

Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение высшего образования НИЯУ «МИФИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ДЕТЕКТОРЕ РЭД-100



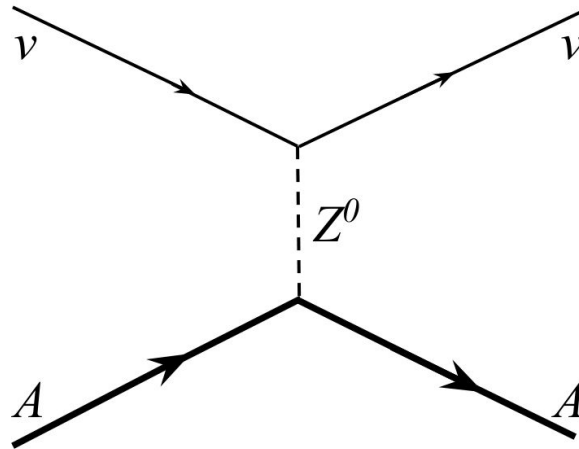
Коськин Ю.И.
группа Б21-102
Научный руководитель
Кумпан А. В.

Целями данной работы являются:

- подготовка среды для моделирования событий в детекторе РЭД-100 с учетом замены рабочего вещества с ксенона на аргон;
- моделирование отклика детектора на гамма-фон от радиоактивных изотопов, содержащихся в бетоне и различных частях конструкции установки, сравнение полученных результатов с предсказанным откликом от упругого когерентного рассеяния нейтрино (УКРН);
- моделирование отклика детектора на нестандартные взаимодействия нейтрино, исследование возможности регистрации их при помощи детектора РЭД-100.

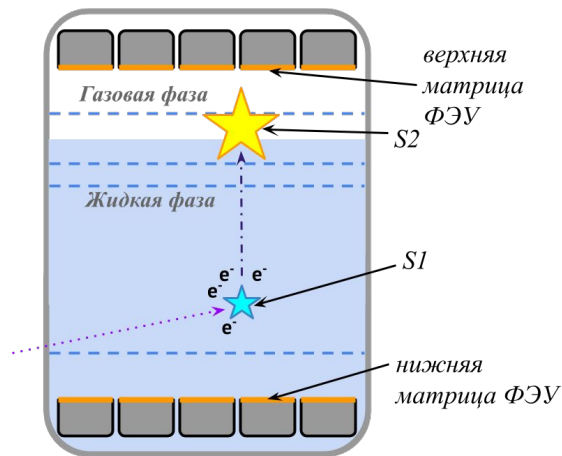
Упругое когерентное рассеяние нейтрино

Если импульс, передаваемый нейтрино ядру, достаточно мал, нейтрино может взаимодействовать с ядром, как с единым целым. Данный процесс называется **упругое когерентное рассеяние нейтрино** (УКРН). Впервые зарегистрирован коллаборацией COHERENT в 2017 году на ядрах Cs и I. На данный момент процесс зарегистрирован еще на ядрах германия, ксенона и аргона. В 2022 году проведен эксперимент по исследованию УКРН в РЭД-100 и поставлено ограничение на его сечение



Детектор РЭД-100

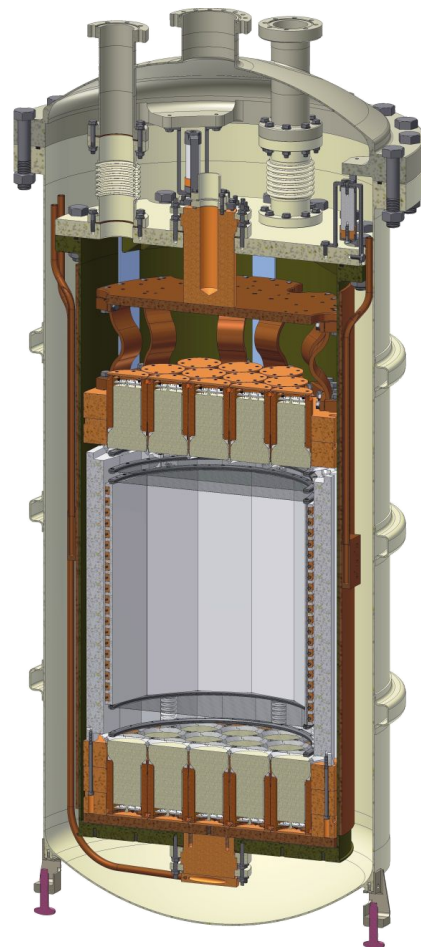
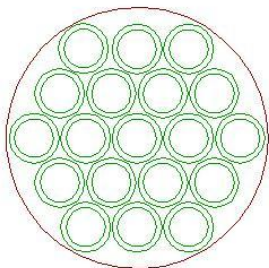
- Двухфазный эмиссионный детектор
- Сцинтилляция + электроны ионизации → вторичная сцинтилляция в газовой фазе (электролюминесценция)
- Рабочий объем сверху и снизу просматривается двумя матрицами по 19 ФЭУ в каждой
- 3D реконструкция событий



Детектор чувствителен к одиночным электронам ионизации.

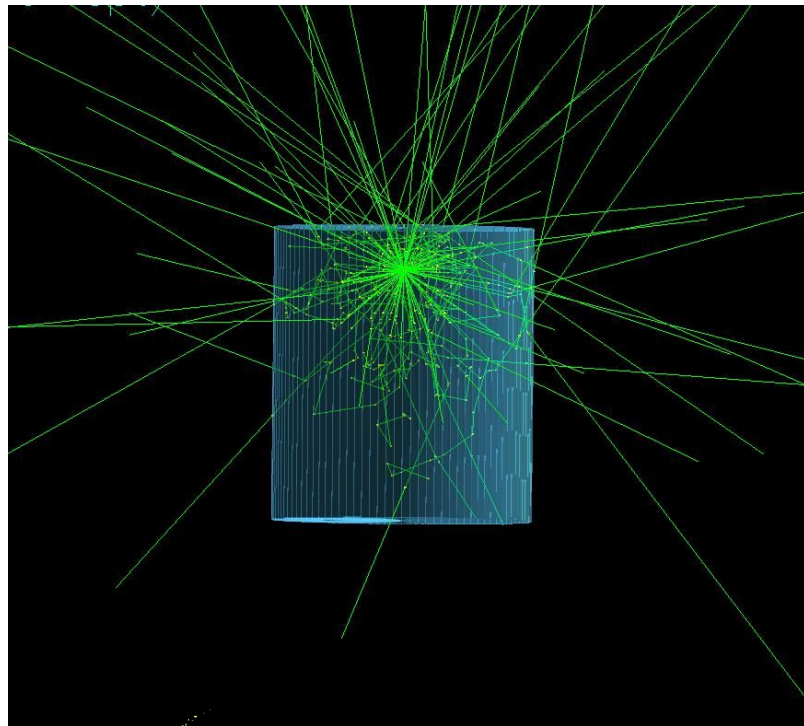
2022: эксперимент на КАЭС с Xe

2022-25: подготовка к эксперименту на КАЭС с Ar



Моделирование событий. GEANT4

- Для моделирования фоновых процессов в эксперименте на КАЭС использовался программный пакет GEANT4
- Детальная модель геометрии детектора в GEANT4
- Описанные в «*физическом листе*» взаимодействия и их параметры позволяют с высокой точностью воссоздавать общий характер движения частиц и их взаимодействий с веществом
- Произведена замена рабочего вещества в модели с ксенона на аргон



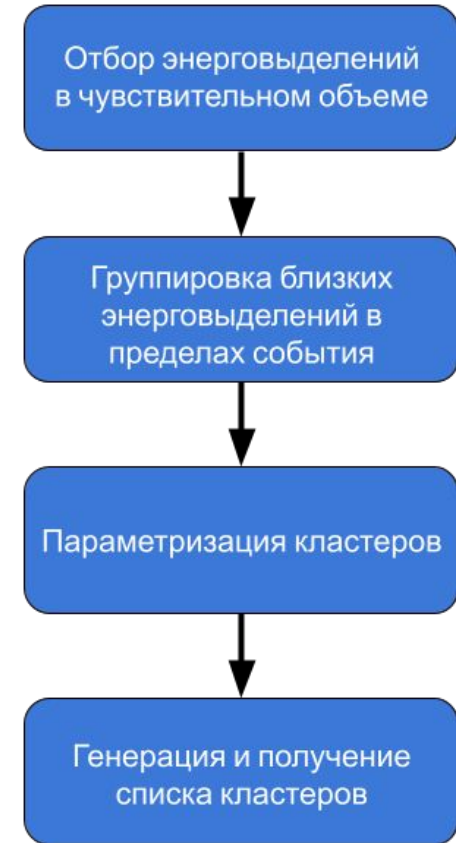
Моделирование событий.

Алгоритм кластеризации

Алгоритм симуляции наблюдения энерговыделений в детекторе (различимость отдельных энерговыделений не имеет значения)

Алгоритм кластеризации:

1. **Генерация событий** в программном пакете Geant4, **отбор** энерговыделений по координатам и деление по временным интервалам
2. **Кластеризация энерговыделений** по времени и координатам
3. **Отслеживание параметров** (времени, координаты, энергии, типа частицы) отдельных кластеров и события в целом
4. **Получение списка кластеров** для генерации в дальнейшем сцинтилляционных сигналов в детекторе



Моделирование фоновых событий для эксперимента на КАЭС

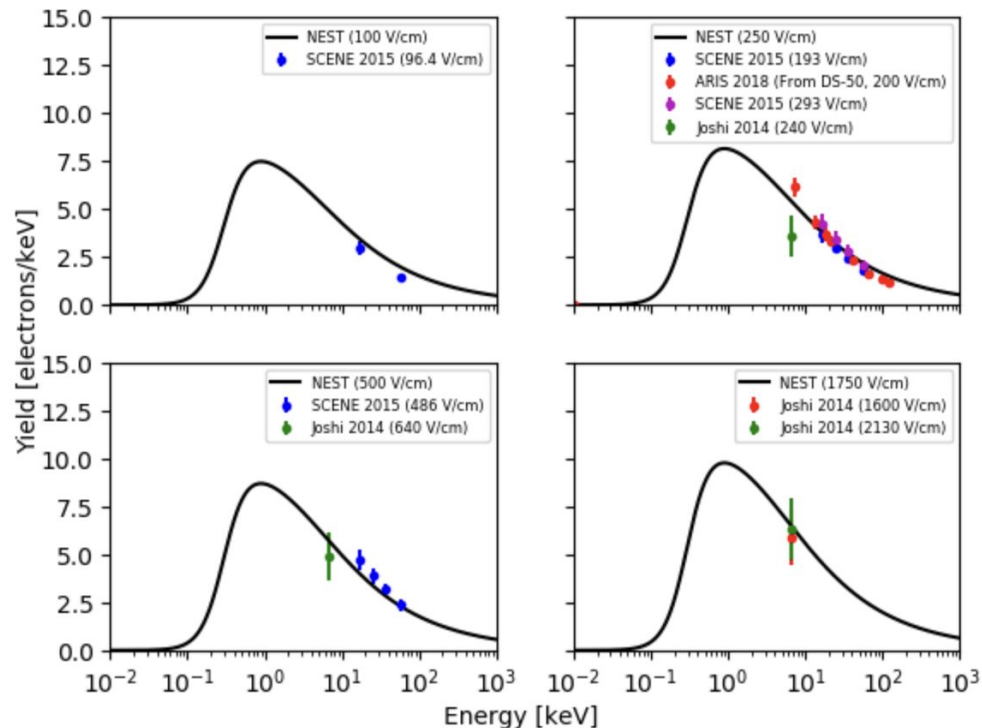
- Для моделирования отклика детектора нужно не просто энергетические спектры, а распределения по количеству электронов ионизации в событии
- С помощью программного пакета NEST (Noble Element Simulation Technique) производится **перевод энерговывделений в электроны ионизации**
- Моделирование дрейфа и экстракции:

Коэффициент экстракции(Xe) = 32.8%

Время жизни e^- (Xe) = 874 ± 20 мкс

Коэффициент экстракции(Ar) ~ 100%

Время жизни e^- (Ar) ~ 430 мкс



Моделирование фоновых событий для эксперимента на КАЭС

- Для анализа экспериментальных данных необходимо располагать информацией о характере фонов на эксперименте
- В бетоне, материалах кристотата и матрицах ФЭУ содержатся изотопы ^{238}U , ^{40}K и ^{232}Th
- Пассивная защита: водяной бак и медный колодец
- Смоделировано 3 суток фона

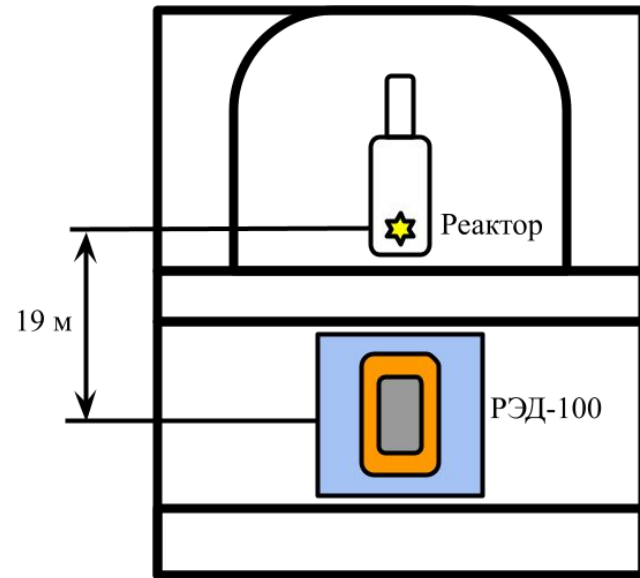
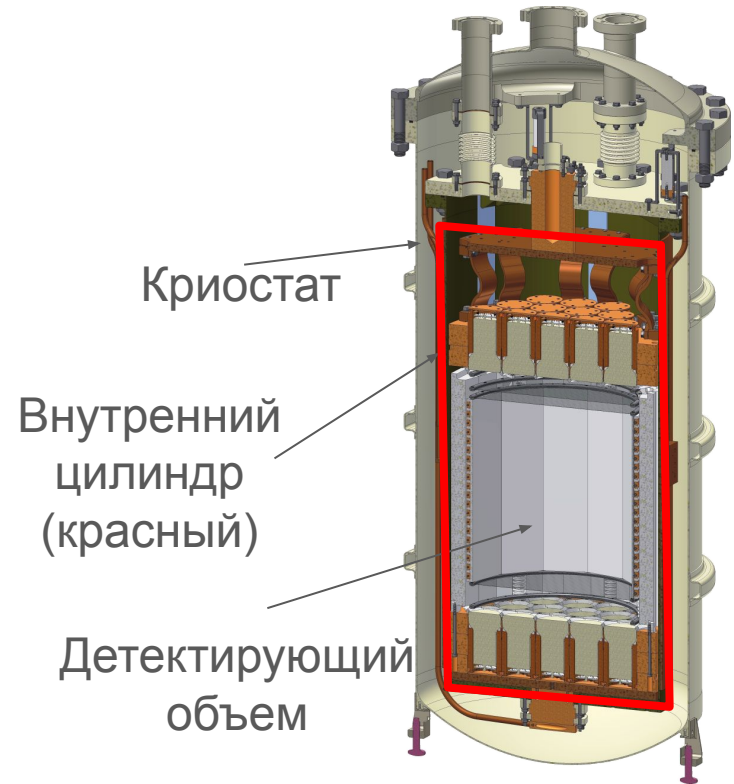


схема расположения установки
РЭД-100 на КАЭС

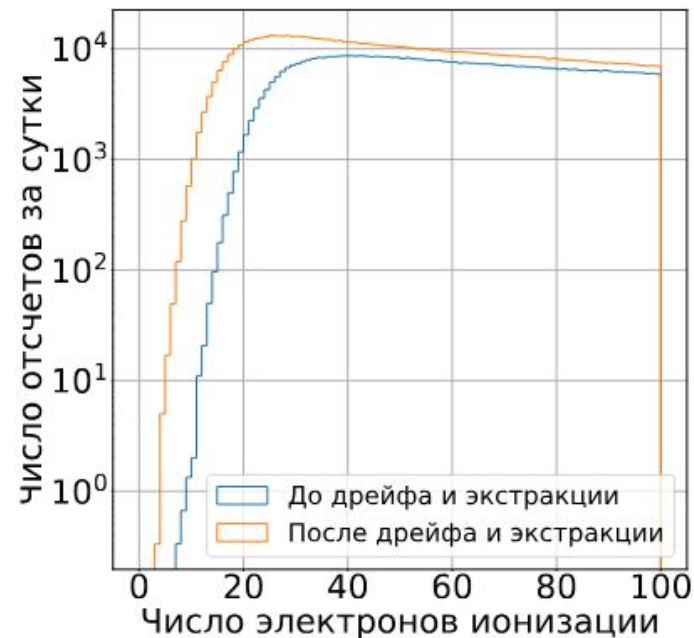
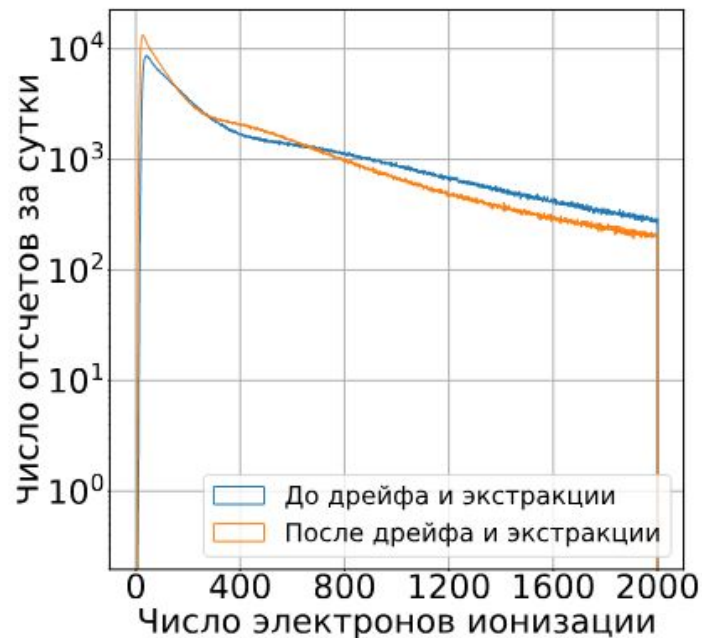
Моделирование фоновых событий для эксперимента на КАЭС

- Моделирование напрямую – долго
- Упрощения: внутренний и внешний цилиндры

По результатам моделирования было получено распределение фоновых энерговыделений по количеству электронов ионизации (далее “спектр в электронах ионизации”), возникающих при взаимодействии гамма-фонов с веществом детектора



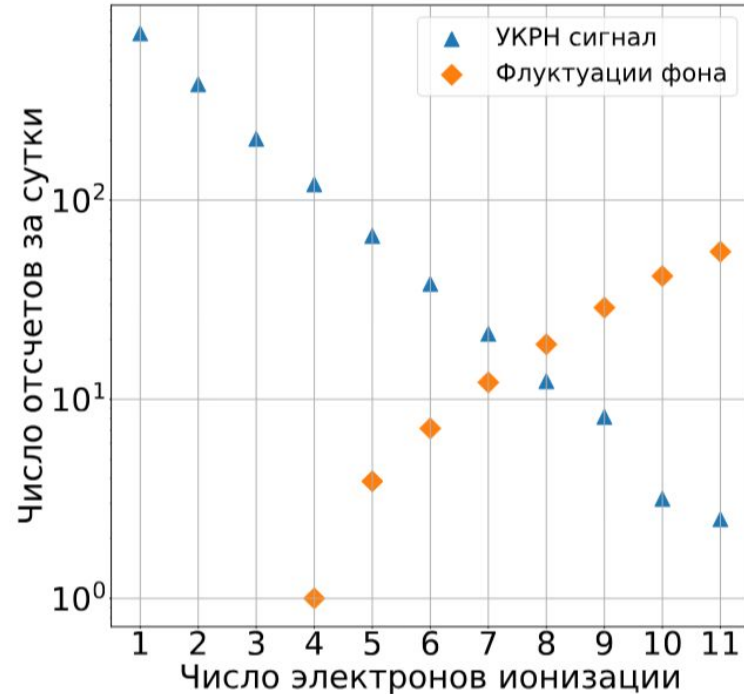
Моделирование фоновых событий для эксперимента на КАЭС



Фоновые спектры в электронах ионизации слева: до 2000 электронов, справа — до 100 электронов ионизации

Моделирование фоновых событий для эксперимента на КАЭС

- Ожидаемый сигнал от упругого когерентного рассеяния нейтрино в аргоне составляет до десяти электронов ионизации.
- Флуктуации фона составляют допустимую незначительную долю от числа событий УКРН в области до 7 электронов ионизации
- Модернизация защиты и критериев отбора улучшит соотношение флуктуаций фона к сигналу в области больше 7 электронов ионизации



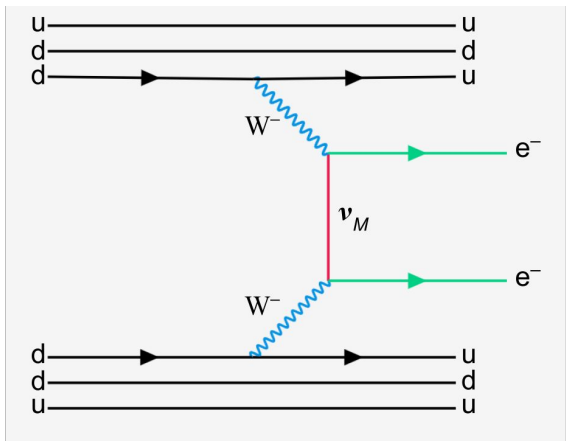
Двойной безнейтринный бета-распад

Двойной бета-распад:

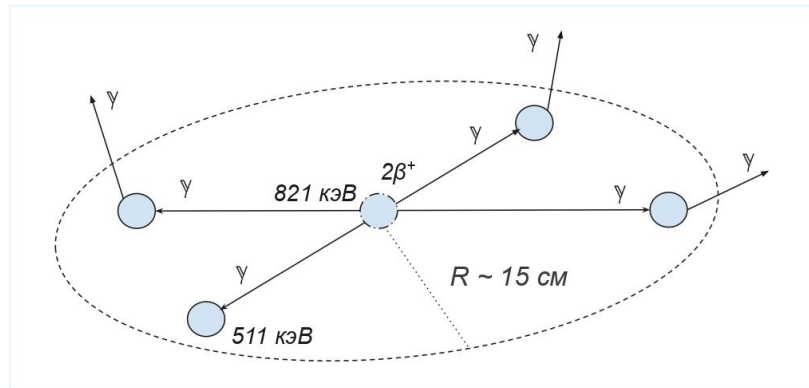
$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\nu_{\bar{e}}$$

Двойной безнейтринный бета-распад:

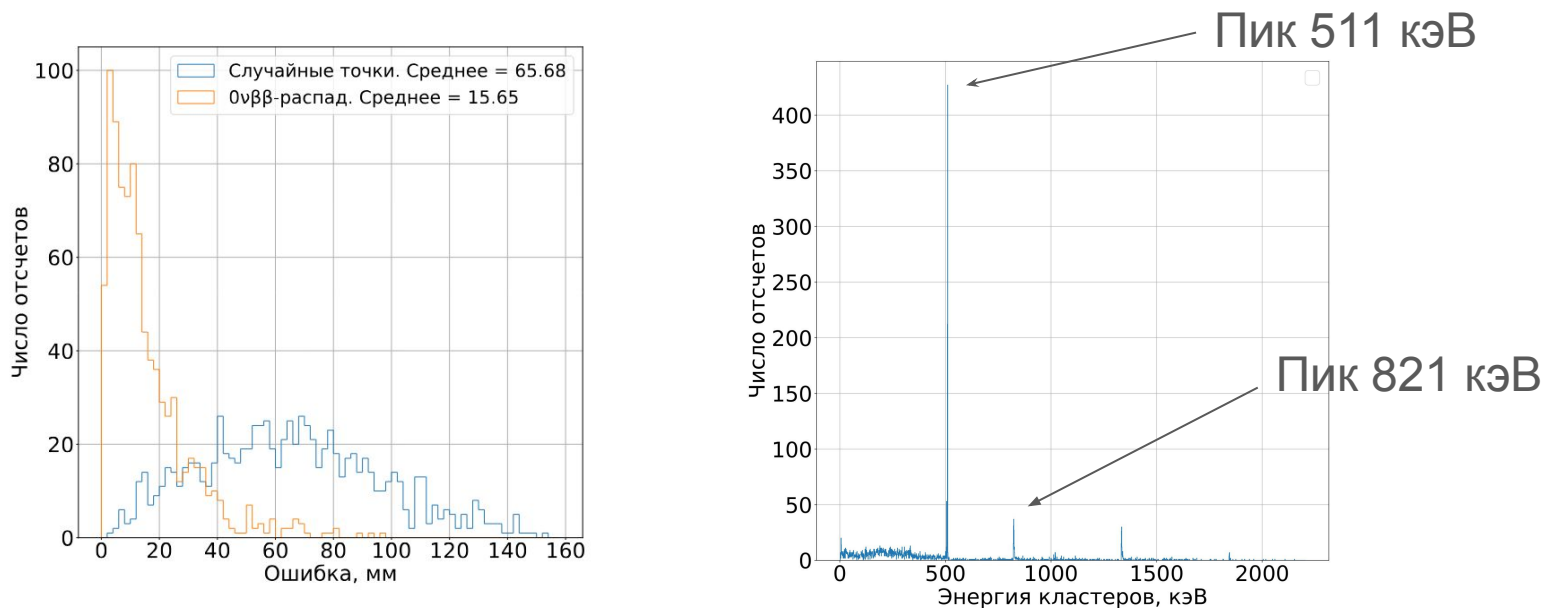
$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-$$



Уникальная геометрия двойного безнейтринного позитронного бета-распада (ДБПБР) на ядрах ^{124}Xe : пять энергетических кластеров на одной плоскости внутри сферы радиуса <15 см



Двойной безнейтринный бета-распад

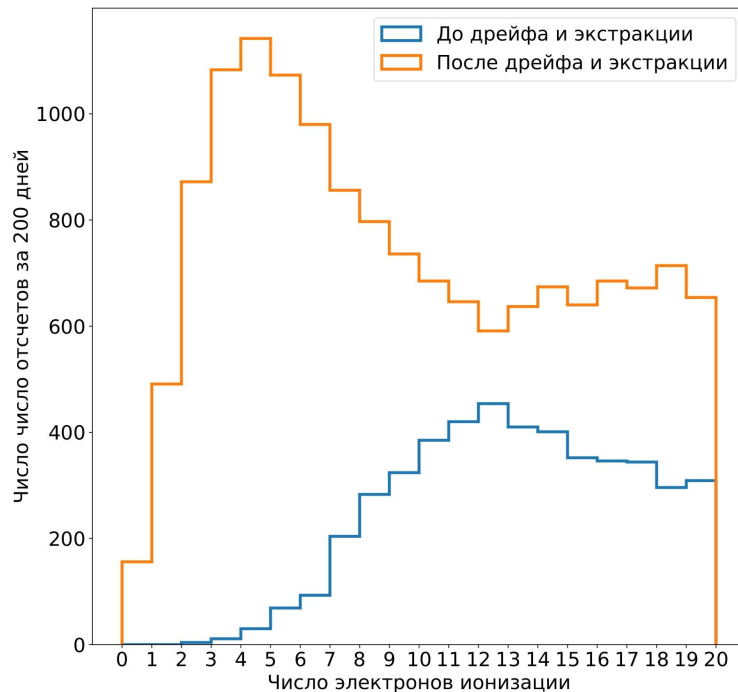


Сравнение геометрического распределения кластеров в 30000 событиях ДБПБР и случайно-сгенерированных энерговыделений в сфере радиуса 15 см (слева), распределение энергий кластеров в событии (справа)

Магнитный момент нейтрино

Также обсуждалась постановка ограничения на величину магнитного момента нейтрино

С использованием величины магнитного момента нейтрино $10^{-10}\mu_B$ был смоделирован спектр электронов отдачи в ксеноне. Далее, с использованием алгоритма моделирования дрейфа и экстракции был получен спектр в электронах ионизации после дрейфа и экстракции. В дальнейшем полученный результат позволит оценить чувствительность детектора к магнитному моменту



Заключение

- Изучены процедуры моделирования событий в двухфазном эмиссионном детекторе РЭД-100 (как на ксеноне, так и на аргоне).
- В модели РЭД-100 в GEANT-4 произведена замена рабочего вещества на аргон.
- Произведена модификация процедуры кластеризации соответствующая замене рабочего вещества
- Проведено моделирование энерговыделений от внешних гамма-фонов в детекторе РЭД-100; на основе полученных результатов сделаны выводы о необходимости модификации внешней пассивной защиты и критериев отбора, при условии исследования области энергий больше 7 электронов ионизации.
- Произведен обзор литературы на тему экспериментальных исследований нестандартных взаимодействий нейтрино.
- Произведено GEANT-4 моделирование процесса двойного позитронного безнейтринного бета-распада и электрон-нейтринного рассеяния по электромагнитному каналу в детекторе РЭД-100.

Спасибо за внимание

Дополнительные слайды

Замечание Рецензента номер 1-2

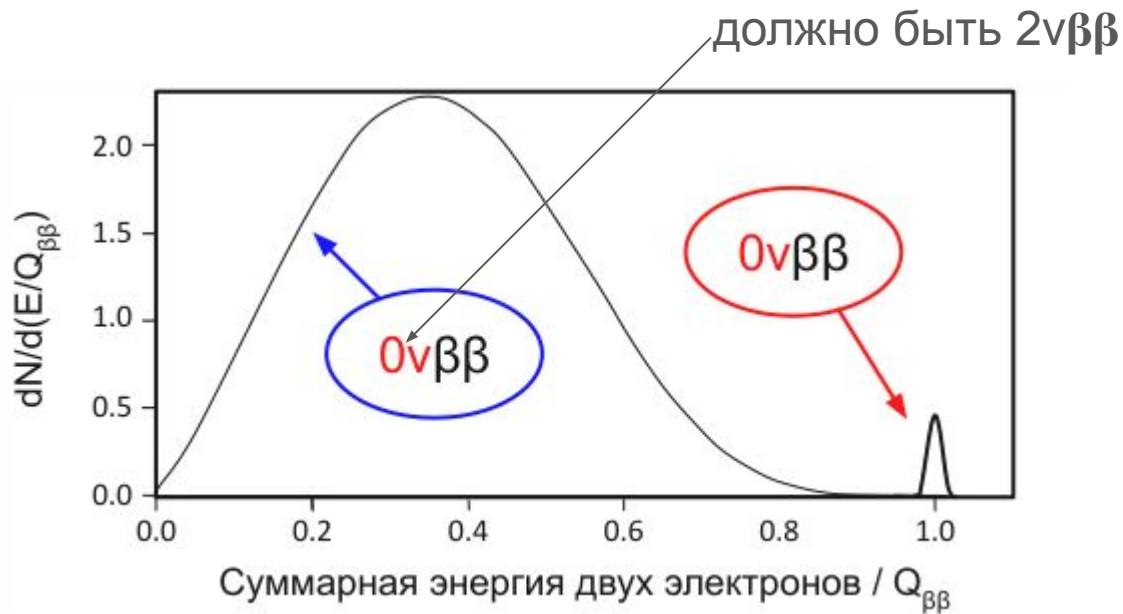


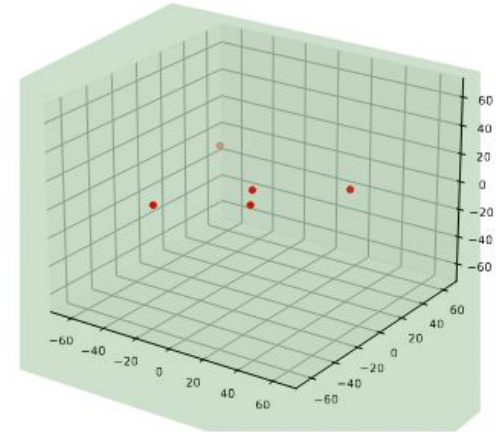
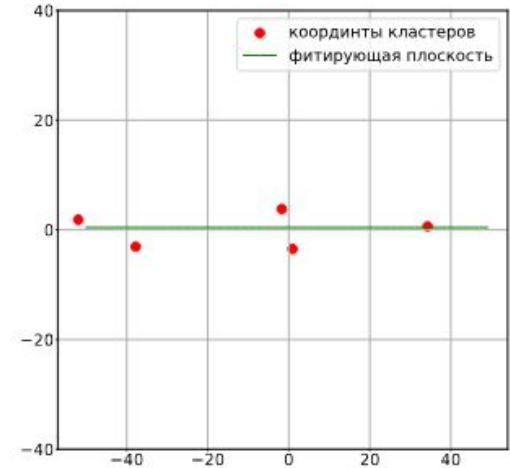
Рисунок 12 – Распределение событий $2\nu\beta\beta$ и $0\nu\beta\beta$ - распадов по суммарной энергии электронов в событии ($Q_{\beta\beta} \sim 2-3$ МэВ)

Замечание Рецензента номер 3

На самом деле функционал этого Монте-Карло моделирования используется в работе, например для построения графика на слайде 13 слева:

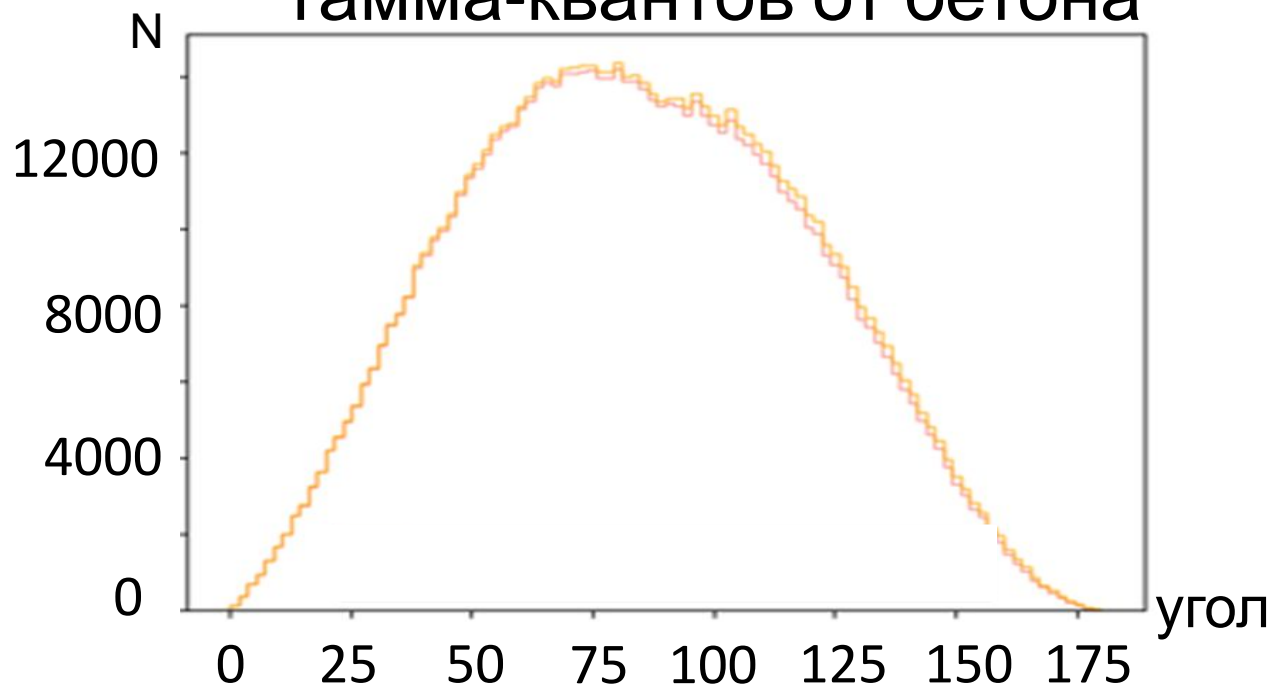
Для моделирования геометрии ДБПБР была написана программа со следующим функционалом:

- генерация пяти точек (координат центров кластеров) на двух пересекающихся прямых
- размытие координат
- фитирование плоскостью
- проверка точности



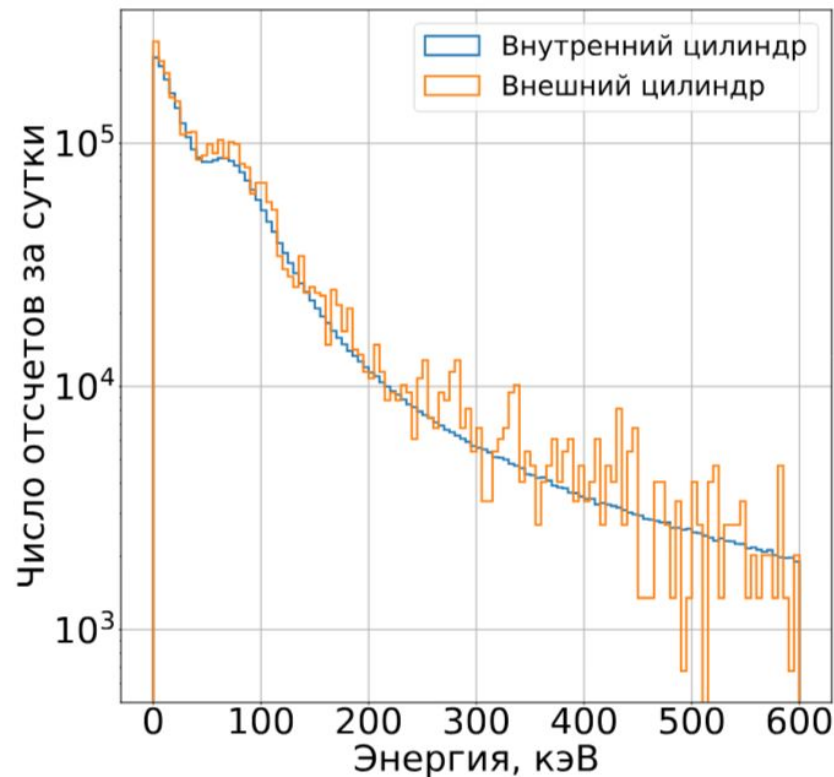
Внутренний и внешний цилиндры

Угловое распределения
гамма-квантов от бетона



Внутренний и внешний цилиндры

Сравнение фоновых энергетических спектров от бетона (они совпадают)



Магнитный момент нейтрино. Теория

Нейтрино, двигаясь в электромагнитном поле в некоторый момент времени t распадается на виртуальные W^+ - бозон и электрон, взаимно поглощающиеся в t' . Одно из слагаемых в действительной части образованных таким механизмом поправок к энергии нейтрино можно интерпретировать как энергию взаимодействия магнитного момента нейтрино μ_ν с внешним магнитным полем H .

