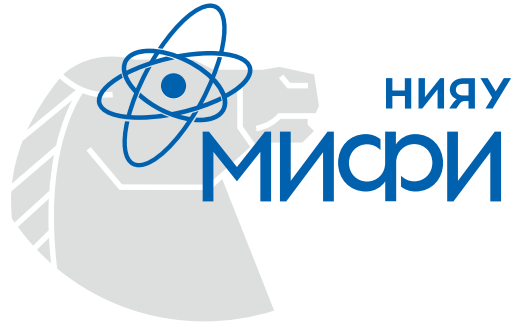


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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 - Синев В. В.

д.ф.-м.н., в.н.с. ИЯИ РАН , доцент МИФИ каф. 11.

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.

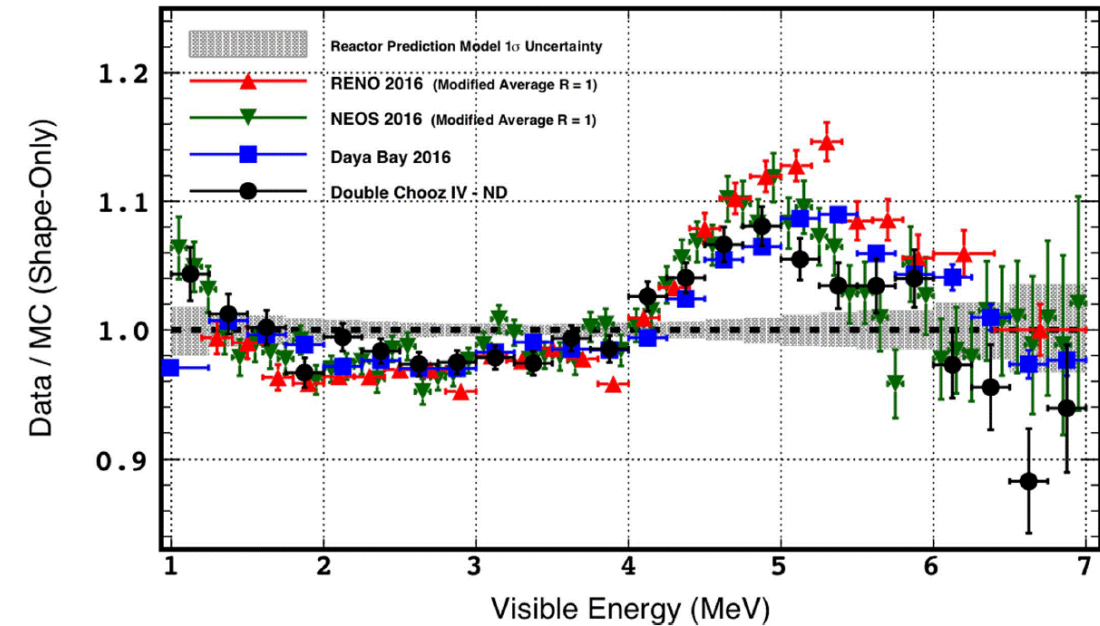


Рис1. Отклонения от предсказаний Хубера–Мюллера в спектрах антинейтрино по данным четырёх реакторных экспериментов.

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 – Кумулятивный
выхода

$f_i(t)$ – Коэффициент
накопления

b_{ik} – Коэффициенты
ветвления

$S_{ik}(E)$ – Индивидуальные
спектры

Преимущества

Прямой расчет без подгоночных параметров и анализ вклада отдельных изотопов.

Осколки
деления

Алгоритм
суммирования

Полный
спектр
реактора

Подготовка ядерных данных



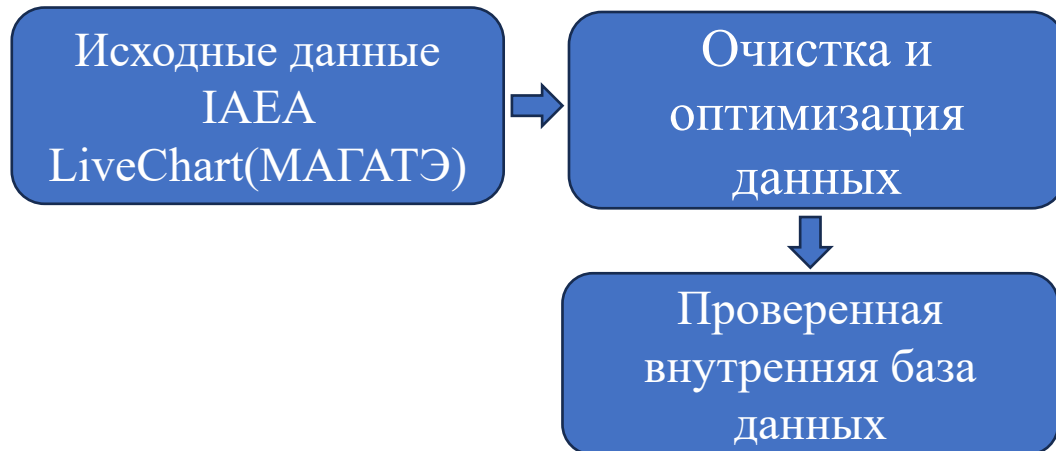
Исходные данные

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

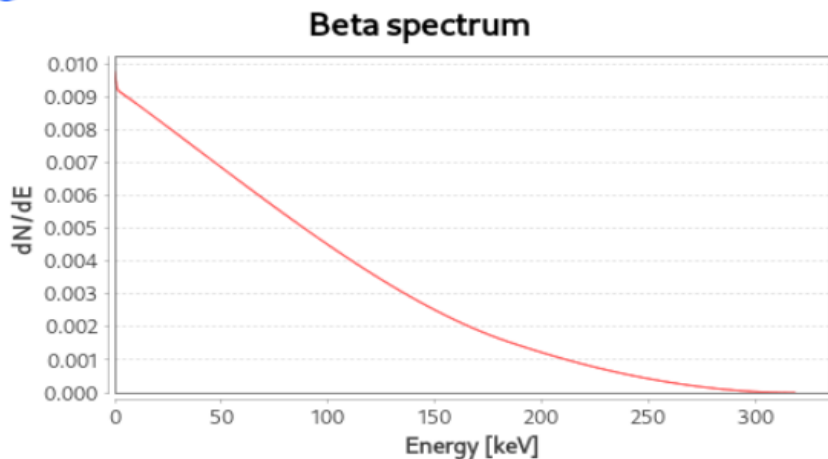


- **Модульная архитектура:** легкое добавление новых изотопов и новых модулей.
- **Численная устойчивость:** точный расчет функции Ферми.
- **Обработка ошибок:** логирование пропущенных переходов.

Блок-схема программы

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

Large plot with each transition



Large plot with each transition

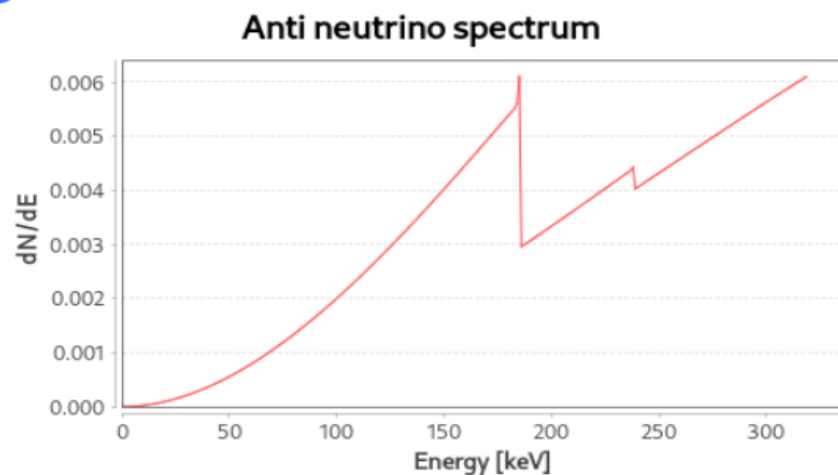


Рис 2. Данные МАГАТЭ

Calculated Energy Spectra of Ce144

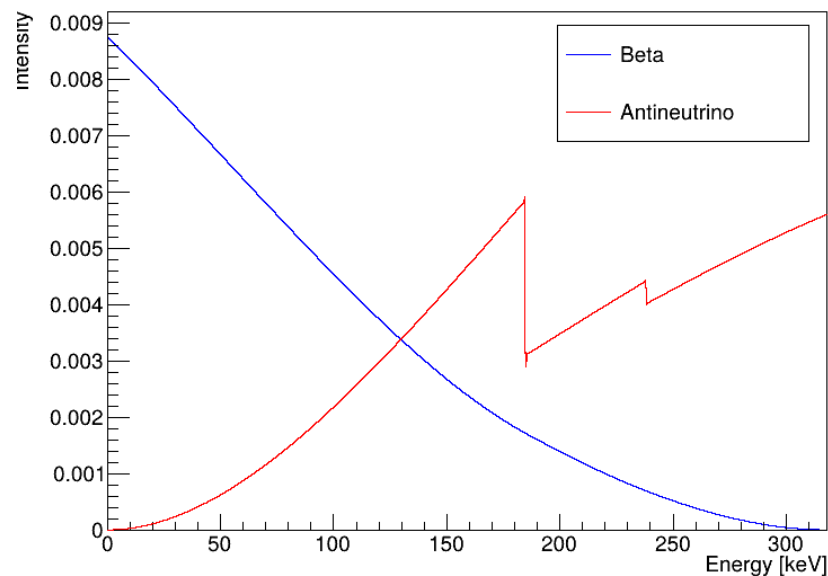


Рис 3. Наш расчет

Результаты сравнения:

Отклонение $< 3\%$ во всем диапазоне.

При $E > 5$ МэВ отклонение $< 1.5\%$.

Тестовая задача

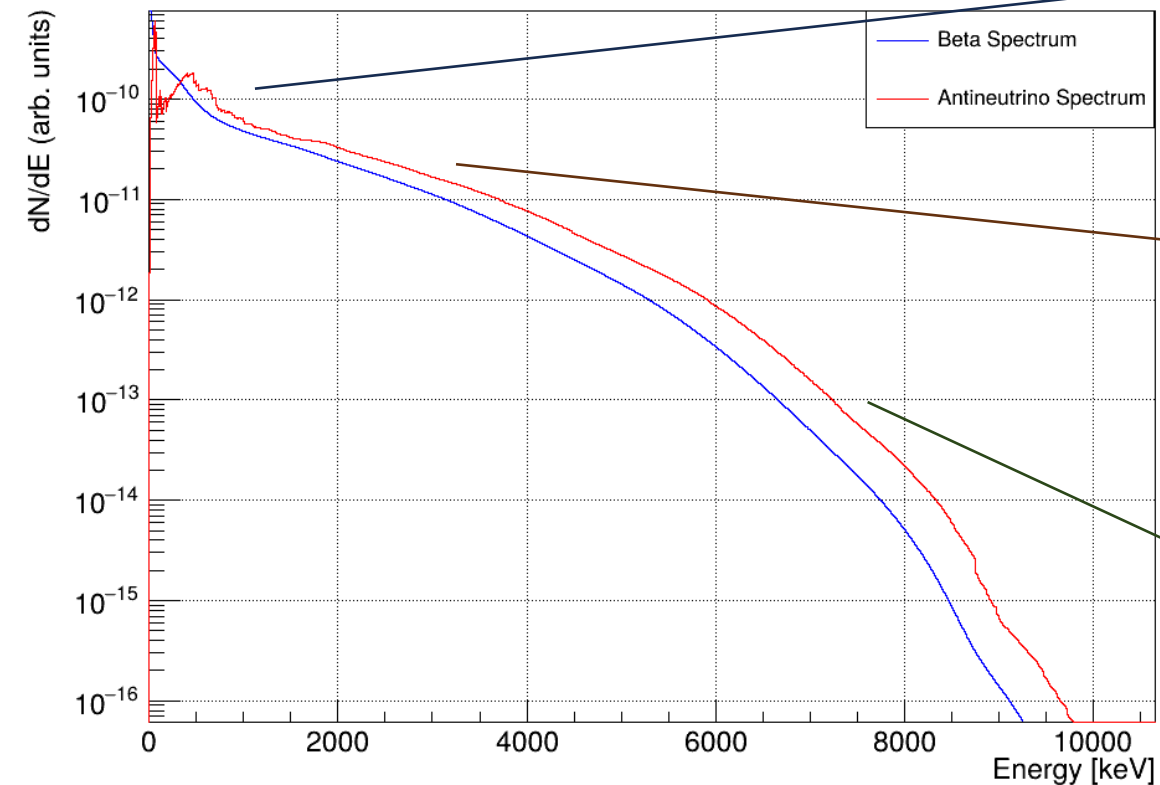
Выбрана цепочка с хорошо известной схемой распада для проверки точности алгоритма.

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

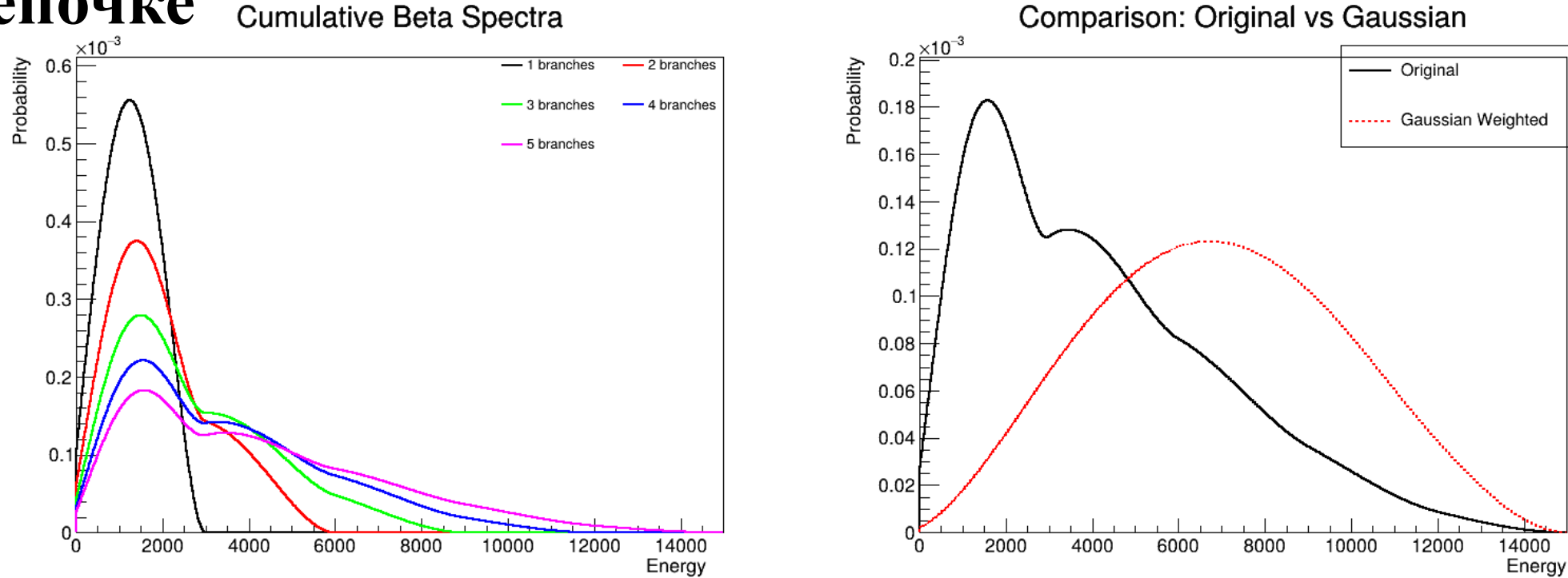


Рис 5. Формы спектра ветвей β -распада в пример цепочке

В численном эксперименте рассмотрена цепочка β -распада с последовательным добавлением 1, 2, 3, 4 и 5 ветвей. Каждая новая ветвь имеет свою граничную энергию и вносит вклад в различные области энергий, что приводит к расширению суммарного спектра. 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

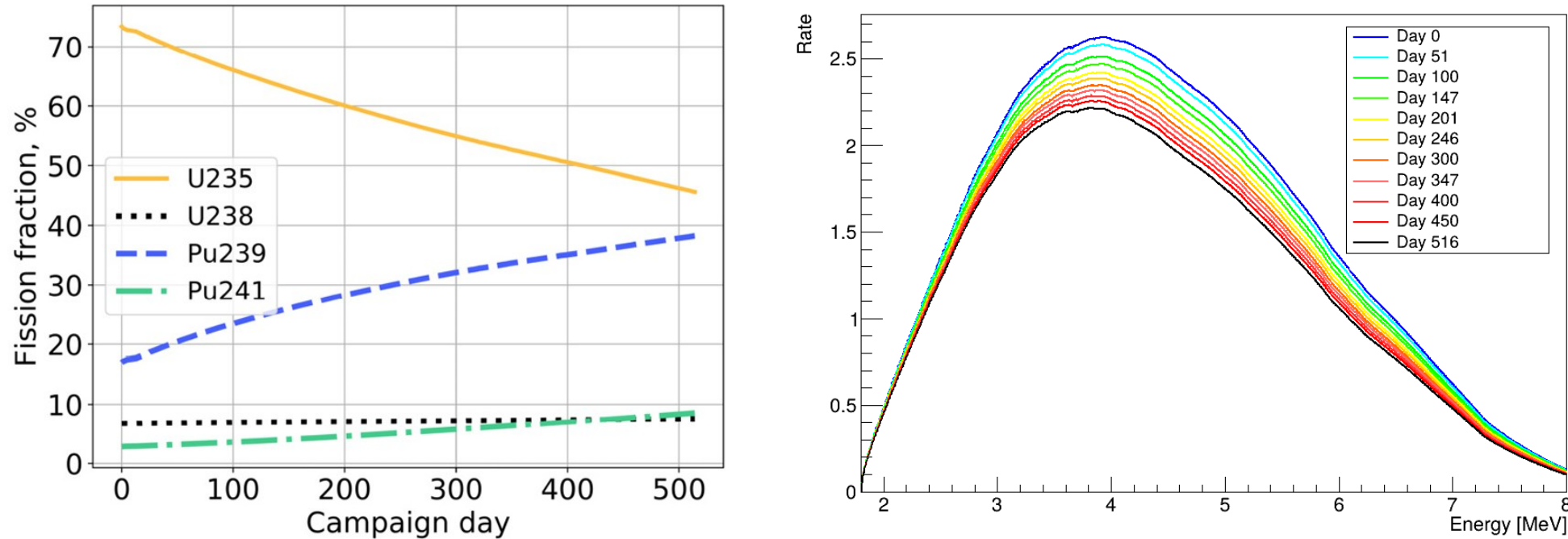


Рис 6. Эволюция состава топлива(лева) и его наблюдаемого спектра(права)

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 >5MeV).

Работа с данными

Автоматизирована очистка и нормировка ($\sum bik=1$) 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.

Ограничения

- Эффект неполнота схем распада.
- Основной источник неопределенности — качество ВХОДНЫХ ДАННЫХ.

Перспективы

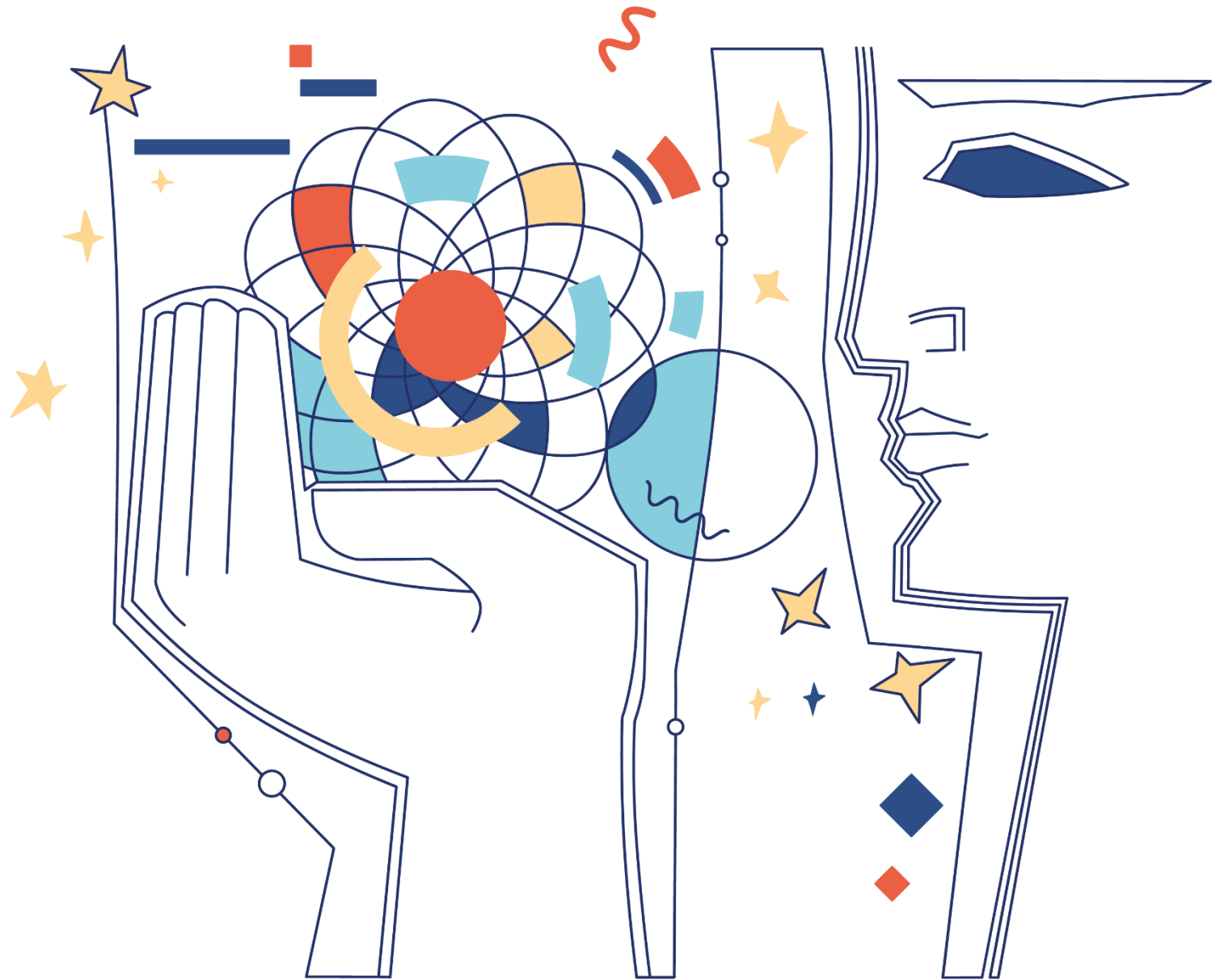
- Учет запрещенных бета-переходов.
- Детальный анализ систематических погрешностей.

Точность спектра ограничена не методом, а входными данными.



НИЯУ
МИФИ

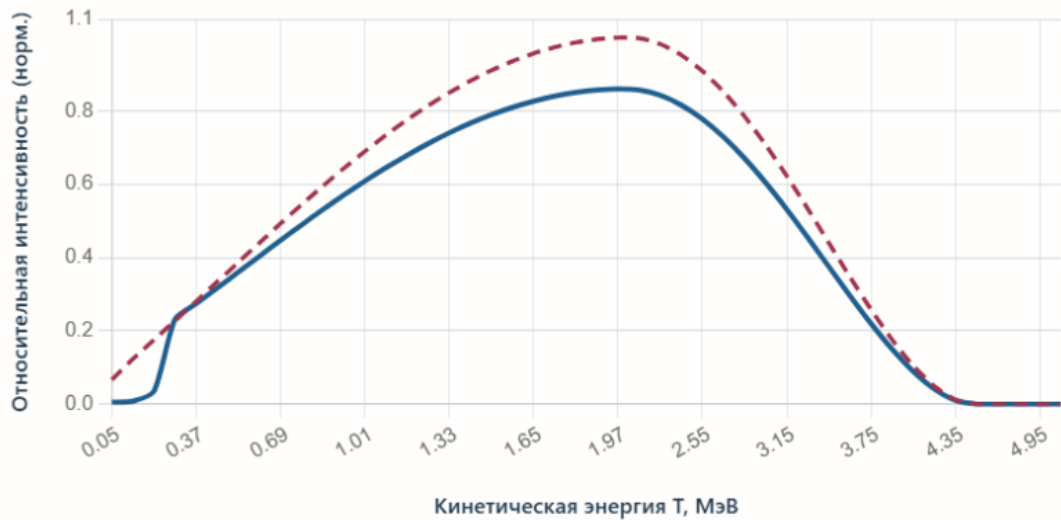
**Спасибо за
внимание!**



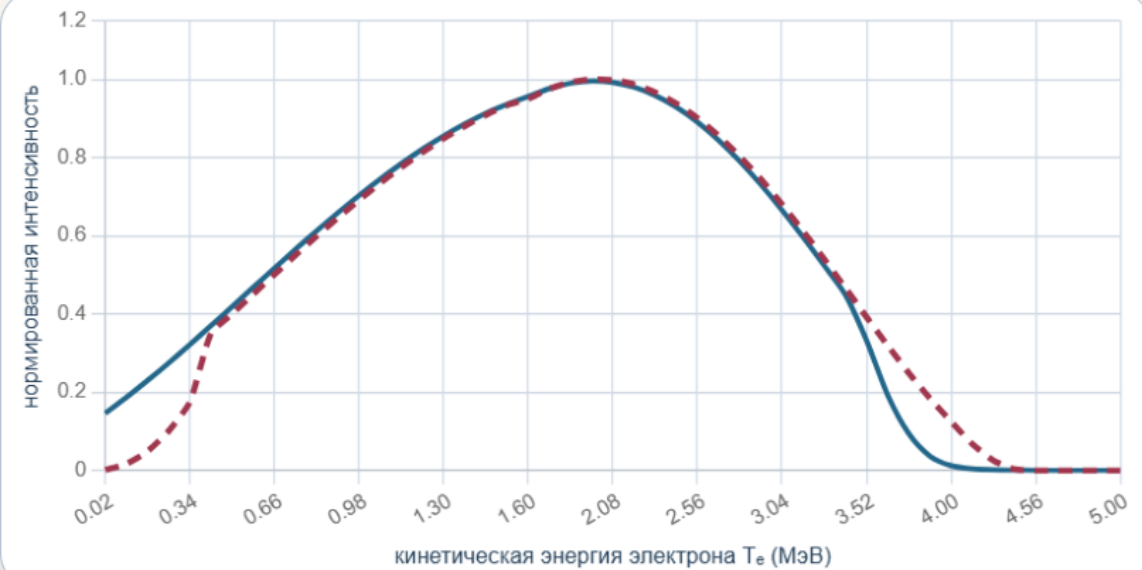
Дополнительный слайд

Дополнительный слайд

Влияние функции Ферми на спектр бета и антинейтрино



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



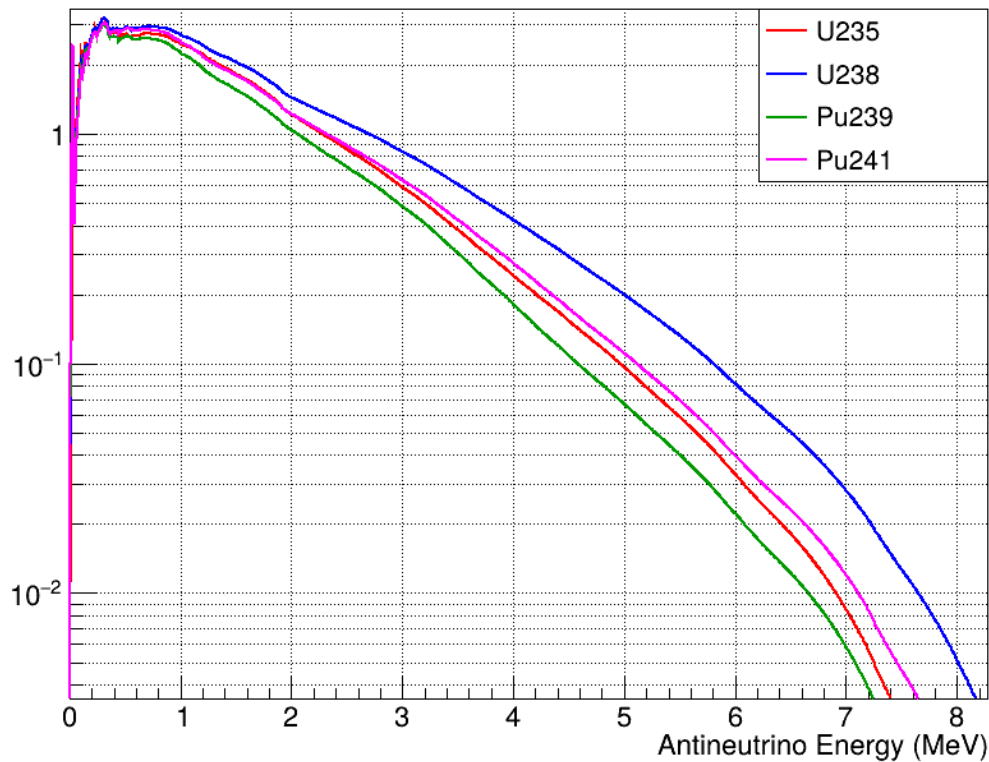
--- β -спектр (электроны, с функцией Ферми, $Z=40$)

— антинейтрино (зеркальное отражение)

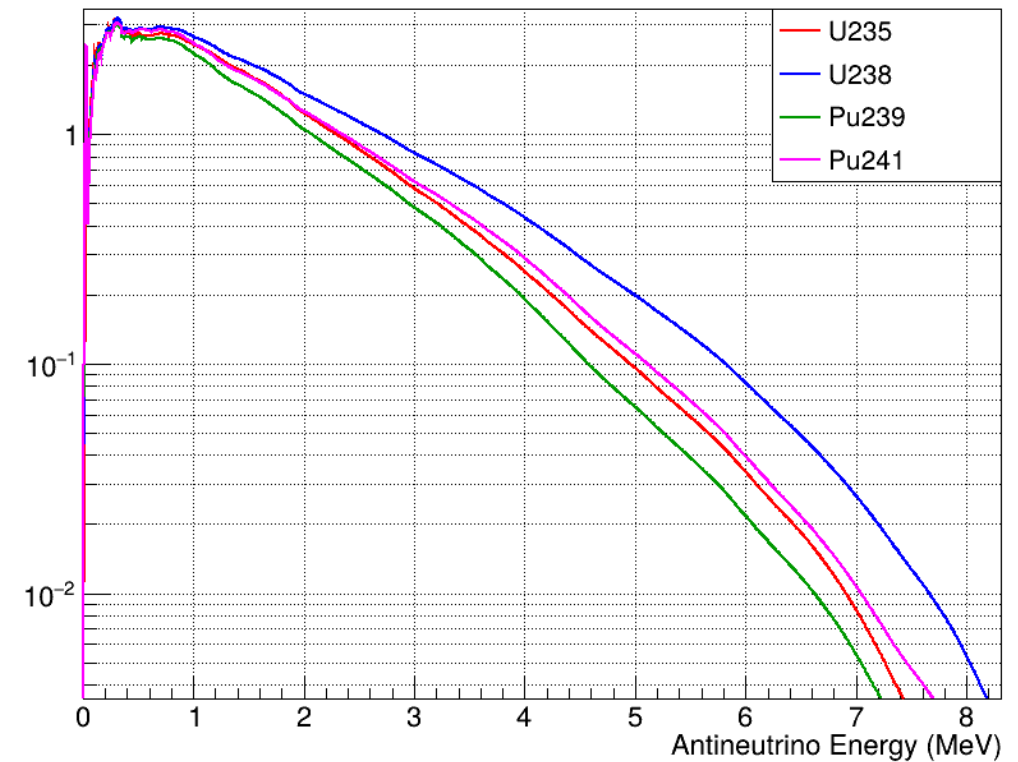
Дополнительный слайд

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