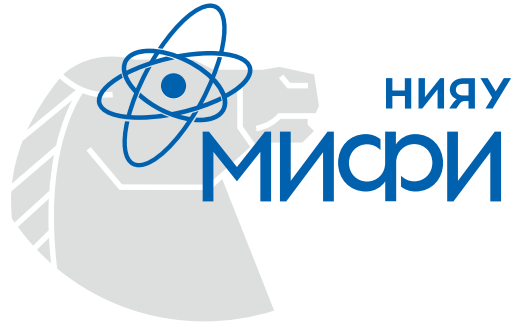


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Институт ядерной физики и технологий

Кафедра № 11 «Экспериментальные методы ядерной физики»

Расчет спектров антинейтрино делящихся изотопов методом суммирования спектров отдельных осколков с весами.

Студент группы : М24-111 - Паинг П. К.

Научный руководитель - доц.Синев В. В.

д.ф.-м.н., в.н.с. ИЯИ РАН

Актуальность и цель работы



Реакторные антинейтрино используются:

- в исследованиях нейтринных осцилляций
- для мониторинга ядерных реакторов

Проблема

Эксперименты Daya Bay, RENO и Double Chooz обнаружили отклонение спектра в области ~ 5 МэВ («5 МэВ аномалия»)

Цель: Разработать программный комплекс для расчёта антинейтринных спектров методом суммирования на основе ядерных данных.

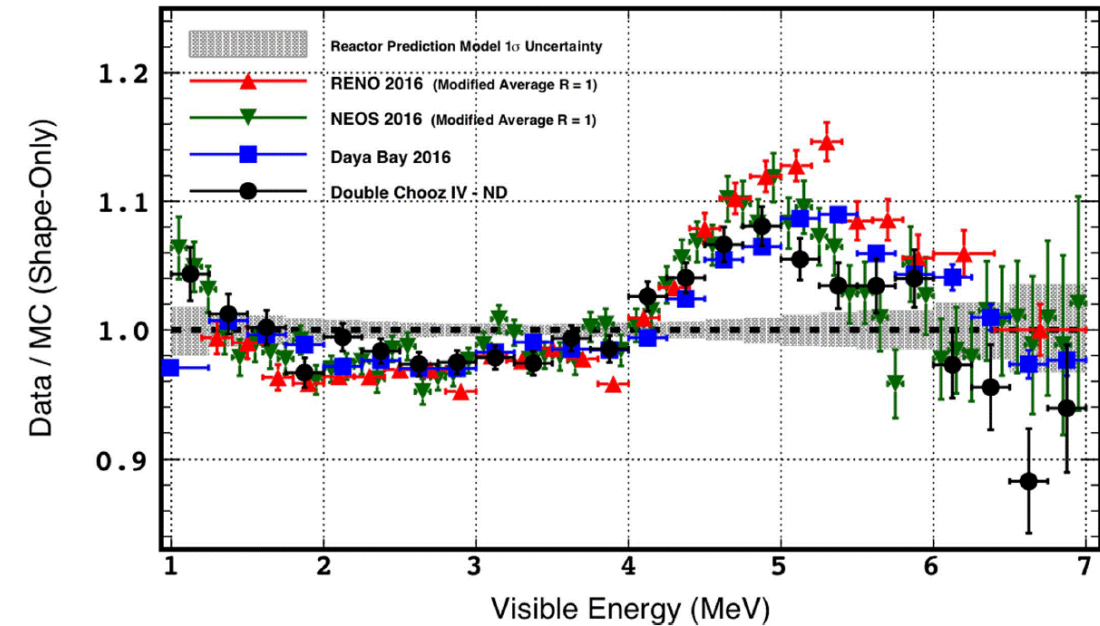


Рис1. Отклонения от предсказаний Хубера–Мюллера в спектрах антинейтрино по данным четырёх реакторных экспериментов.

Метод суммирования



Основное уравнение:

$$S(E, t) = \sum_i Y_i \cdot f_i(t) \sum_k b_{ik} \cdot S_{ik}(E)$$

Y_i – Независимые
выхода

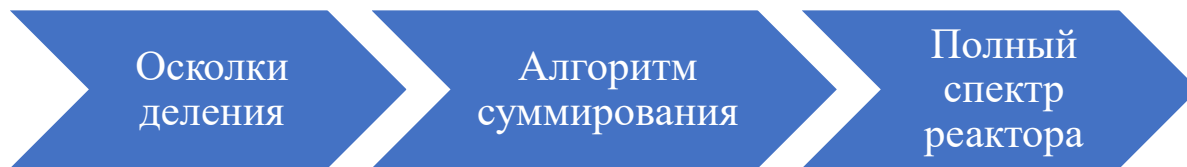
b_{ik} – Коэффициенты
ветвления

$f_i(t)$ – Коэффициент
накопления

$S_{ik}(E)$ – Индивидуальные
спектры

Преимущества

Прямой расчет без подгоночных параметров и анализ вклада отдельных изотопов.



Точность метода напрямую зависит от качества данных . 3

Подготовка ядерных данных



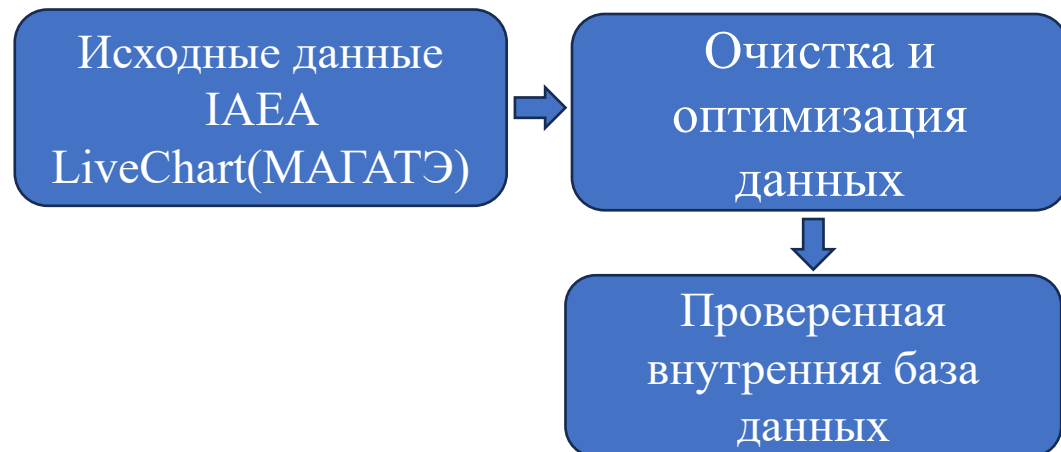
Исходные данные

Источник: IAEA LiveChart (МАГАТЭ)

Содержит: множество изотопов и ветвей распада

Проблемы:

- данные не нормированы
- разные единицы измерения
- отсутствуют некоторые Q-значения



Блок-схема очистки данных

Алгоритм очистки

- **Нормировка**
→ сумма вероятностей ветвления = 1
- **Преобразование единиц**
→ период полураспада ($T_{1/2}$) → секунды
→ Q-значения → МэВ
- **Фильтрация**
→ удаление неполных и нефизических данных

Итоговая база данных

- Готова для использования в C++ / ROOT
- Единый формат данных
- Меньше ошибок, выше точность

На основе этой проверенной базы был разработан программный комплекс .

Программный комплекс и его блок-схема



Язык: C++ (высокая производительность)



Библиотека: ROOT (CERN) для визуализации и анализа данных



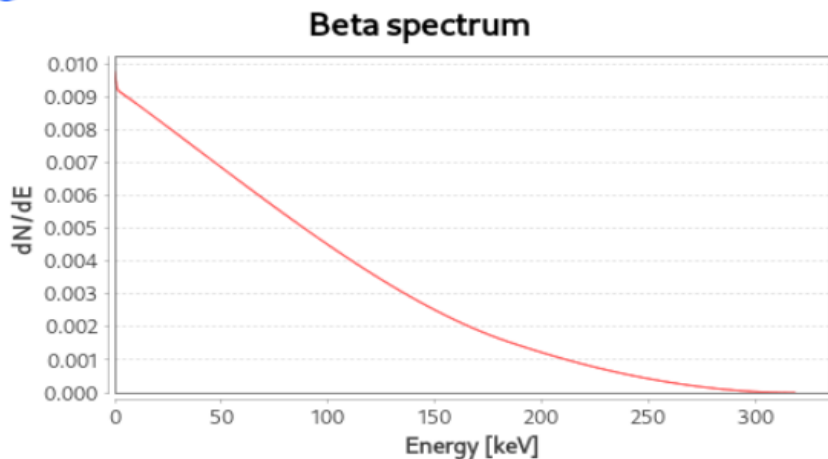
Блок-схема программы

- **Модульная архитектура:** легкое добавление новых изотопов и новых модулей.
- **Численная устойчивость:** точный расчет функции Ферми.
- **Обработка ошибок:** логирование пропущенных переходов.

Любой расчет требует проверки .

Верификация на цепочке $^{144}\text{Ce} \rightarrow ^{144}\text{Pr}$

Large plot with each transition



Large plot with each transition

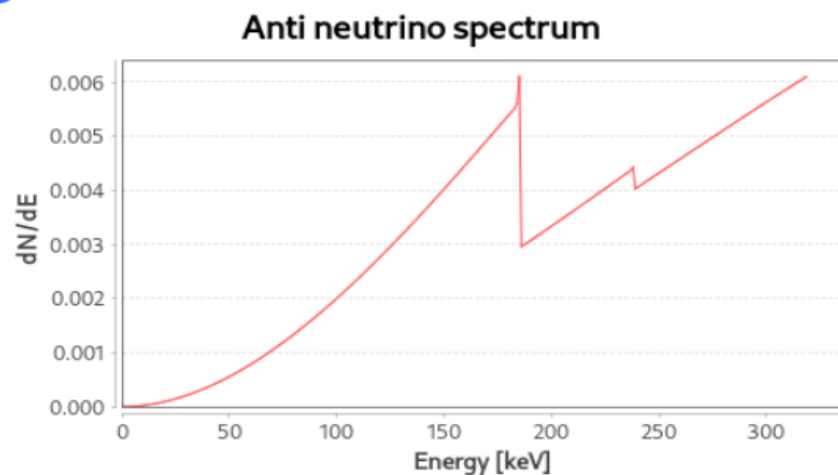


Рис 2. Данные МАГАТЭ

Calculated Energy Spectra of Ce144

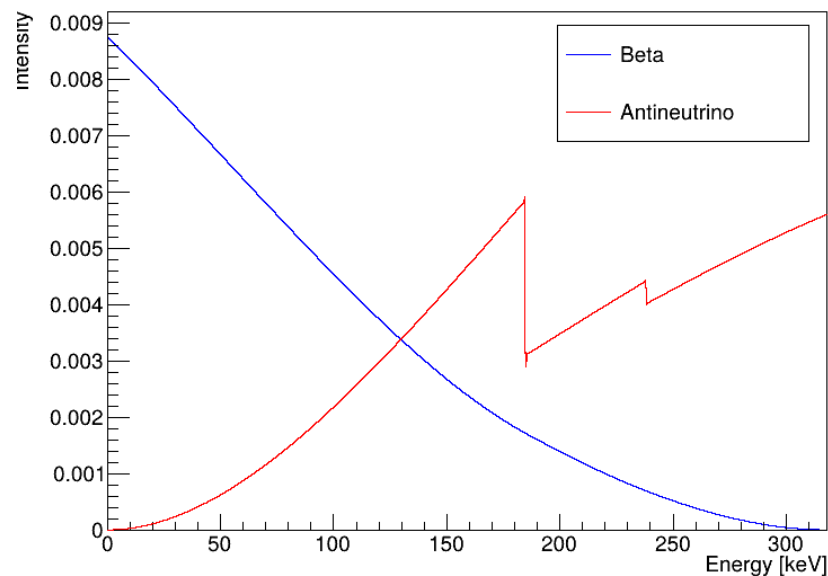


Рис 3. Наш расчет

Тестовая задача

Выбрана цепочка с хорошо известной схемой распада для проверки точности алгоритма.

Результаты сравнения:

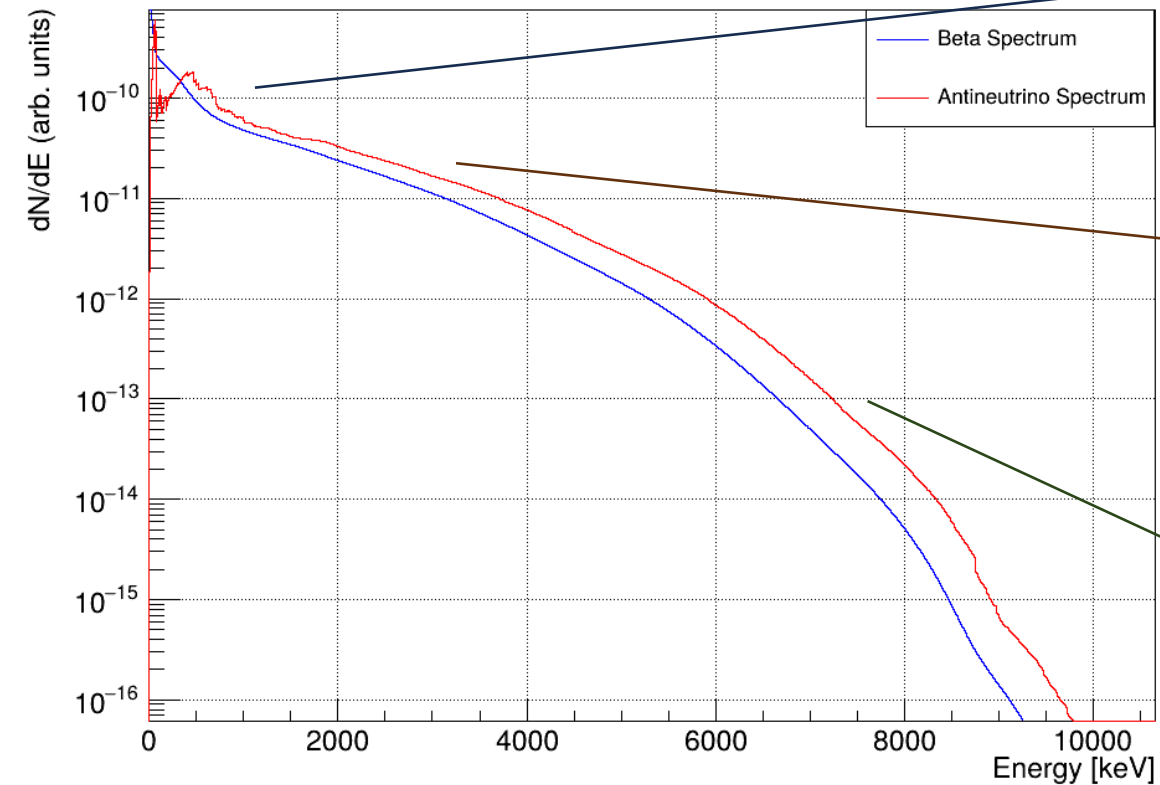
Отклонение $< 3\%$ во всем диапазоне.

При $E > 5 \text{ МэВ}$ отклонение $< 1.5\%$.

Одиночная цепочка не отражает всей сложности реакторного спектра .

Физическая структура суммарного спектра

Summed Beta and Antineutrino Spectra



1. Низкая энергия: «Порог IBD (1,8 МэВ)»

Физический предел регистрации. Антинейтрино ниже этой энергии не вызывают реакцию обратного бета-распада.

2. Пиковое значение: "Максимальная интенсивность (2-4 МэВ)"

Область максимального выхода антинейтрино, наиболее важная для прикладных задач мониторинга.

3. Хвостовая часть: «Короткоживущие изотопы (>6 МэВ)»

Формируется редкими короткоживущими изотопами с высокими энергиями распада (Q-значениями).

Рис 4. Общий спектр всех изотопов с массовыми числами от 1 до 191.

Может показаться, что гладкость спектра возникает искусственно. Однако на примере отдельной цепочки показано, что это естественный физический эффект.

Формирование формы спектра ветвей β -распада в цепочке

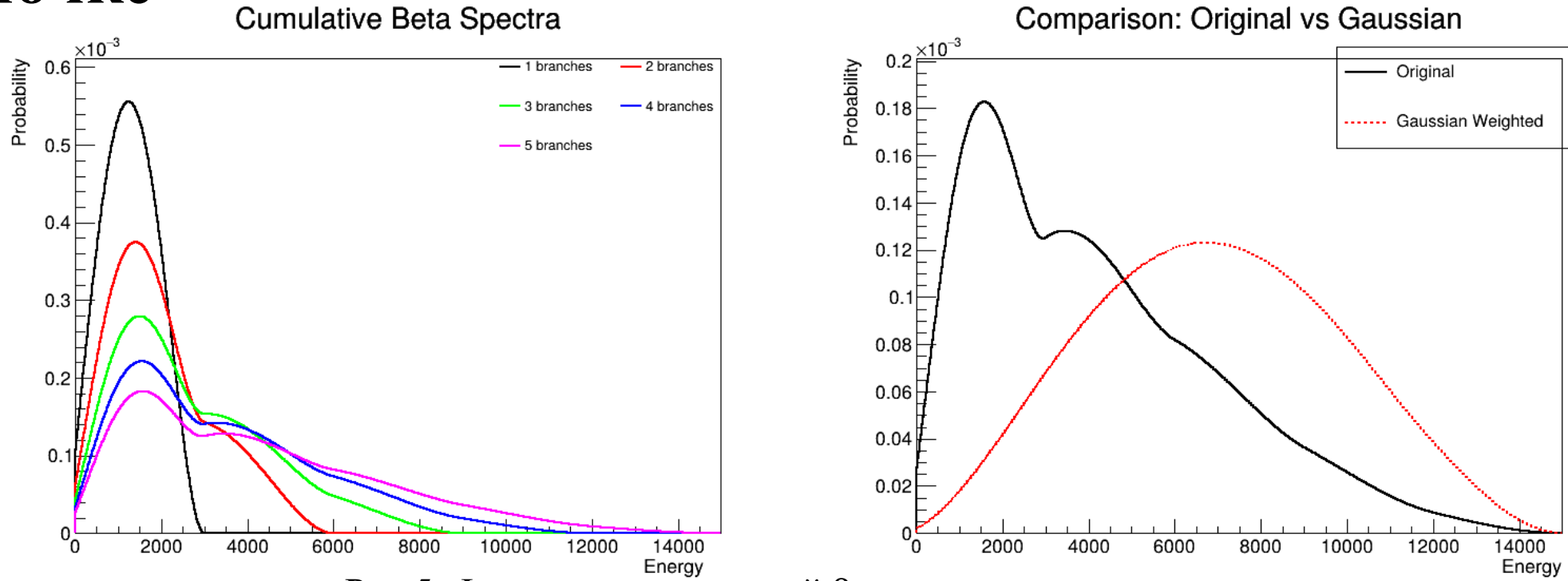


Рис 5. Формы спектра ветвей β -распада в пример цепочке

В численном эксперименте рассмотрена цепочка пример распада. Показан процесс последовательного добавления 1, 2, 3, 4 и 5 ветвей распада.

Каждая новая ветвь имеет свою граничную энергию и заполняет энергетические «пробелы». В результате спектр становится более широким.

Плавная форма спектра возникает естественно как результат сложения большого числа переходов. Дополнительное искусственное сглаживание не требуется.

Форма спектра также меняется со временем. 8

Мониторинг выгорания топлива

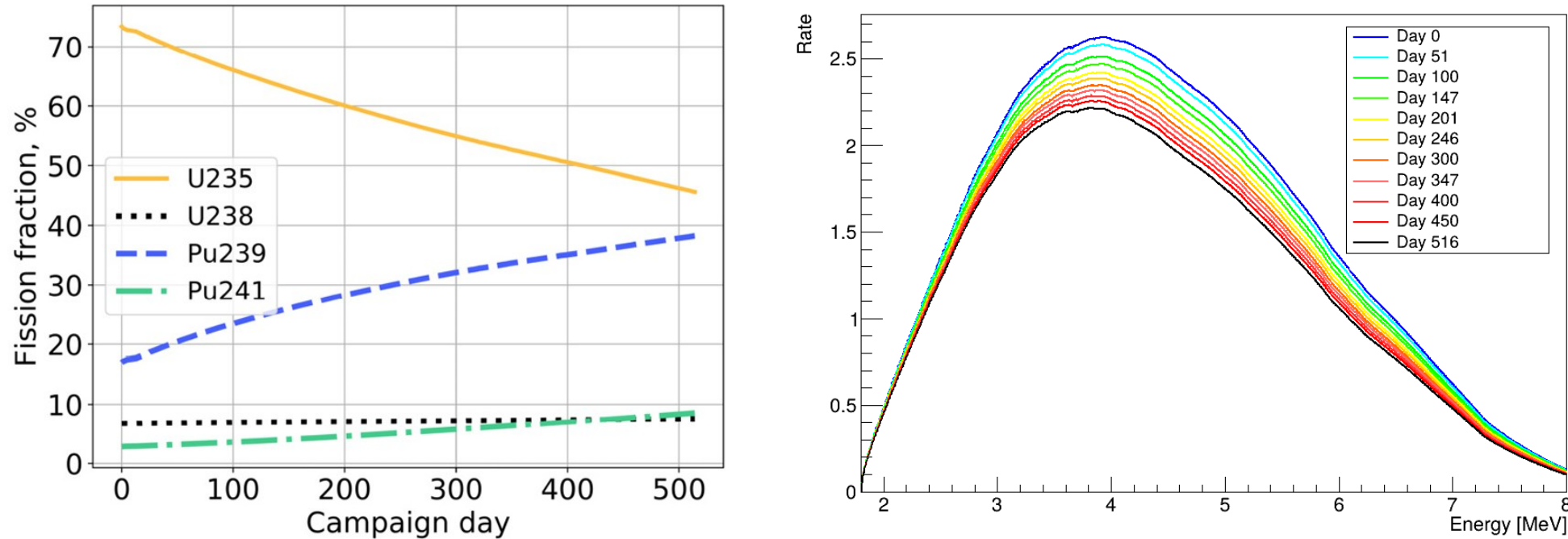


Рис 6. Эволюция состава топлива(лева) и его наблюдаемого спектра(права)

Эволюция состава (Лева): Состав топлива изменяется в течение 516 дней в результате работы реактора.

Эффект выгорания (Права): Накопление плутония приводит к «смягчению» спектра. Это проявляется в его смещении и снижении интенсивности сигнала.

Расчёт выполняется с использованием эффективного сечения $\sigma_{eff}(t) = \int S_{tot}(E_\nu, t) \sigma_{IBD}(E_\nu) dE_\nu$, которое определяется как интеграл по энергии нейтрино. Это позволяет отслеживать состояние активной зоны реактора в реальном времени.

Личный вклад и основные результаты



Разработка ПО

Создан модульный комплекс на C++/ROOT с подтвержденной численной устойчивостью выше **0,1%**.

Верификация

Точность модели подтверждена на цепочке $^{144}\text{Ce} \rightarrow ^{144}\text{Pr}$: общее отклонение **< 3%** (и **< 1,5%** в области $>5\text{MeV}$).

Работа с данными

Автоматизирована очистка и **нормировка** ($\sum b_{ik}=1$) тысяч β -ветвей из базы данных **IAEA LiveChart**.

Результаты

Получены высокоразрешающие суммарные спектры, практическое применение мониторинга реактора на основе данных за 516 дней работы реактора, проведена реконструкция спектров антинейтрино на основе экспериментальных данных из Daya Bay и Double Chooz.

Постановка задачи и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем (Синевым В.В.)

Ограничения

- Эффект неполнота схем распада.
- Основной источник неопределенности — качество входных данных.

Перспективы

- Учет запрещенных бета-переходов.
- Детальный анализ систематических погрешностей.

Точность спектра ограничена не методом, а входными данными.



НИЯУ
МИРИ

**Спасибо за
внимание!**



Дополнительный слайд

Дополнительный слайд

Образование реакторного антинейтрино в результате бета-распада осколка деления

☼ Антинейтрино образуются в ядерных реакторах при β^- -распаде продуктов деления тяжёлых ядер.

☼ Форма энергетического спектра определяется вкладом большого числа ядерных переходов и чувствительна к используемым ядерным данным.

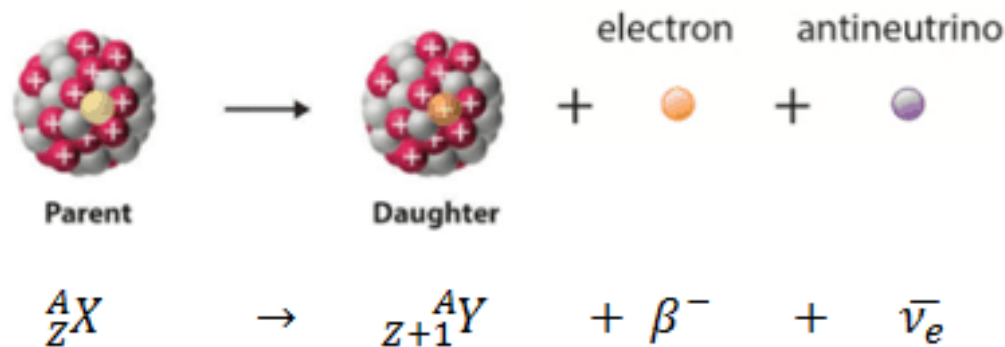


Рис . Образование антинейтрино при β^- -распаде продуктов деления.

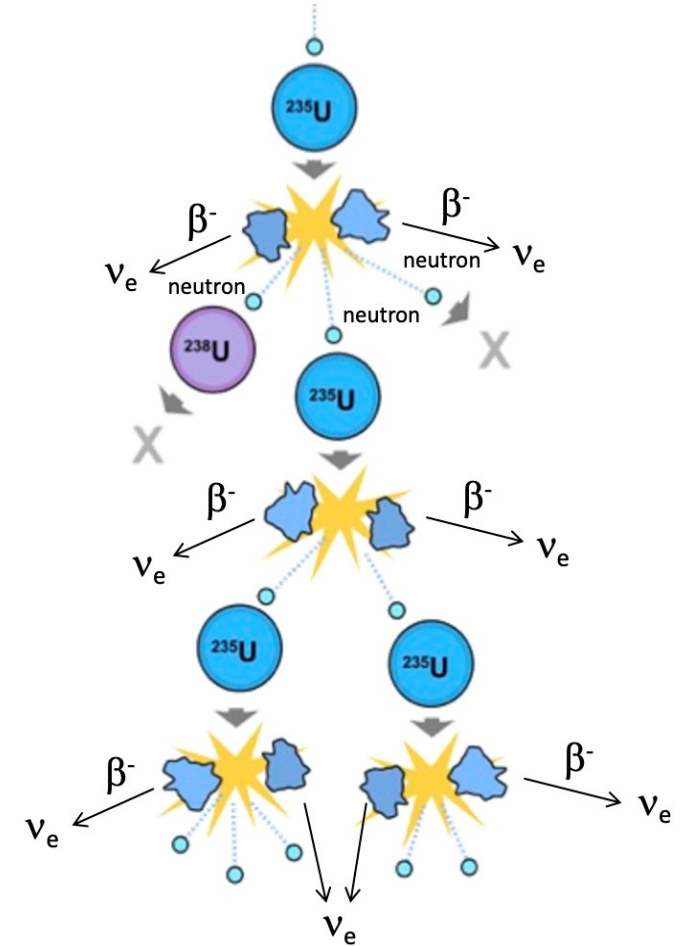
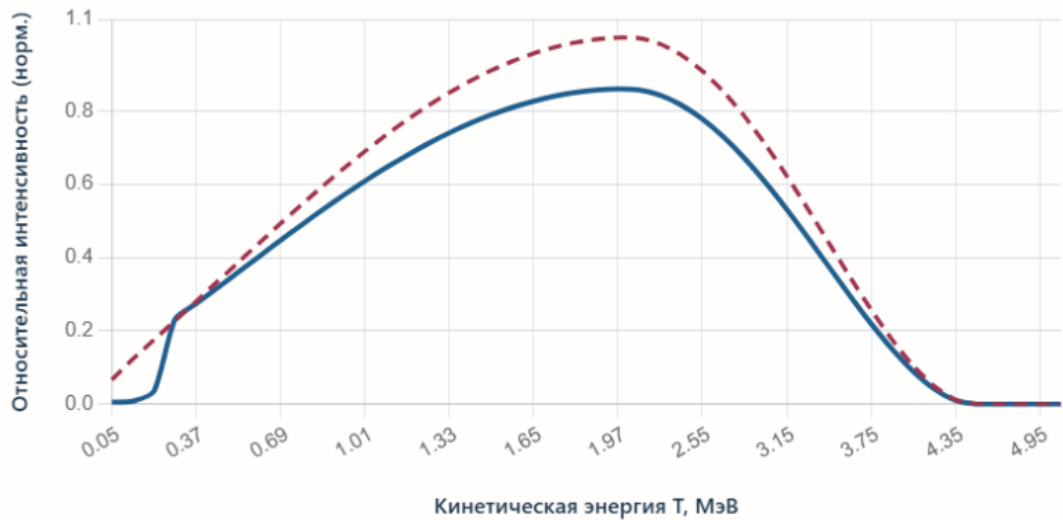


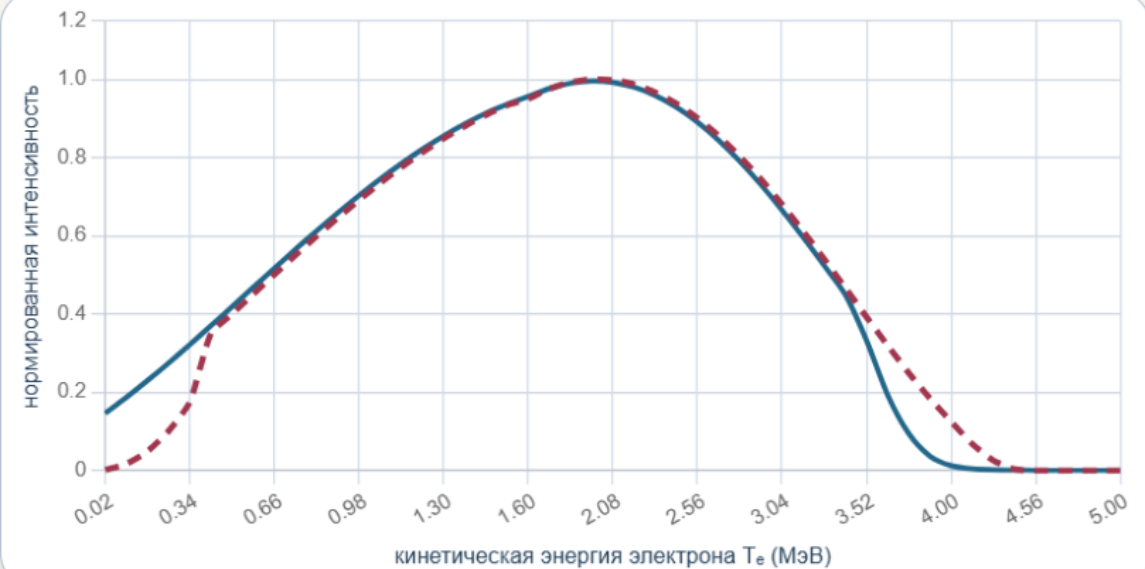
Рис . Схема деления U-235 и последующих β^- -распадов продуктов деления - источников антинейтрино. Каждое деление приводит к цепочке β^- -распадов.

Дополнительный слайд

Влияние функции Ферми на спектр бета и антинейтрино



--- Без функции Ферми (пунктир) — С функцией Ферми (сплошная)



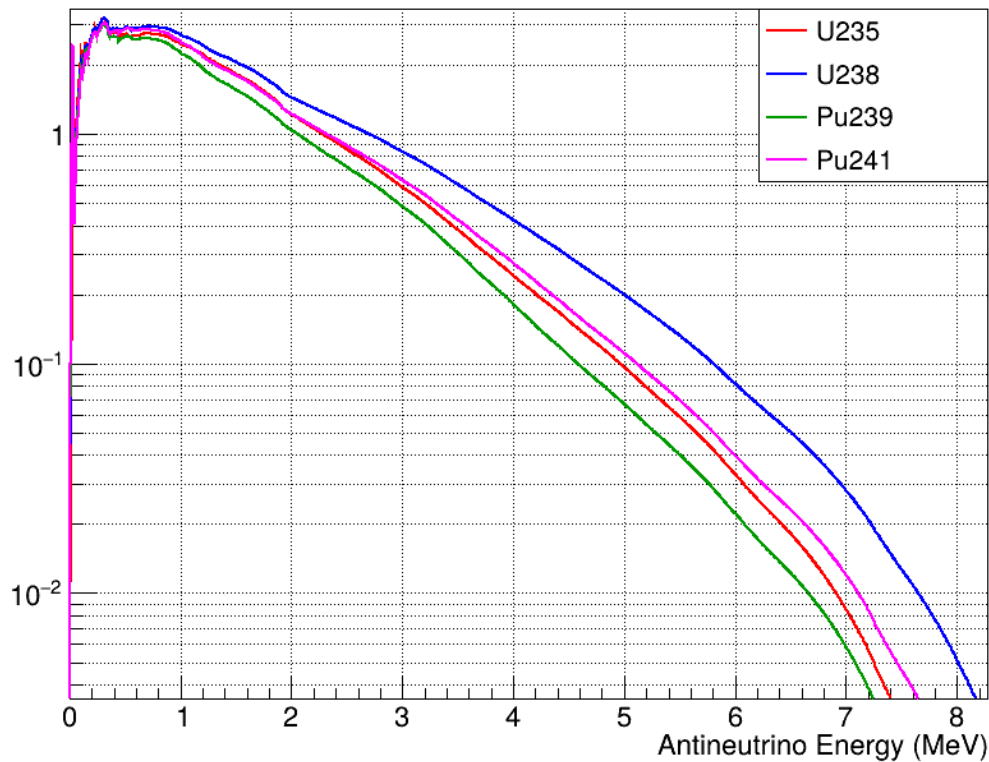
--- β -спектр (электрон, с функцией Ферми, $Z=40$)

— антинейтрино (зеркальное отражение)

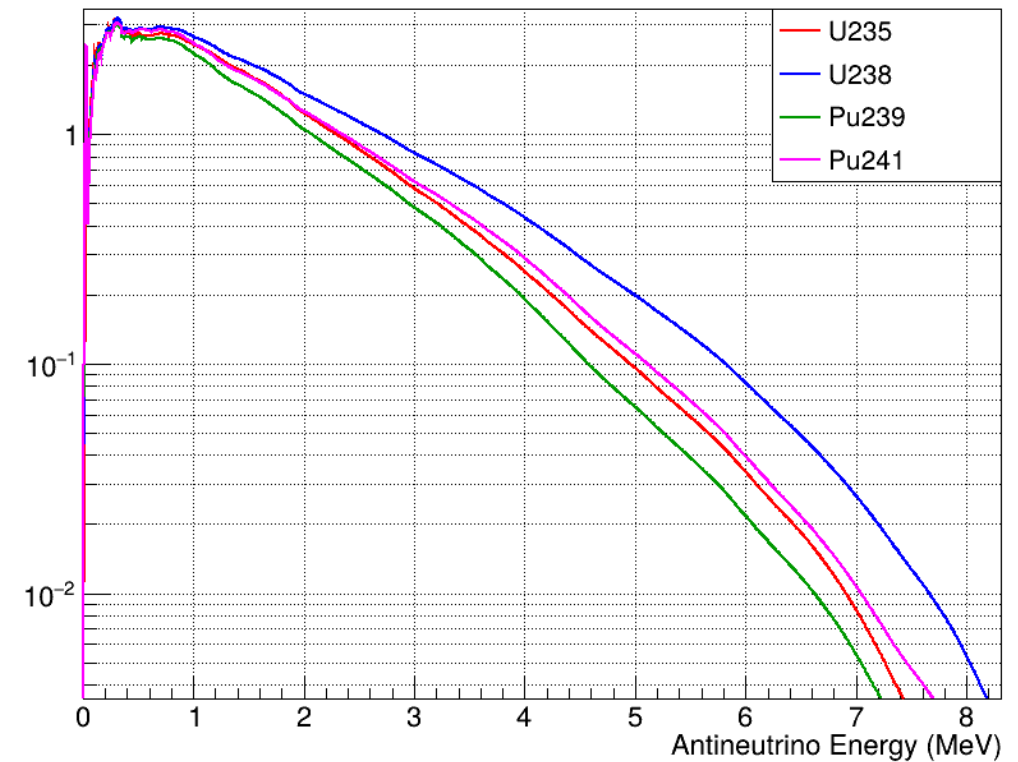
Дополнительный слайд

Реконструкция спектров на основе экспериментальных данных

Antineutrino Spectra from Fissile Isotopes (DoubleChooz)



Antineutrino Spectra from Fissile Isotopes (DayaBay)



Метод реконструкции

- Используются доли деления из экспериментов
- Рассчитываются спектры изотопов

- Выполняется суммирование
- Применяется χ^2 -минимизация