

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Расчет спектров антинейтрино делящихся изотопов с использованием экспериментальных спектров для создания оптимальной базы данных осколков деления


Студент группы М24-111 – **Тейн Тхей Аунг**


Научный руководитель - **доц.Синев В. В.**

д.ф.-м.н., в.н.с. ИЯИ РАН

5/21/2026


- 1** Реакторные антинейтрино
- 2** Расчетный Метод (Метод суммирования)
- 3** Недостатки метода и использование гауссовой функции
- 4** Реализация метода суммирования на языке C++
- 5** Рассчитанные спектры
- 6** Анализ рассчитанных спектров антинейтрино
- 7** Мониторинг выгорания реакторного топлива
- 8** Заключение


 **Актуальность** : Спектры антинейтрино реакторов используются для мониторинга ядерных реакторов и поиска аномалий — различий между теоретическими предсказаниями и экспериментальными измерениями.

 **Цель работы** : Расчет спектров антинейтрино с использованием экспериментальных спектров и применением гауссовой функции для создания оптимальной базы данных осколков деления.

Использование программы на C++ для реализации метода суммирования и анализа соответствия между рассчитанными и экспериментальными спектрами антинейтрино.

Реакторные антинейтрино и метод регистрации

 Реакторные антинейтрино образуются главным образом в результате бета-распада осколков деления — нестабильных атомов.

 Каждое деление производит множество таких осколков, которые затем распадаются, испуская электрон и антинейтрино.

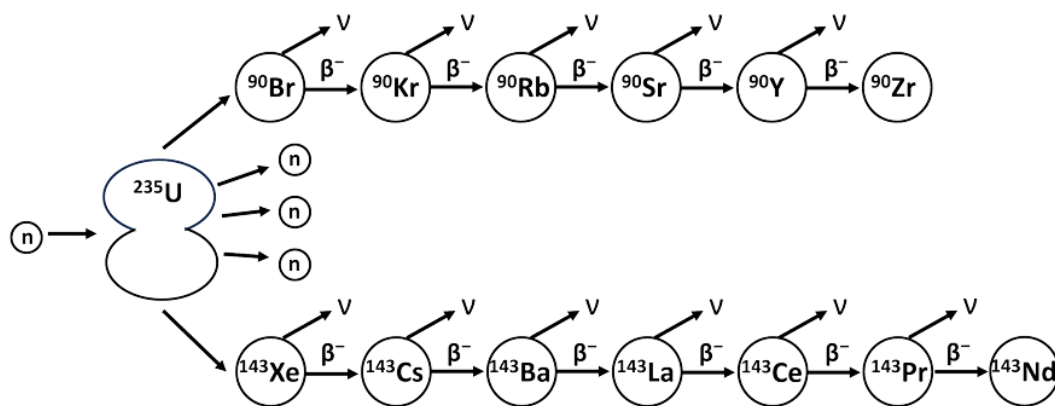

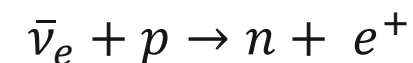


Рис.1: Иллюстрация ядерного деления ^{235}U .

 Для регистрации антинейтрино используется реакция обратного бета-распада (ОБР), которая является наиболее эффективным методом.



Эта реакция имеет энергетический порог — она начинается только при энергии не менее 1,806 МэВ.

Расчетный Метод (Метод суммирования)

Метод расчета спектров антинейтрино основан на использовании баз данных по β -распаду осколков деления, включая энергии переходов, вероятности ветвления и выходы осколков.

Спектр антинейтрино $S(E_\nu)$ осколков деления описывается выражением:

$$S(E_\nu) = \sum_i Y_i(Z, A) \cdot \left[\sum_j b_{i,j} \cdot P(E_\nu, E_0, Z) \right]$$



Где:

$Y_i(Z, A)$ — выход i -го осколка на одно деление.

$b_{i,j}$ — коэффициент ветвления для j -го бета-перехода осколка i . $\sum_j b_{i,j} = 1$

$P(E_\nu, E_0, Z)$ — форма спектра антинейтрино для j -го ветвления.

Недостатки метода и использование гауссовой функции

-  Расчет зависит от полноты базы данных осколков. База данных неполная. Существует три группы данных: известные, оценочные и неизвестные данные.
-  Неполные данные β -распада приближённо описываются с помощью гауссова распределения.

$$f(\mu, Q_\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(\mu - T_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)$$

Где: $\mu = \text{par} \cdot T_0$, $\sigma = 0.1 \cdot \mu$

Средняя энергия μ от энергии конечной точки $T_0 = Q_\beta$ до $T_0 = 2$ МэВ.

μ определяет наиболее вероятную область конечной точки бета-перехода T_0 .

☉ Цезий (^{142}Cs) является примером оцененного ядра далекого от линии бета-стабильности.

☉ Синие линии - экспериментальные данные из базы данных.

☉ Красная кривая - гипотетическое гауссово распределение для неизвестных переходов. Гауссова функция даёт гладкое приближение распределения.

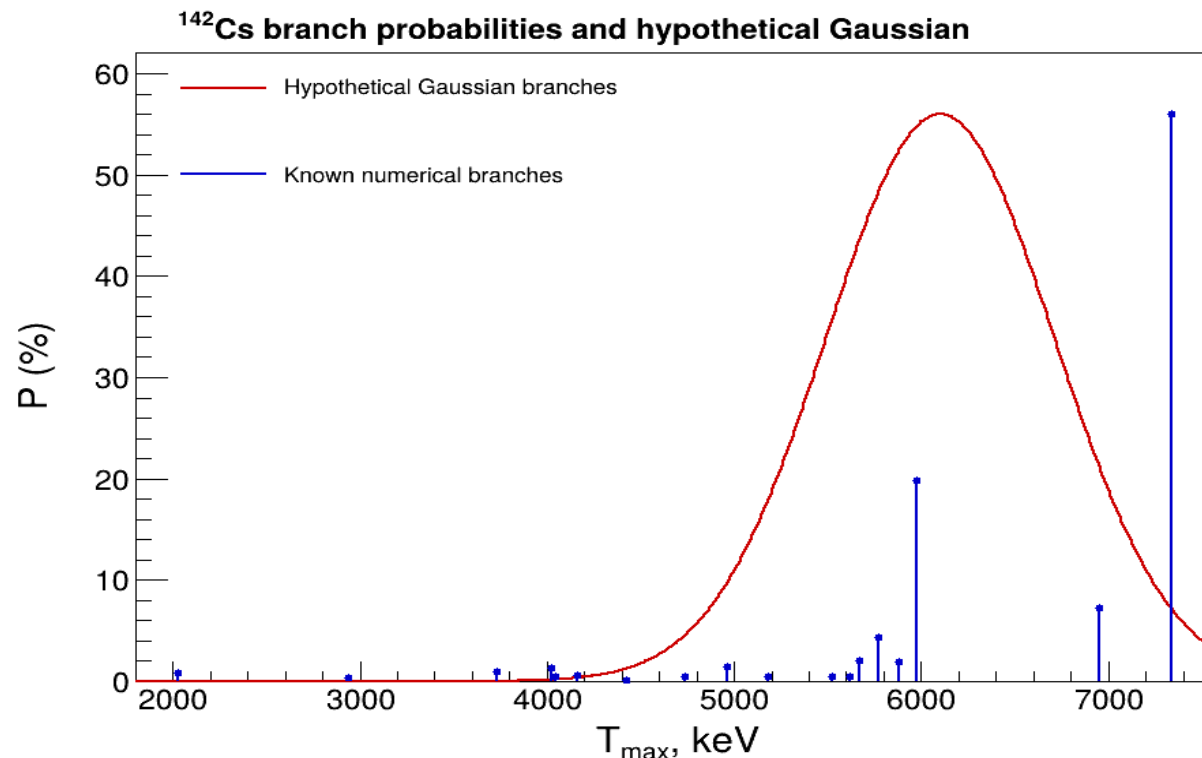


Рис.2: Вероятности ветвления для цезия (^{142}Cs) и предложенных гипотетических ветвей.

Реализация метода суммирования на языке C++

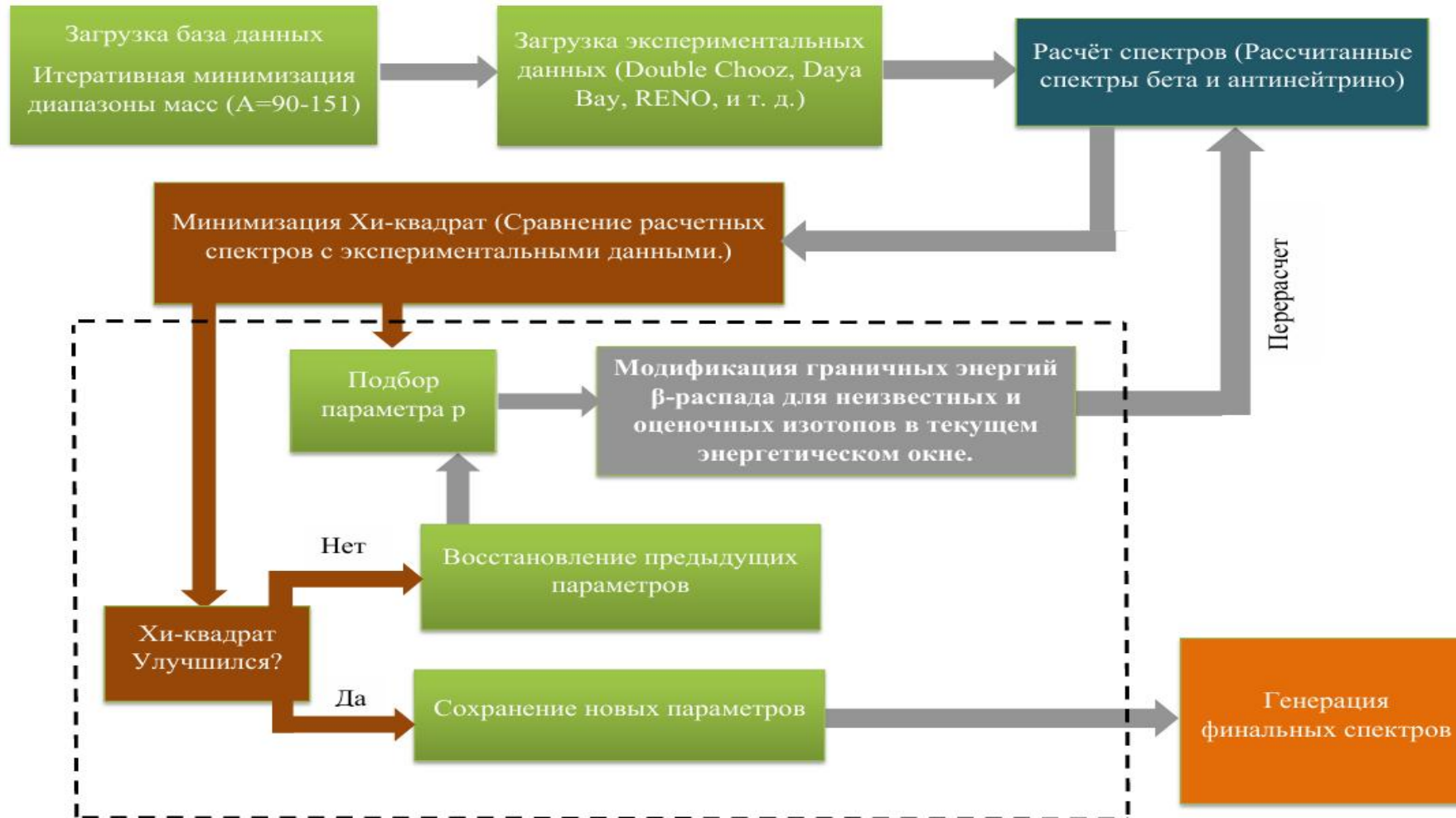


Рис 3. Блок-схема реализации метода суммирования на C++ и итеративного алгоритма для подгонки антинейтрино с минимизацией χ^2 .

Спектры антинейтрино были рассчитаны как с использованием функции Ферми, так и без нее.

Наилучшее соответствие между расчетными и экспериментальными спектрами наблюдается, когда функция Ферми не используется.

Antineutrinos $\bar{\nu}$ spectra (Daya Bay)

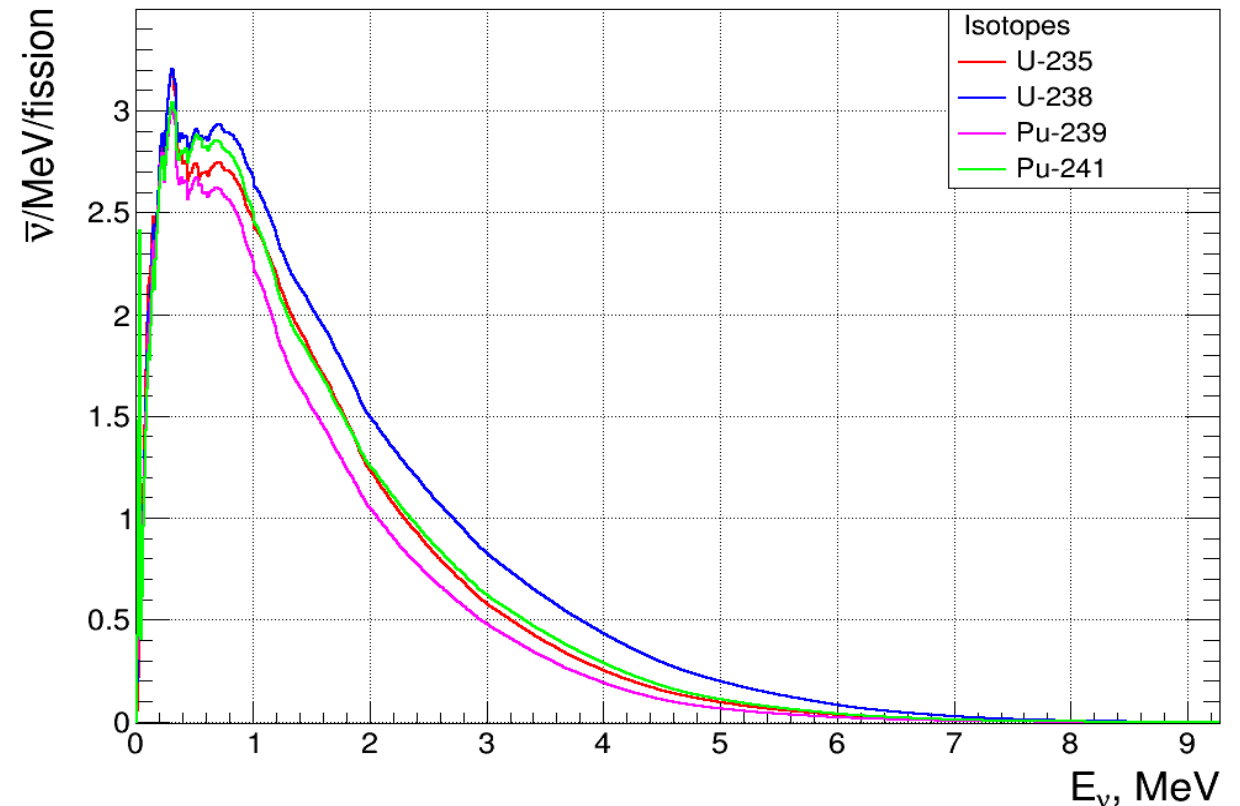


Рис.4: Спектры антинейтрино, рассчитанные с использованием экспериментальных данных Daya Bay

Свертка антинейтрино спектра $S(E_\nu)$ с сечением обратного бета-распада дает полное сечение обратного бета-распада.

$$\sigma_f = \int_0^{E_{max}} S(E_\nu) \cdot \sigma(E_\nu) dE_\nu \quad ,$$

Где: $\sigma(E_\nu)$ - сечение реакции обратного бета-распада для энергии антинейтрино E_ν .

^{235}U	^{238}U	^{239}Pu	^{241}Pu
5.86	10.87	4.37	6.63

Таблица 1: Рассчитанные сечения (ОБР) на основе антинейтринных спектров $\sigma_f \times 10^{-43}$, см²/деление.

Анализ рассчитанных спектров антинейтрино

Эксперимент	содержание топлива				σ_f^{exp}	σ_f^{cal}	R
	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu	^{241}Pu			
Double Chooz	0.52	0.087	0.333	0.06	5.71 ± 0.06	5.8459	0.9768
Daya Bay	0.561	0.076	0.307	0.056	5.84 ± 0.12	5.8265	1.0023
RENO	0.571	0.073	0.30	0.056	5.852 ± 0.094	5.8219	1.0052
Bugey-4	0.538	0.078	0.328	0.056	5.75 ± 0.082	5.8052	0.9908
Rovno	0.586	0.075	0.292	0.047	5.78 ± 0.12	5.8369	0.9903

Сечение (σ_f^{cal}) рассчитали как взвешенное изотопных сечений по долям деления.

Таблица 1: Сравнение экспериментальных и расчётных сечений

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Наилучшее соответствие наблюдается для Daya Bay и RENO, где отношение ($R \approx 1$), (различие $< 0,5\%$).

Это показывает, что рассчитанный спектр является надежным.

Мониторинг выгорания реакторного топлива

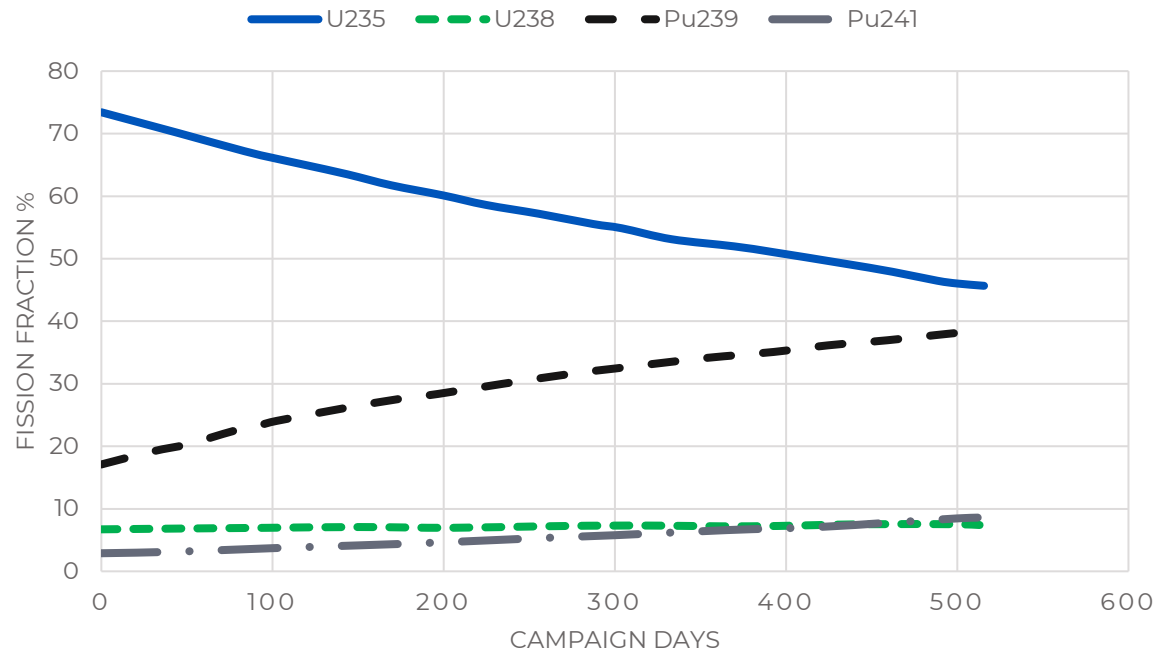


Рис.5: Доля деления во время реакторной кампании

U-235 уменьшается по мере выгорания топлива.

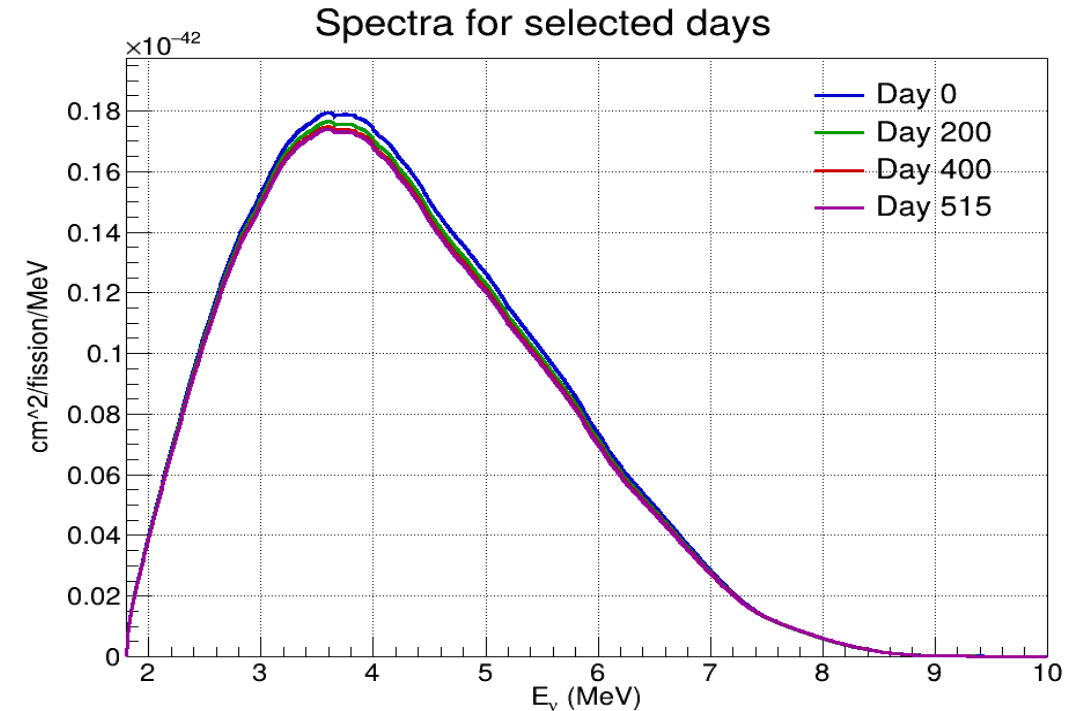






Рис.6: Изменение формы спектра антинейтрино во время кампании

Содержание Pu-239 и Pu-241 увеличивается из-за размножения топлива.

Используется для контроля выгорания и состояния реактора

-  В результате работы был реализован метод суммирования на языке C++, учтена неполнота ядерных данных, получены спектры хорошо согласуются с экспериментальными, а также показано влияние оптимизации на результаты.
-  Основная проблема при расчете спектров антинейтрино заключается в том, что ядерные базы данных неполны и содержат неопределенности.
-  Реализация метода суммирования на C++, что позволяет легко пересчитывать спектры, используя самые последние доступные данные.
-  Спектры антинейтрино в основном используются для неинвазивного мониторинга эволюции ядерного топлива.



**Спасибо за
внимание!**

5/21/2026

Дополнительные слайды

Форма бета-спектра

Для разрешенного бета-распада форма бета-спектра $P_e(E_e, E_0, Z)$ описывается формулой:

$$P_e(E_e, E_0, Z) = K \cdot p_e \cdot E_e \cdot (E_0 - E_e)^2 \cdot F(Z, E_e)$$

где:

K - нормировочный фактор,

p_e и E_e - импульс и полная энергия электрона,

E_0 - граничная энергия бета-перехода,

$F(Z, E_e)$ - функция Ферми, учитывающая влияние кулоновского поля ядра на энергию бета-частицы

Для расчета спектра антинейтрино $P(E_\nu, E_0, Z)$ следует вместо E_e подставить $E_0 - E_\nu$.

Согласование между рассчитанными и экспериментальными спектрами антинейтрино оценивается с помощью минимизации χ^2 .

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^N \frac{(S_k^{cal} - S_k^{exp})^2}{\sigma_k^2} + \sum_{i=1}^5 \frac{(\sigma_i^{cal} - \sigma_i^{exp})^2}{\Delta\sigma_i^2}$$

Где S_k^{cal} – рассчитанное значение спектра, S_k^{exp} -экспериментальный спектр антинейтрино, σ_k^2 – погрешность экспериментального спектра и N - общее количество интервалов.

В выражении для χ^2 используются также экспериментальные сечения σ_i , полученные в ряде экспериментов с погрешностью $\Delta\sigma_i$.