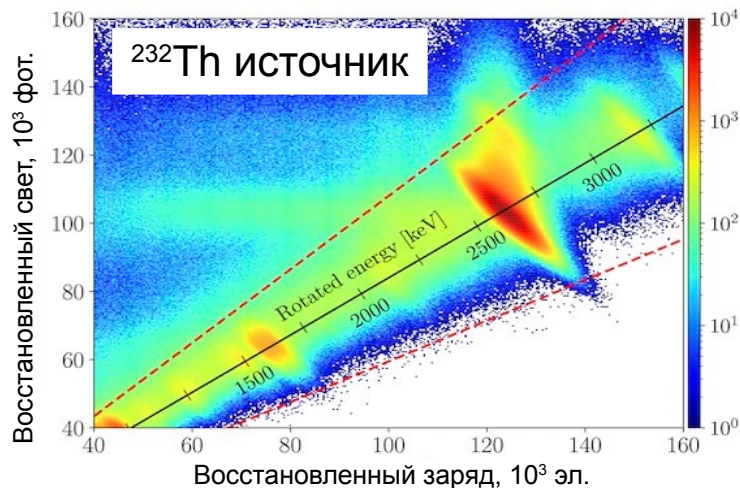
# Преимущества детекторов на жидком ксеноне

- Экранирование детекторов при изучении  $2\beta$  сложнее, чем для поиска частиц темной материи, поскольку длина поглощения соответствующих гамма-квантов значительно больше.
- Монолитная/однородная конструкция имеет ключевое значение из-за полного использования преимуществ самоэкранирования, когда размер детектора становится намного больше, чем длина поглощения.



# Преимущества детекторов на жидком ксеноне

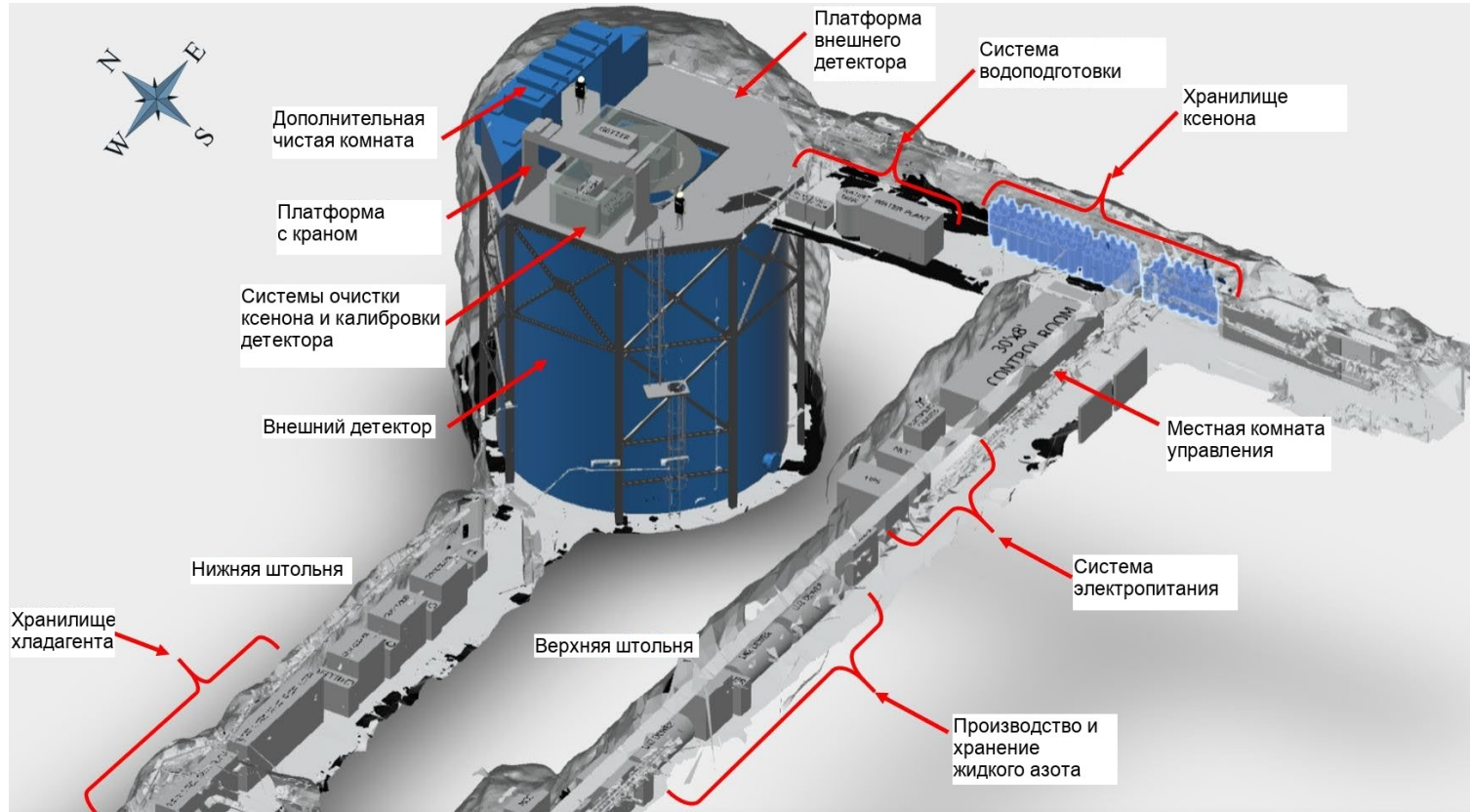
- Однородный детектор с усовершенствованной восстановлением топологии событий хорошо зарекомендовал себя в идентификации и подавлении  $\gamma$ -фона.
- Соотношение сцинтиляционного и ионизационного сигналов позволяет определять  $\alpha$  и измерить фон от радона, содержащегося в LXe.



- Многопараметрический анализ также делает измерение надежным по отношению к неизвестным в настоящее время фонам.
- Энергетическое разрешение, по-прежнему важное, достаточно хорошее, если сцинтиляция и ионизация используются в тандеме. nEXO будет иметь разрешение  $<1\%$  при значении энергии перехода.

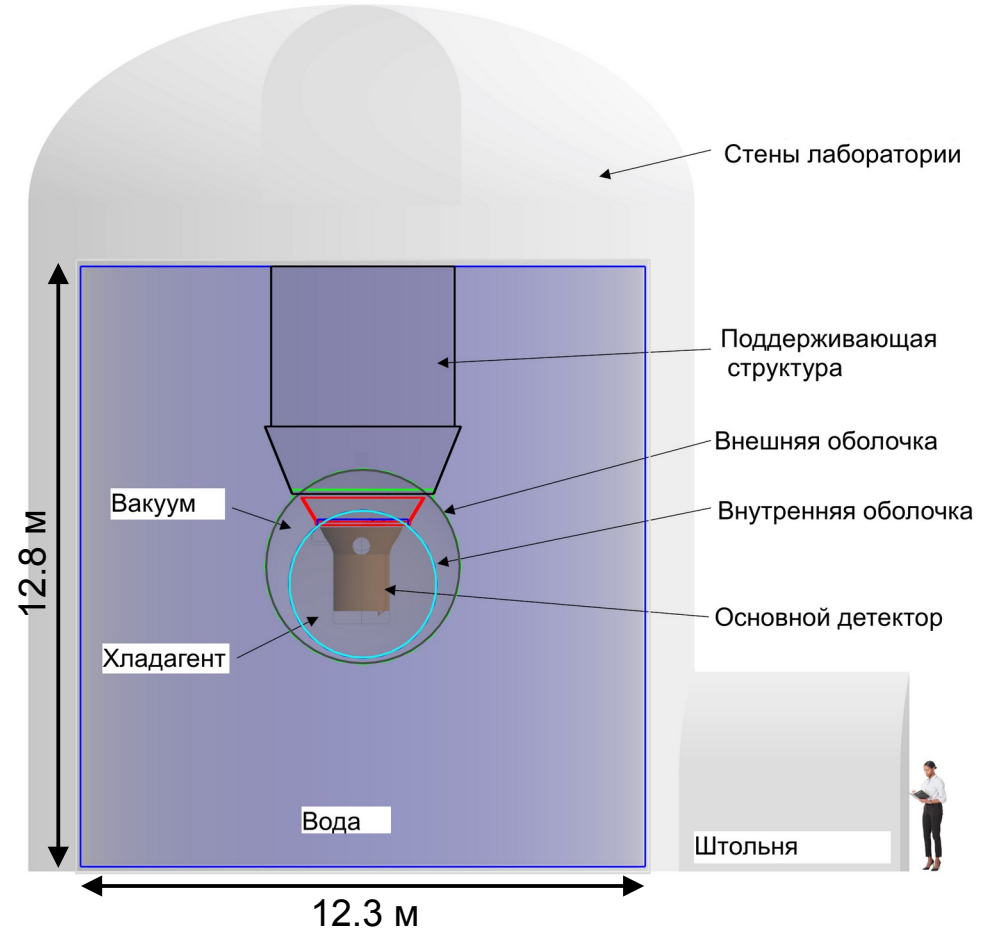
# Размещение эксперимента

Криопит SNO-LAB — предпочтительное место для nEXO, и SNO-LAB уже выполнила для нас множество инженерных и строительных работ.



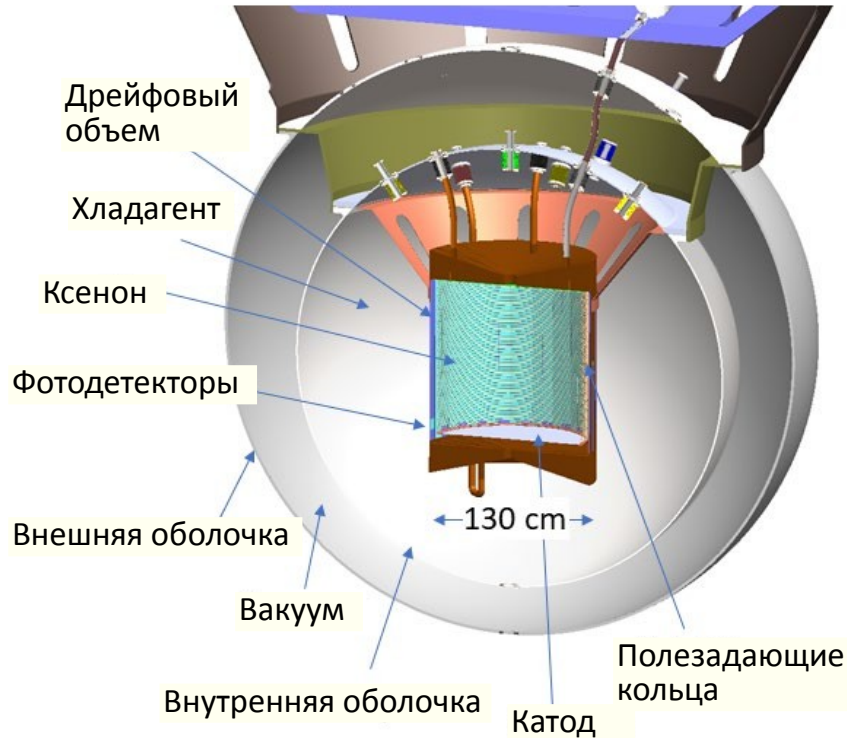
# Водяная защита

- Пассивное экранирование чистой водой для подавления внешнего гамма-излучения и нейтронов
- Активное вето — водяной черенковский детектор для маркировки космических мюонов
- Стальной цилиндрический бак с ФЭУ и светоотражающим покрытием
- Содержит необходимые опорные конструкции для удержания криостата и соединений детектора
- Уже профинансирован CFI



# Общий вид детектора

Детектор nEXO — это эволюция EXO-200, с продвижением разработки за 10 лет.

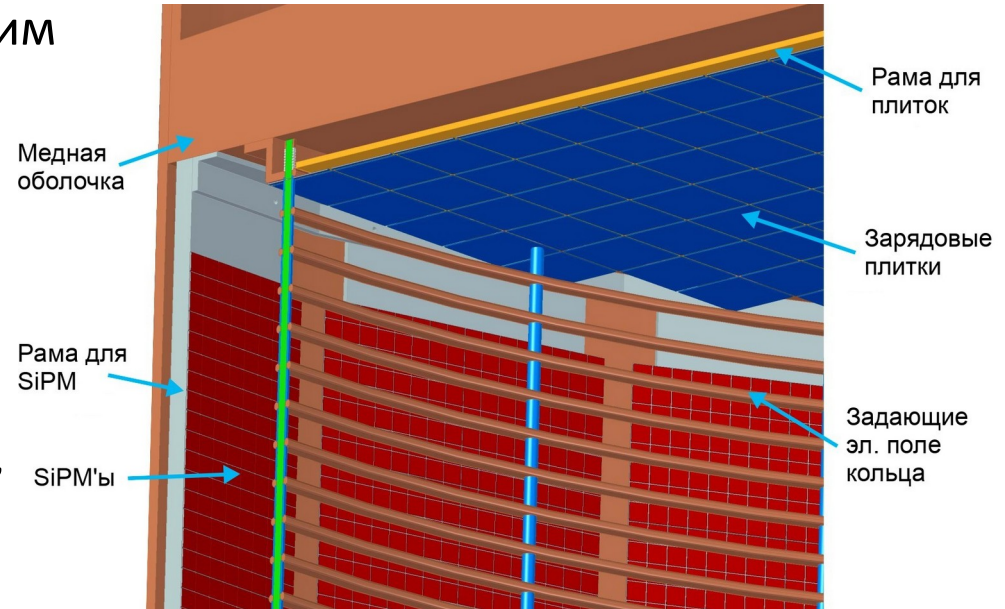


	EXO-200:	nEXO:	Улучшения:
<b>Оболочка детектора</b>	Тонкостенная низкофоновая медь с HFE	<i>Тонкостенная электроформ. медь с HFE</i>	Более низкий уровень фона
<b>Высокое напряжение</b>	Максимальное: 25 кВ	<i>Целевое: 50 kV</i>	Проверка деталей в натуральную величину в LXe перед установкой для минимизации риска
<b>Кабели</b>	Медь на полиимиде (аналог.)	<i>Медь на полиимиде (цифров.)</i>	Та же технология, но в 10 раз меньший уровень радиоактивности и проверена возможность передачи цифровых сигналов
<b>Время жизни электронов</b>	3-5 мс	<i>5 мс (треб.), 10 мс (цель)</i>	Минимум пластика (без отражателя из ПТФЭ) подробная программа скрининга материалов
<b>Регистрация заряда</b>	Скращенные проволочки	<i>Модульная из твердых плиток</i>	Разработаны плитки с нужными характеристиками успешно работающие в LXe, ведется моделирование
<b>Регистрация света</b>	APD + PTFE отражатель	<i>Массив SiPM сбоку</i>	Уменьшение шума и повышение эффективности, имеются прототипы от двух производителей
<b>Энергетич. разрешение</b>	1.2%	<i>1.2% (треб.), 0.8% (цель)</i>	Улучшение за счет уменьшения шума и наводок в основном в световом канале
<b>Электроника</b>	Обычная теплая	<i>Специальный ASIC</i>	Минимизация шума в каналах заряда и света, доработанные схемы из линейки для LAr TPC, продемонстрирована успешная работа прототипов
<b>Радиацион. контроль</b>	Измерение всех материалов	<i>Измерение всех материалов</i>	Программа следует успешной стратегии продемонстрированной в EXO-200
<b>Физ. размеры</b>	>2 длин поглос. до центра	<i>&gt;7 длин поглос. до центра</i>	Экспоненциальное затухание внешних гамм и другое полная идентификация Комптоновских событий



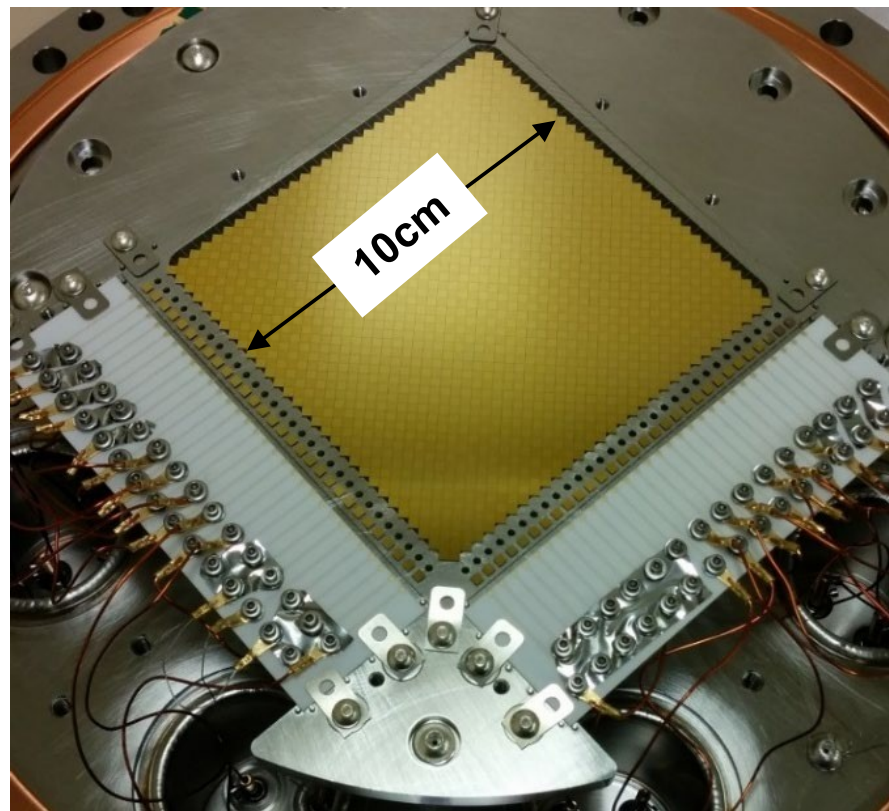
# Внутренняя структура детектора

- Время-Проекционная Камера с единым дрейфом, анод сверху, катод внизу
- Прямой цилиндр  $\sim 130$  см, тонкий сосуд из сверхчистой меди полученной прямым осаждением методом гальванопластики
- $\sim 4800$  кг жидкого ксенона с обогащением 90% по  $^{136}\text{Xe}$
- Охлаждение производится окружающим сосуд хладагентом
- Регистрация заряда и света
- Дрейфовое поле 400 В/см
- Расчетное энергетическое разрешение  $< 1\%$
- Особое внимание посвящено борьбе с электроотрицательными примесями, время жизни электронов должно достигать 10 мс



# Регистрация зарядов

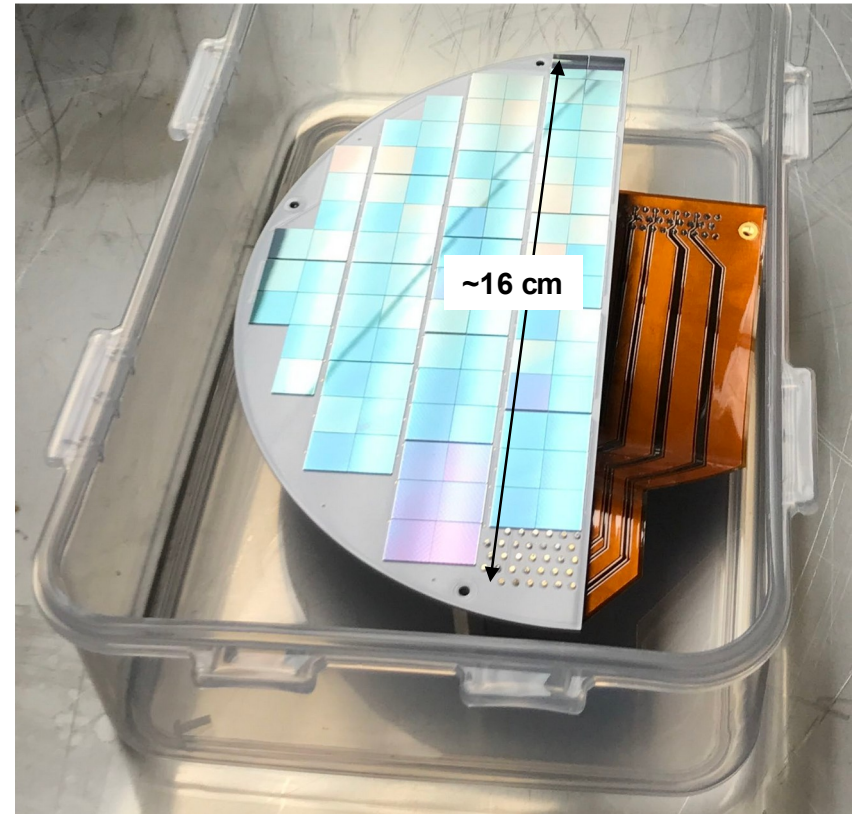
- Сегментный анод сверху выполнен из твердой плитки 96×96 мм.
- Плитка из низкофонового плавленого кварца с TSV (сквозные кремниевые переходы)
- Плитка плотно покрыта зарядочувствительными металлическими контактными площадками размером 4,2×4,2 мм.
- Площадки соединены в ортогональные полосы наподобие шахматной доски с эффективным шагом 6 мм.
- Электроника входного каскада с низким уровнем шума размещается в LXe прямо над плоскостью анода
- Рабочие образцы уже на руках и успешно протестированы



Статья: JINST 13 (2018) P01006

# Регистрация света

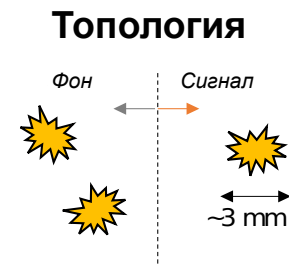
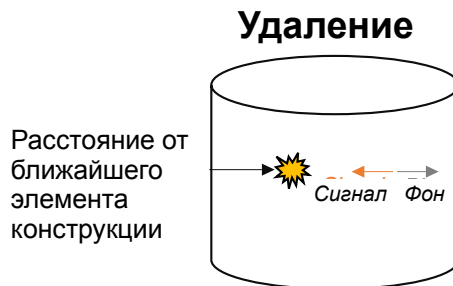
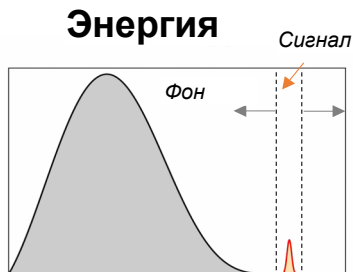
- Фотодетекторы находятся на «бочке» за кольцами формирования поля.
- Естественно чувствительные к ВУФ SiPM размером 1 см с TSV для покрытия площади  $4,6 \text{ м}^2$
- Переходник из кремния или плавного кварца для удержания и соединения SiPM и входной электроники в LXe
- Испытаны образцы НРК и FBK 6 мм
- Эффективность обнаружения фотонов 20–25%
- Коррелированные лавины 10–20%
- Темновой шум 0,2–0,3 Гц/мм<sup>2</sup>
- Прибыли новые образцы 10 мм



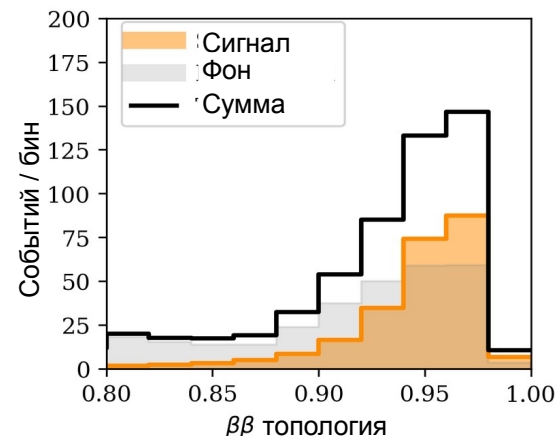
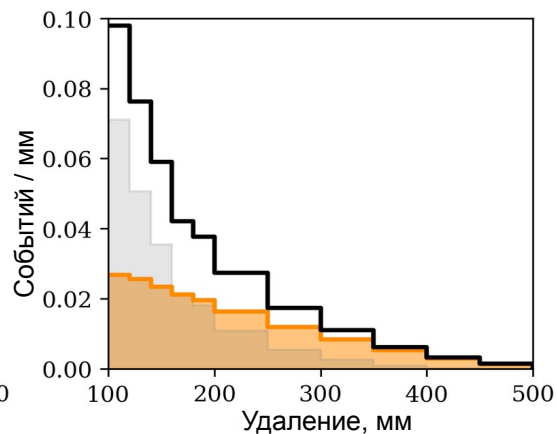
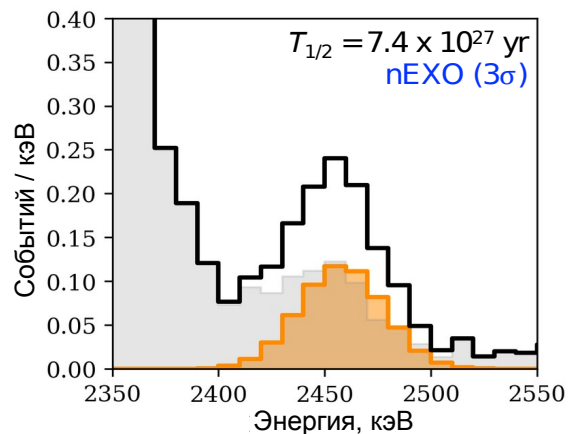
Статья: [Eur.Phys.J.C 82 \(2022\) 12, 1125](#)

# Сигнал и фон

- nEXO измеряет несколько параметров для каждого события, чтобы надежно идентифицировать сигнал  $0\nu\beta\beta$
- Многопараметрический анализ дает гораздо больше информации, чем просто энергия

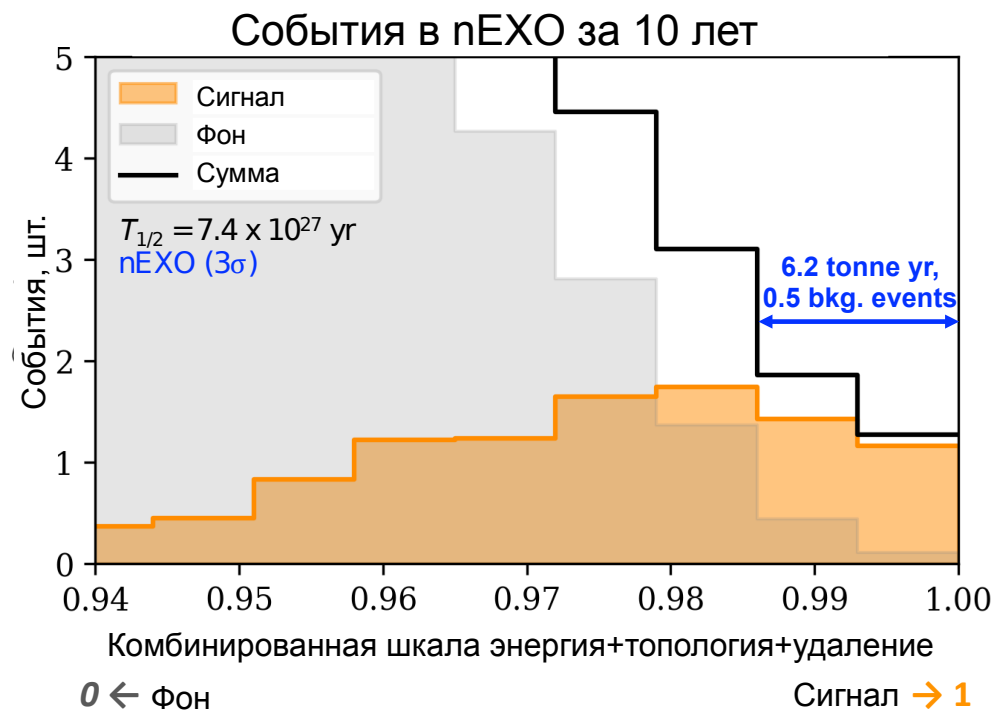


## Одномерные проекции распределения смоделированного сигнала



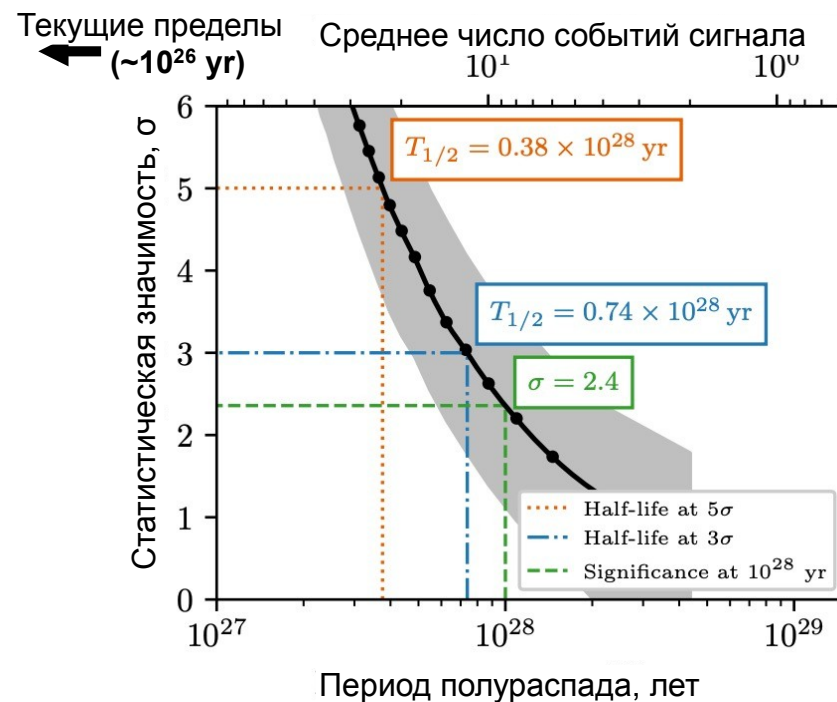
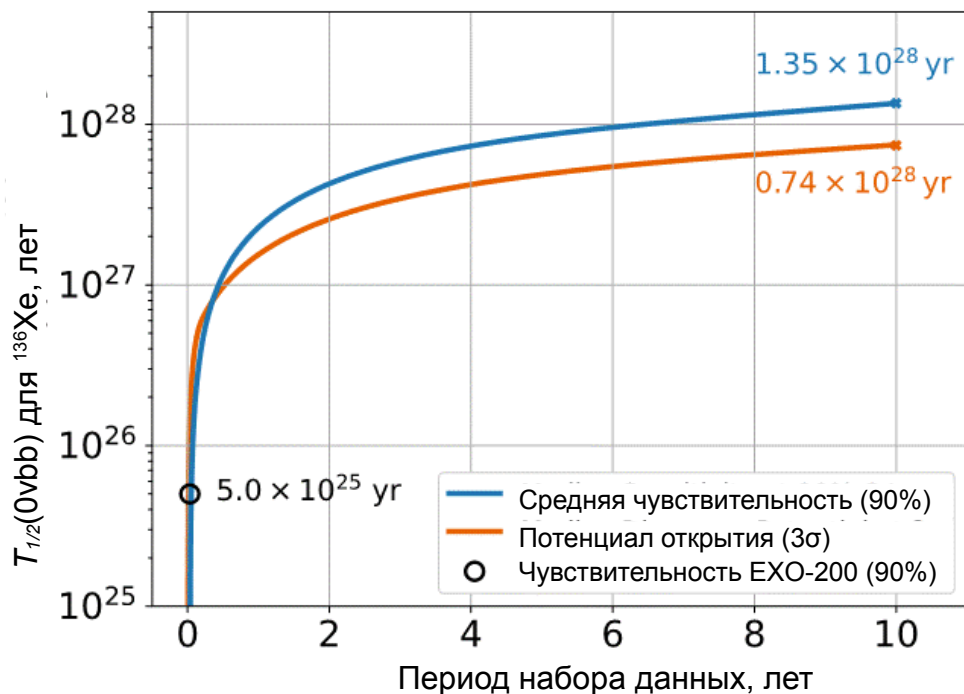
# Сигнал и фон

- Данные из областей с доминирующим фоном не выбрасываются, они используются для одновременного точного измерения фона на месте.
- Подгонка методом максимального правдоподобия обеспечивает оптимальное взвешивание между сигналом и фоном, сочетая энергию, топологию и зазор во всем трехмерном пространстве параметров.
- Для тех, кто хочет «кристально чистый сигнал», у нас есть место без фона с приемлемой статистикой.
- Любой неизвестный внешний фон оставит сотни событий во внешней части детектора и будет замечен
- Любой неизвестный внутренний фон можно проверить, заправив детектор естественным или обедненным ксеноном.

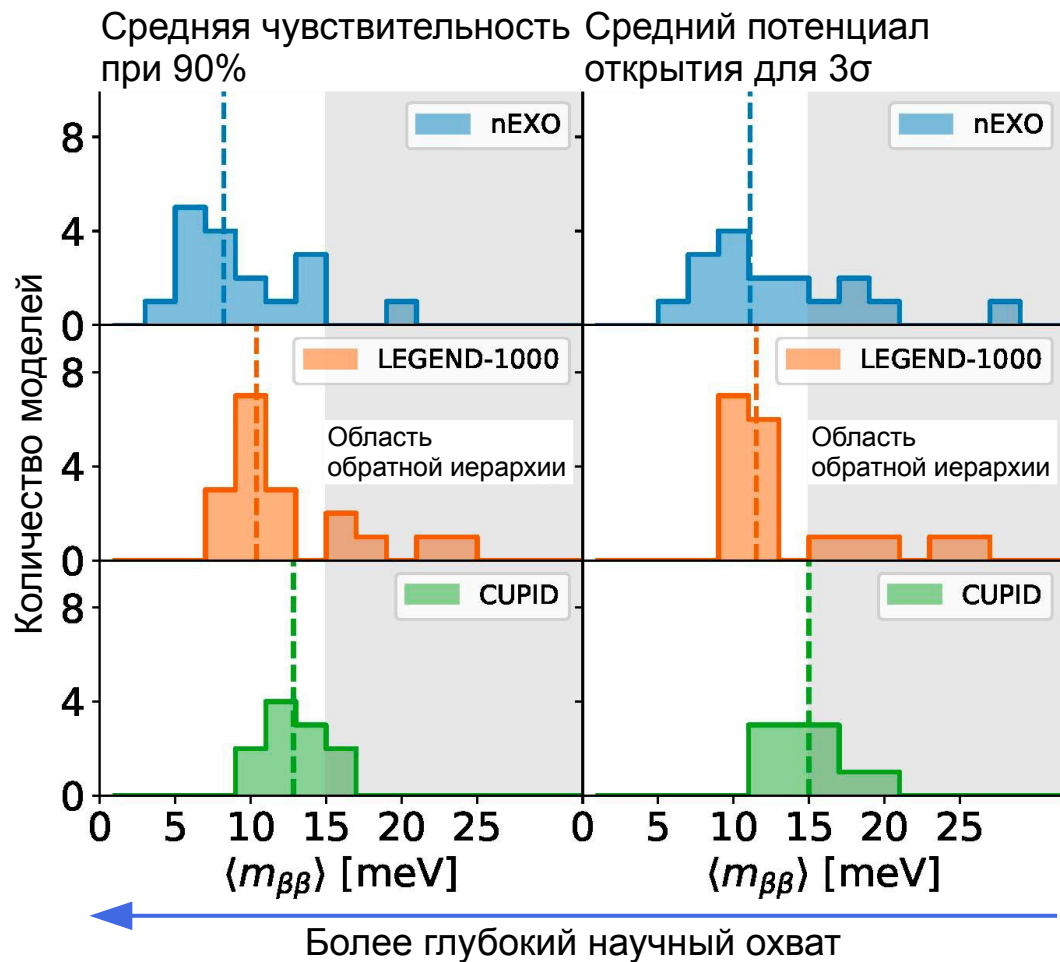


# Чувствительность

- nEXO — это эксперимент по поиску  $0\nu\beta\beta$  распада с чувствительностью к периоду полураспада примерно на 2 порядка выше по сравнению с существующими экспериментами.
- Чувствительность nEXO достигнет  $10^{28}$  лет за 6,5 лет сбора данных.



# Сравнение с другими экспериментами



- Для nEXO чувствительность обнаружения эффекта на уровне  $3\sigma$  для среднего рассматриваемых моделей NME составляет 11,1 мэВ, выходя за пределы IO дальше в область NO
- nEXO расширяет доступ к новой физике по  $T_{1/2}$  примерно на 2 порядка, со значительным шансом сделать открытие
- nEXO имеет немного лучший физический охват по сравнению с другими экспериментами (но неопределенность NME велика)

Статья: J.Phys.G 49 (2022) 1, 015104

# Заключение

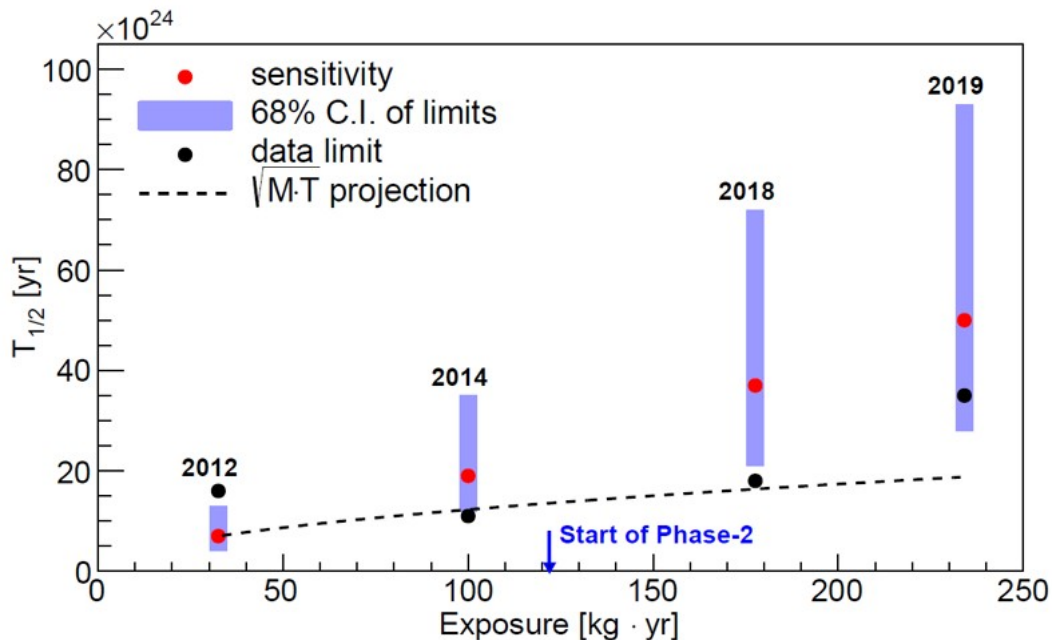
- nEXO — получил статус проекта в 2022 году.
- Это важная часть долгосрочного плана, поскольку для здоровой программы безнейтринного двойного бета-распада требуется несколько изотопов.
- Жидкий ксенон — хорошо разработанная и масштабируемая технология.
- Используемый комплексный многопараметрический анализ обеспечивает устойчивость к неизвестным фонам и колебаниям фона.
- nEXO позволит расширить доступ по  $T_{1/2}$  к новой физике примерно на 2 порядка, и имеет значительный шанс сделать открытие.
- Детектор может исследовать область эффективных майорановских масс нейтрино до 15 мэВ.
- Установка может сделать открытие самостоятельно, повторив эксперимент с необогащенным ксеноном, чтобы подтвердить, что сигнал исчезает.
- nEXO — это международная коллаборация, в которой на данный момент участвуют 9 стран, 38 учреждения, 186 сотрудников.



---

Спасибо

# Измерение $2\beta 0\nu$ в ECHO-200



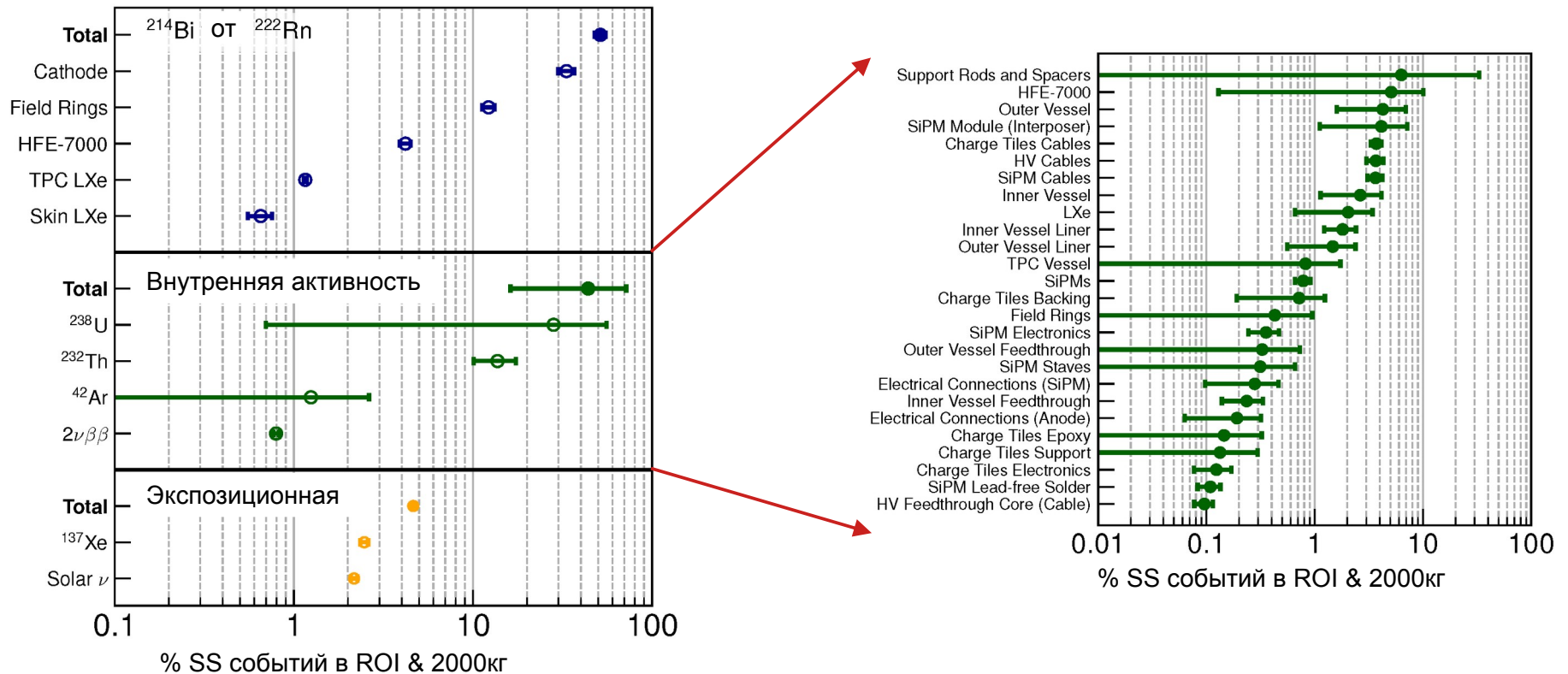
Вклад в $BQ \pm 2\sigma$	Phase I, соб.	Phase II, соб.
$^{232}\text{Th}$	12.6	12.0
$^{238}\text{U}$	10.0	8.2
$^{137}\text{Xe}$	8.7	9.3
<b>Всего</b>	<b><math>32.3 \pm 2.3</math></b>	<b><math>30.9 \pm 2.4</math></b>
<b>Данные</b>	<b>39</b>	<b>26</b>

- Полная экспозиция 234.1 кг·лет
- **Чувствительность  $5.0 \cdot 10^{25}$  лет (90% CL)**
- $T_{1/2}(0\nu\beta\beta) > 3.5 \cdot 10^{25}$  лет (90% CL)
- $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 93\text{--}286$  мэВ

Phys.Rev.Lett. 109 (2012) 032505  
 Nature 510 (2014) 229-234  
 Phys.Rev.Lett. 120 (2018) 072701  
 Phys.Rev.Lett. 123 (2019) 161802

# Источники фоновых сигналов

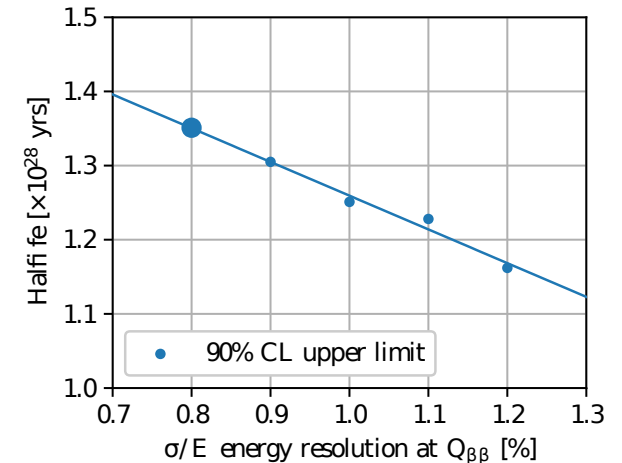
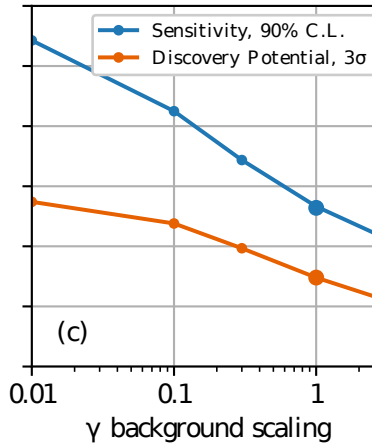
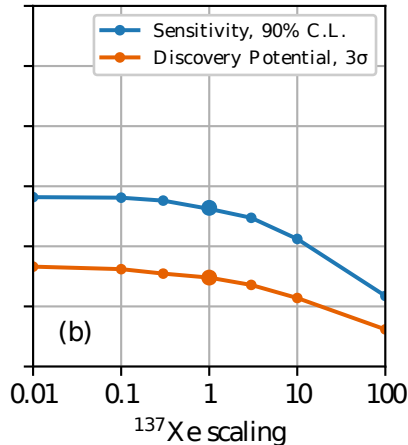
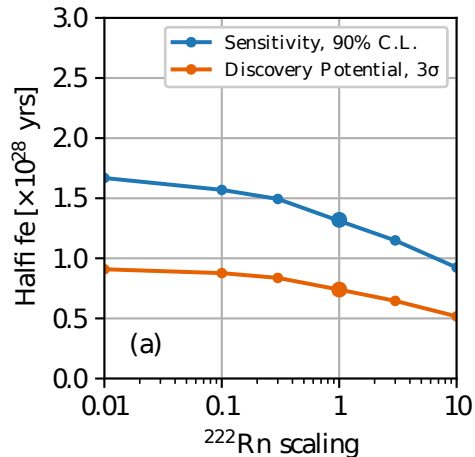
nEXO хорошо оптимизирован, ни одна из составных частей детектора не доминирует в суммарном фоне



# Вариации чувствительности

Надежность определения чувствительности вытекает из детальной консервативной модели детектора и фона использующей достигнутые (измеренные) значения для параметров

Проведено исследование зависимости чувствительности эксперимента к изменению уровней активности некоторых источников фона, энергетического разрешения детектора и др.



# nEXO preliminary high-level schedule

