

«РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БЕЗНЕЙТРИННОГО ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА ^{150}Nd

Вересникова Анна Васильевна
ИЯИ РАН, КБГУ



Поиск безнейтринного двойного бета-распада – одна из наиболее интересных и актуальных задач современной экспериментальной физики, связывающая ядерную физику с астрофизикой и космологией.

Обнаружение этого процесса приведет к **двум фундаментальным выводам**: закон сохранения лептонного числа нарушается и нейтрино является майорановской частицей.

Обнаружение $0\nu\beta\beta$ -распада – проявление “новой физики” за пределами Стандартной Модели.

Исследование различных изотопов и типов распада позволит получить информацию о механизме безнейтринного двойного бета-распада.

До настоящего времени безнейтринный двойной бета-распад не обнаружен и для его периода полураспада ($T_{1/2}$) получены только нижние пределы.

Наибольшие ограничения на значения $T_{1/2}$ получены на уровне, превышающем 10^{26} лет.

Среди наиболее перспективных кандидатов по поиску $0\nu 2\beta$ - ядро изотопа ^{150}Nd .

Ряд важных преимуществ по сравнению с другими изотопами:

- Энергия распада (3,3678 МэВ) является одной из наибольших и, как следствие, высокая вероятность $0\nu\beta\beta$
- Благодаря большой энергии распада в жидком органическом сцинтилляторе **может быть получено хорошее энергетическое разрешение (несколько процентов).**
- Большая энергия распада и высокий атомный номер приводят к тому, что **доля событий от двухнейтринного двойного бета-распада ($2\nu 2\beta$)**, попадающих в область $0\nu\beta\beta$ - распада, **оказывается минимальной по сравнению с другими элементами.**
- Наибольшая энергия внешнего гамма-излучения от естественных радиоактивных изотопов составляет 2.615 МэВ (^{208}Tl в ряду ^{232}Th) и существенно меньше энергии $0\nu\beta\beta$ - распада.

В КБГУ совместно с ИЯИ РАН в 2022-2024 гг. реализован проект «Новые методы
исследования безнейтринного двойного бета-распада»



Основная цель работы – создание прототипа детектора на основе неодимсодержащего жидкого органического сцинтиллятора для поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{150}Nd .

Исследование рабочих материалов новых гибридных сцинтилляторов, которые сочетают в себе преимущества как неорганических кристаллов, так и органических жидкостей.

Детектор на основе жидкого сцинтиллятора позволяет осуществить эксперимент с десятками, сотнями и более килограммами растворенного неодима.

Преимущества такого детектора:

- относительная лёгкость масштабирования до больших размеров
- 100% эффективность регистрации электронов
- возможность глубокой очистки от радиоактивных примесей

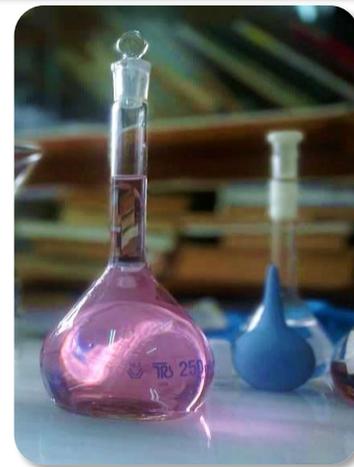
Разработанный состав сцинтиллятора должен в максимальной степени удовлетворять следующим требованиям:

- 1) Иметь **высокий световыход** (~ 10000 фотонов/МэВ).
- 2) **Большую длину ослабления света** (эффективная длина ~ несколько метров).
- 3) **Растворитель** (основа сцинтиллятора), обладая хорошими сцинтилляционными и оптическими свойствами, **позволяет иметь устойчивые растворы с солями неодима высокой концентрации**. В тоже время имеет высокую температуру вспышки и низкую токсичность.
- 4) **Совместимость с конструкционными материалами**.
- 5) **Стабильность** сцинтилляционных характеристик в течение длительного времени (несколько лет).
- 6) **Низкое содержание радиоактивных примесей**.

Разработан оптимальный состав жидкого органического сцинтиллятора для поиска безнейтринного двойного бета-распада на основе 3,5,5-триметилгексаноата Nd (TMHA)₃ и дополнительного растворителя трибутилфосфата (ТБФ) в ЛАБ.

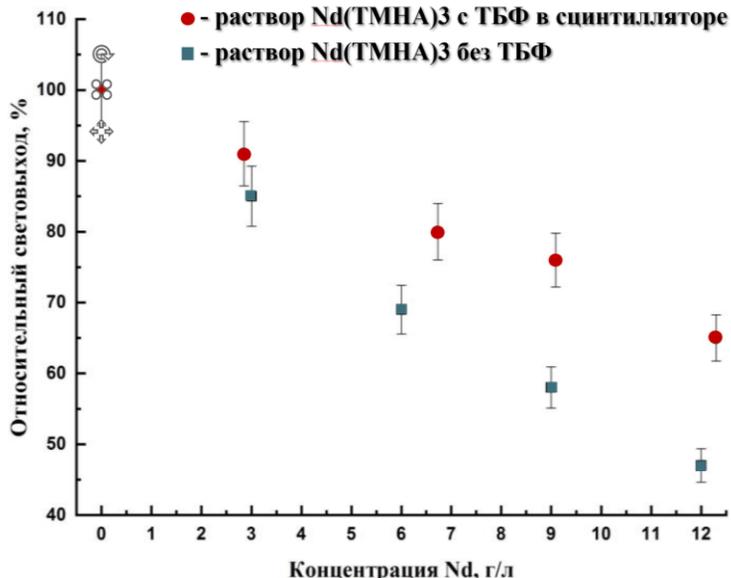


Новая технология введения Nd
в сцинтиллятор в виде
концентрированных растворов
карбоксилатов неодима в ТБФ



Методом ИК-спектроскопии показано, что ТБФ образует дополнительные координационные связи с карбоксилатом неодима и тем самым препятствует его гидролизу и полимеризации. ТБФ увеличивает растворимость карбоксилатов неодима

ТБФ Увеличивает световойход сцинтиллятора и препятствует образованию олигомеров



Световойход сцинтиллятора на основе ЛАБ (РРО -5г/л, bis-MSB - 0,02г/л) в зависимости от концентрации неодима

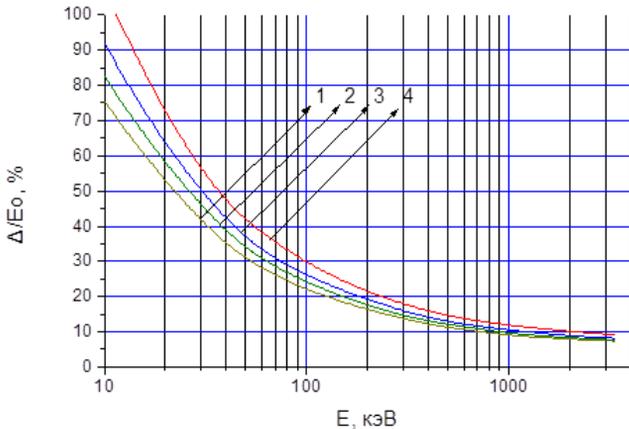
Световойход сцинтиллятора состава [ЛАБ+ВРО (3г/л) +ТБФ (6,3%) +Nd (5,9±0,2 г/л)] равен 78% относительно сцинтиллятора [ЛАБ+ВРО(3г/л)].

Наиболее чувствительным методом исследования чистоты и стабильности сцинтиллятора является УФ-спектрофотометрия.

Разработан программный пакет, позволяющий проводить калибровку детектора для поиска безнейтринного двойного бета-распада в широком диапазоне энергий. Разработана математическая модель, позволяющая моделировать распределения случайных событий методом статистических испытаний с использованием цепи Маркова с конечным числом состояний. Это позволяет с помощью переходной имплективной матрицы быстро получить вероятности всех процессов, включая редкие, с заданным начальным состоянием.



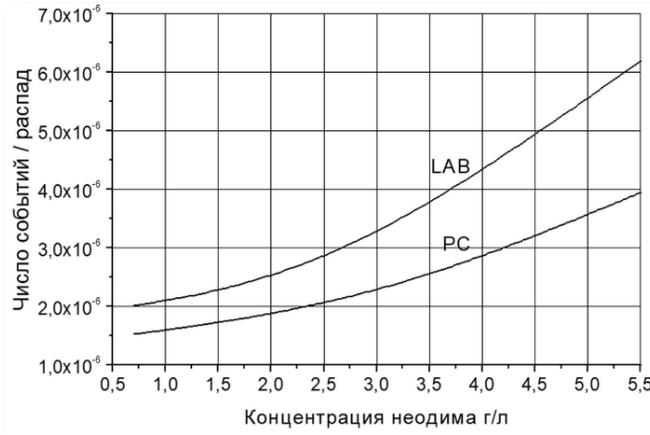
Рассчитано энергетическое разрешение сцинтиляционного детектора объёмом 3 л для регистрации безнейтринного двойного бета-распада ^{150}Nd в зависимости от концентрации неодима и конструкции детектора. Показано, что вплоть до концентрации Nd ~ 5 г/л энергетическое разрешение остается достаточно высоким $\sim 9\%$.



Энергетическое разрешение цилиндрического модуля диаметром 10 см и длиной 30 см для четырёх вариантов концентрации Nd в сцинтиляторе LAB:
1 - 0.7 г/л, 2 - 1.8 г/л, 3 - 3.3 г/л, 4 - 5.5 г/л.

Показано, что на предварительном этапе с использованием 11 г обогащенного неодима в неодимсодержащем жидком органическом сцинтиляторе для достижения предела для $0\nu 2\beta$ распада на уровне 10^{22} - 10^{23} лет примесь тория Th в обогащенном неодиме не должна превышать 10^{-10} - 10^{-11} гTh/г.

Получены ограничения на чувствительность детектора при поиске безнейтринного двойного бета-распада изотопа ^{150}Nd , связанные с наличием двухнейтринной моды бета-распада.



Вклад моды распада $2\nu 2\beta$ в область регистрации $0\nu 2\beta$ на один распад ^{150}Nd для цилиндрического детектора в зависимости от его концентрации в сцинтилляторах LAB и PC.

Рассчитан внутренний фон детектора, возникающий при поиске безнейтринного двойного бета-распада изотопа ^{150}Nd , от:

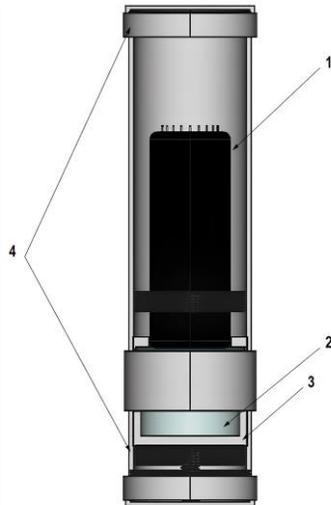
- двухнейтринного бета распада того же изотопа,
- радиоактивных элементов, содержащихся в сцинтилляторе (^{214}Bi с максимальной энергией распада 3,272 МэВ и ^{208}Tl с максимальной энергией распада 5,001 МэВ, ^{232}Th и ^{238}U)
- фон от примесей ^{232}Th и ^{208}Tl в медной защите детектора общим весом 357 кг

Проведён анализ источников внутреннего и внешнего фона. Показано, что даже на сравнительно небольшом детекторе можно достичь предела для $0\nu 2\beta$ полураспада на уровне 7×10^{26} лет, что существенно лучше современного достигнутого предела 1.8×10^{22} лет.

С целью изучения возможности использования технологии 3D-печати для изготовления конструктивных элементов низкофоновых детекторов и узлов низкофоновой защиты, был разработан и изготовлен сцинтилляционный детектор с корпусом, напечатанным с помощью 3D-принтера. Выполнено тестирование детектора с помощью калибровочных источников ^{137}Cs и ^{60}Co . Проведен продолжительный набор фона для проверки стабильности работы сцинтилляционного детектора. Получены результаты, подтверждающие возможность использования 3D-печати.

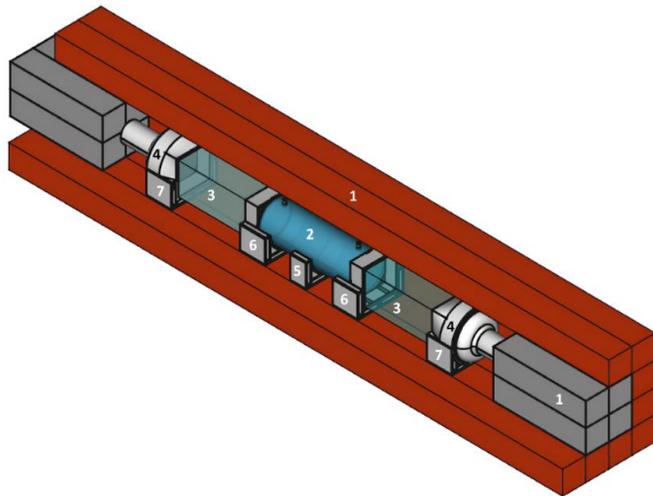


Сцинтилляционная ячейка, напечатанная на 3D-принтере. Объем ~ 73 см³



Экспериментальный
стенд в сборе
1 – ФЭУ-97;
2 – сцинтиллятор;
3 – ячейка из PETG-
пластика;
4 - светоизолирующий
корпус;
PETG – это
модифицированный
полиэтилентерефталат
(PET), в который на
молекулярном уровне
добавлен гликоль.

В качестве прототипа крупногабаритного детектора в рамках проекта “Новые методы исследования безнейтринного двойного бета-распада” **разработан и создан детектор на основе цилиндрической кварцевой ячейки** объемом ~ 2,3 литра, заполненной жидким органическим сцинтиллятором, нагруженным металлом. Сцинтилляционный сигнал регистрируется с помощью двух ФЭУ Beijing Hamamatsu CR165, отдаленных от ячейки с помощью световодов из оргстекла. Детектор окружен низкофоновой защитой для снижения влияния внешнего радиоактивного излучения, вызванного распадами ^{238}U , ^{232}Th , и дочерними продуктами, а также ^{40}K .



Схематическое изображение прототипа
детектора для регистрации безнейтринного
двойного бета-распада ^{150}Nd

- 1 – Медь;
- 2 – Кварцевая ячейка, заполненная жидким
сцинтиллятором;
- 3 – Световоды из оргстекла;
- 4 – ФЭУ в светозащитном кожухе из PETG-
пластика;
- 5 – подставка под ячейку из PETG-пластика;
- 6 – адаптеры для оптического соединения
кварцевой ячейки и световодов, материал
PETG-пластик;
- 7 – адаптеры для оптического соединения
световодов и ФЭУ, материал PETG-пластик;

Кварцевая ячейка, заполненная
неодимсодержащим жидким
органическим сцинтиллятором



Сборка сцинтилляционного детектора



1 – кварцевая ячейка, обернутая отражателем VM2000 + фторопластовая лента, 2 – световоды, обернутые отражателем VM2000 + фторопластовая лента, 3 – подставка под кварцевую ячейку, материал PETG, 4 – переходники для оптического соединения кварцевой ячейки и световодов, материал PETG, 5 – переходники для оптического соединения световодов и ФЭУ, материал PETG.

Расположение детектора внутри медной защиты

- 1 – медь,
- 2 – кварцевая ячейка,
- 3 – световоды,
- 4 – адаптеры для оптического соединения кварцевой ячейки и световодов, материал PETG,
- 5 – адаптеры для оптического соединения световодов и ФЭУ, материал PETG,
- 6 – ФЭУ в светозащитном кожухе из PETG – пластика





Экспериментальная установка в сборе

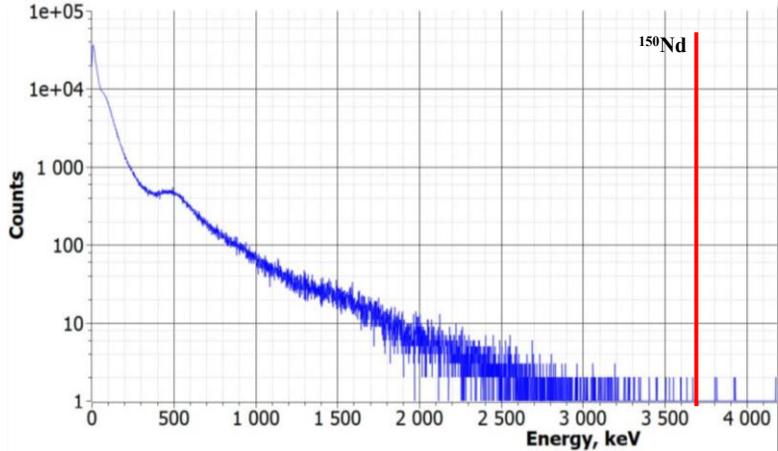
Детектор окружен низкофоновой защитой из 15 см меди, 7,5 см свинца. Между медью и свинцом проложена черная пленка для обеспечения светозащиты чувствительной области детектора от внешнего света.

Экспериментальная установка расположена в отдельном низкофоновом боксе низкофоновой лаборатории глубокого заложения НЛГЗ-4900 (4900 м в. э.), обеспечивающим дополнительную защиту от естественной радиоактивности.



Выполнена отладка и технический пуск экспериментальной установки с прототипом детектора в отдельном низкофоновом боксе лаборатории НЛГЗ-4900 БНО ИЯИ РАН. Проведена калибровка прототипа детектора несколькими калибровочными радиоактивными источниками (^{241}Am , ^{137}Cs , ^{232}Th). Проведено более 2000 часов измерений фона прототипа детектора.

Спектр фона
экспериментальной
установки.
Время набора 2000 ч.



Полученные результаты показали, что основной вклад в фон вносит материал, из которого изготовлена ячейка (кварц). Сформулированы требования к радиационной чистоте материала ячейки для достижения необходимого уровня фона при проведении эксперимента по поиску безнейтринного двойного бета-распада.