

# Доклад на тему

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

ВЫПОЛНИЛ

-ТЕЙН ТХЕЙ АУНГ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

- СИНЕВ В.В. д.ф.-м.н.,в.н.с. ИЯИ РАН

Москва -2025 г.

- ▶ Введение
- ▶ Актуальность и Цель работы
- ▶ Реактор- источник антинейтрино
- ▶ Расчетный метод
- ▶ Оптимизация Базы Данных с помощью Силовой Функции
- ▶ Схемы  $\beta$ -распада для неизвестных осколков
- ▶ Использование баз данных
- ▶ Заключение

Спектры  $\beta$ -частиц и электронных антинейтрино, испускаемых в процессе  $\beta$ -распадов осколков деления тяжёлых ядер, являются ключевыми характеристиками реакторных нейтринных источников. Методы расчёта спектров основаны на использовании баз данных по  $\beta$ -распадам продуктов деления, включающих энергии переходов, вероятности ветвлений и выходы осколков.

В данной работе были изучены методы расчёта  $\beta$ - и антинейтринных спектров с использованием существующих баз данных, а также исследована методика изменения формы индивидуального спектра осколка деления с помощью силовой функции. На основе этой методики были рассчитаны суммарные антинейтринные спектры для основных делящихся изотопов —  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$  — с последующей подгонкой к экспериментальным данным нескольких нейтринных коллабораций.

# Актуальность и Цель работы

- ▶ **Актуальность** этой работы в том, что нужна улучшенная и непротиворечивая база данных по осколкам деления. Она позволит точнее рассчитывать спектры антинейтрино для главных делящихся изотопов: урана-235, урана-238, плутония-239 и плутония-241. Такие точные спектры нужны и для фундаментальной науки, и для практики: контроля работы реакторов, оценки расхода топлива и разработки методов дистанционной проверки ядерных материалов.
- ▶ **Цель работы** является разработка и реализация методологии расчёта антинейтринных спектров делящихся изотопов с использованием экспериментальных  $\beta$ -спектров для оптимизации базы данных осколков деления.

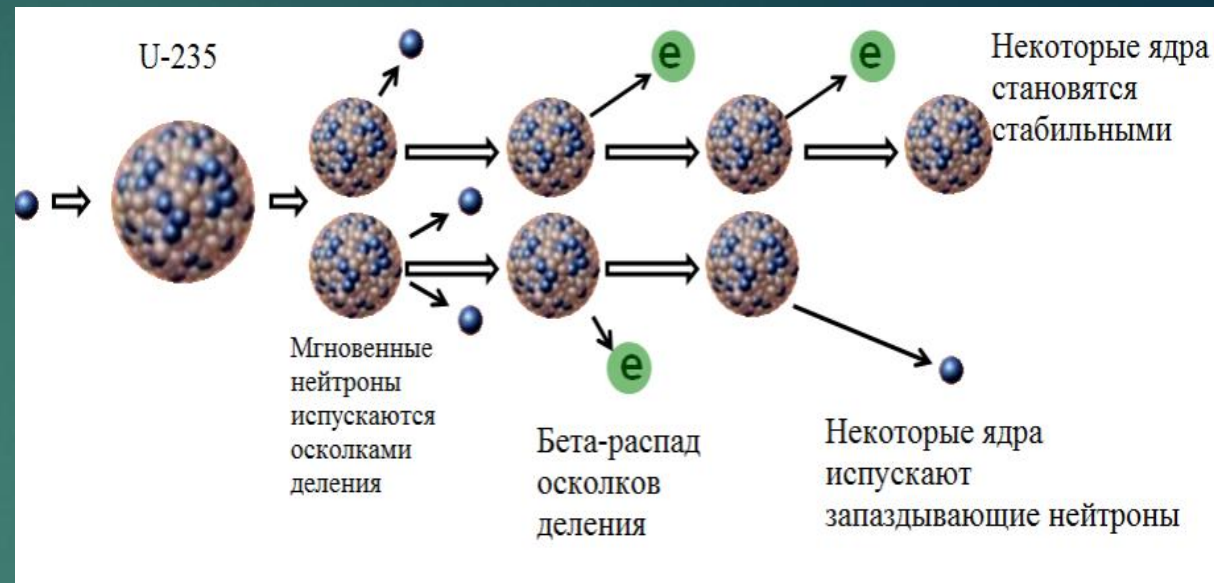
# Реактор- источник антинейтрино

5

- Ядерные реакторы работают за счет деления изотопов урана (U) и плутония (Pu).
- Процесс деления: Ядро актинида, как правило, распадается на два осколки. Эти осколки богаты нейтронами.
- Цепь бета-распада: Для достижения стабильности эти осколки претерпевают серию бета-минус ( $\beta^-$ ) распадов.

-Нейтрон превращается в протон.

-Он испускает электрон ( $e^-$ ) и электронное антинейтрино ( $\bar{\nu}_e$ ).



*Рис. 1 бета-распад осколка деления  $^{235}\text{U}$*

Реакция ( $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ) является обратной реакцией бета-распада (IBD) и служит наиболее эффективным методом регистрации антинейтрино.

пороговая энергия реакции ( $E_{\text{пор}}=1.806 \text{ МэВ}$ )

# Расчетный Метод (Метод суммирования)

Спектр антинейтрино ( $\frac{dN}{dE_{\bar{\nu}}}$ ) по методу суммирования определяется как сумма вкладов от всех осколков деления и их бета-переходов

$$\frac{dN}{dE_{\bar{\nu}}} = \sum_n Y_n(Z, A) \cdot \sum_i b_i(E_0^i) P_{\bar{\nu}}(E_{\bar{\nu}}, E_0^i, Z)$$

Где:

1.  $Y_n(Z, A)$  — выход n-го осколка (с зарядом  $Z$  и массовым числом  $A$ ) на одно деление.
2.  $b_i(E_0^i)$  — коэффициент ветвления (branching ratio) для i-го перехода с граничной энергией  $E_0^i$ . Коэффициенты ветвления нормированы на единицу ( $\sum_i b_{n,i}(E_0^i) = 1$ )
3.  $P_{\bar{\nu}}(E_{\bar{\nu}}, E_0^i, Z)$  — форма спектра антинейтрино для i-го ветвления.

# Схемы $\beta$ -распада для неизвестных осколков

7

Проблема: Неизвестные осколки составляют значительную часть, имеют большую энергию  $\beta$ -распада ( $E_\beta$ ), но их вероятности  $\beta$ -переходов неизвестны.

Новый подход: Вместо использования упрощенной схемы распада (с одним, двумя или тремя уровнями) была применена силовая функция.

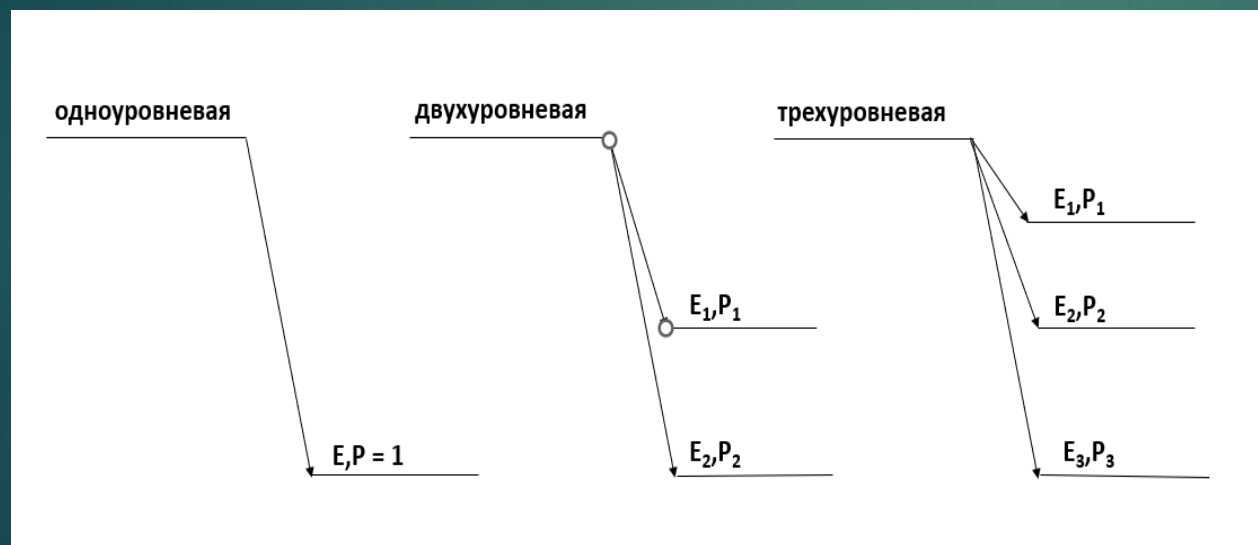


Рис. 2 Схемы  $\beta$ -распада для неизвестных осколков

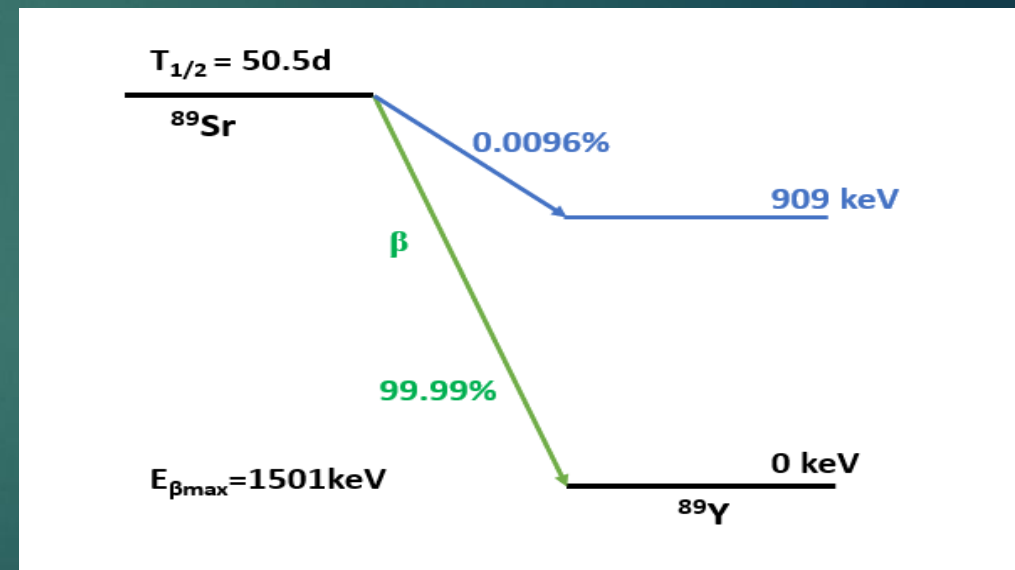


Рис. 3 Схемы  $\beta$ -распада для стронция

Для описания неизвестных  $\beta$ -переходов была использована силовая функция, представляющая собой распределение вероятностей переходов по энергии:

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

где  $\mu = p \cdot E_\beta$  (средняя энергия перехода)

$\sigma = 0.1 \cdot \mu$  (ширина распределения)

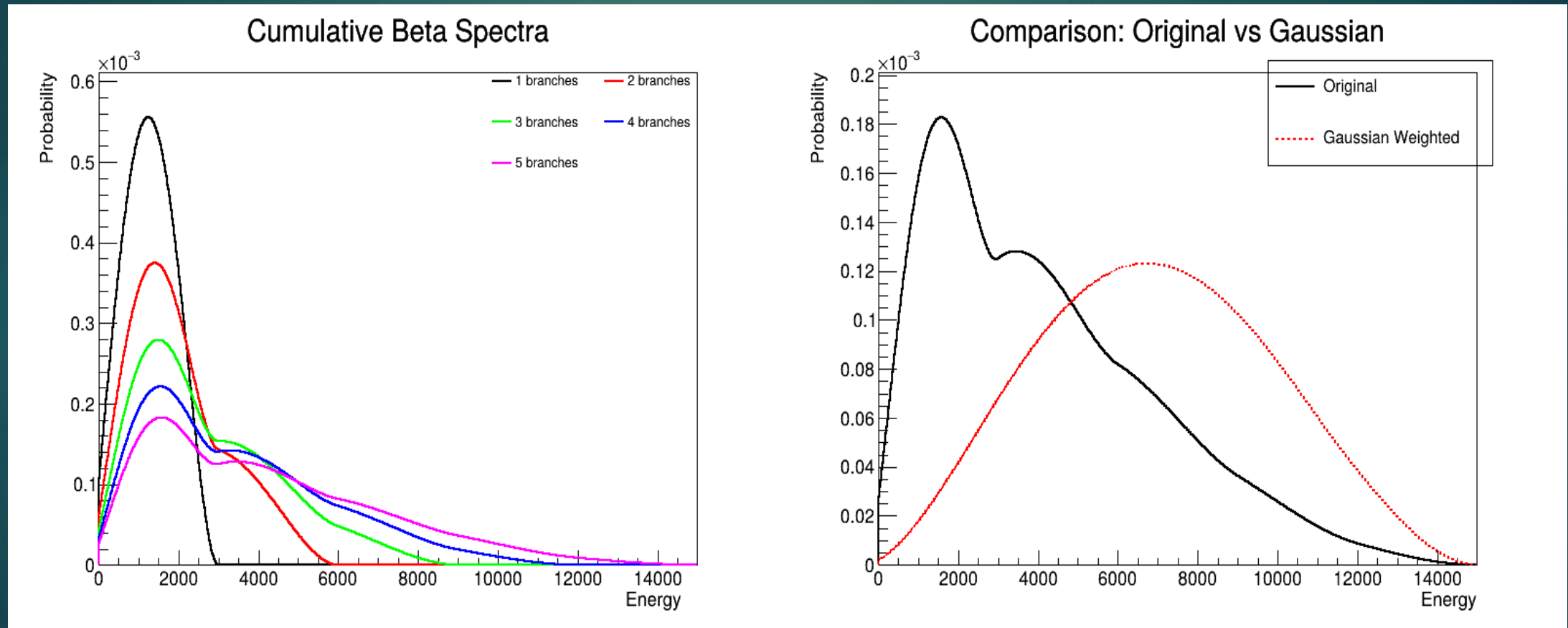
$p$  = подбирается при подгонке к эксперименту

Ветвь	$E_{\beta, \max}$ (keV)	$I_\beta$ (%)
1	3000	20
2	6000	20
3	9000	20
4	12000	20
5	15000	20

*Таблица.1. неизвестный изотоп , который распадается  $\beta^-$  с 5 ветвями*

Левый график показывает, как  $\beta$ -спектр расширяется при увеличении числа ветвей.

Правый график показывает, как дискретный спектр можно сгладить с помощью гауссового взвешивания.



*Рис. 4 бета-спектры неизвестного изотопа*

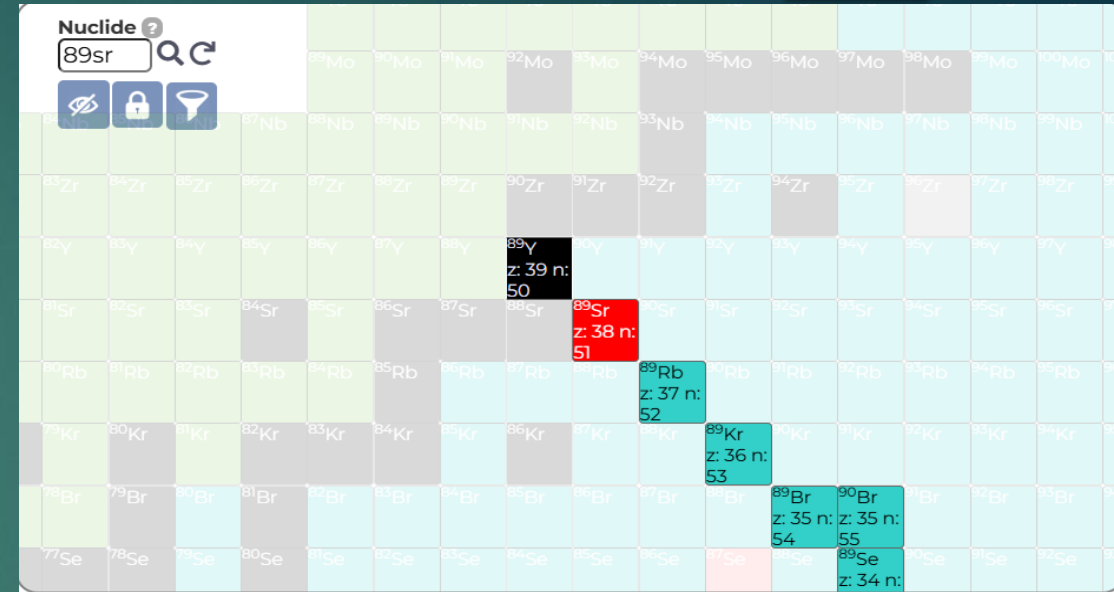
# Использование баз данных

Расчёт индивидуального  $\beta$ -спектра каждого осколка деления опирается на набор ядерных характеристик, включающих:

- энергии  $\beta$ -переходов ( $E_\beta$ ),
- вероятности ветвлений различных переходов,
- типы переходов (разрешённые, запрещённые),
- уровни возбуждения дочерних ядер

Эти данные берутся из ядерных баз Livechart МАГАТЭ <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

Однако около трети всех осколков деления имеют полностью неизвестные схемы  $\beta$ -распада, а ещё треть — оценочные данные. Это делает прямой расчёт спектров неполным и требует дополнительных методов коррекции.

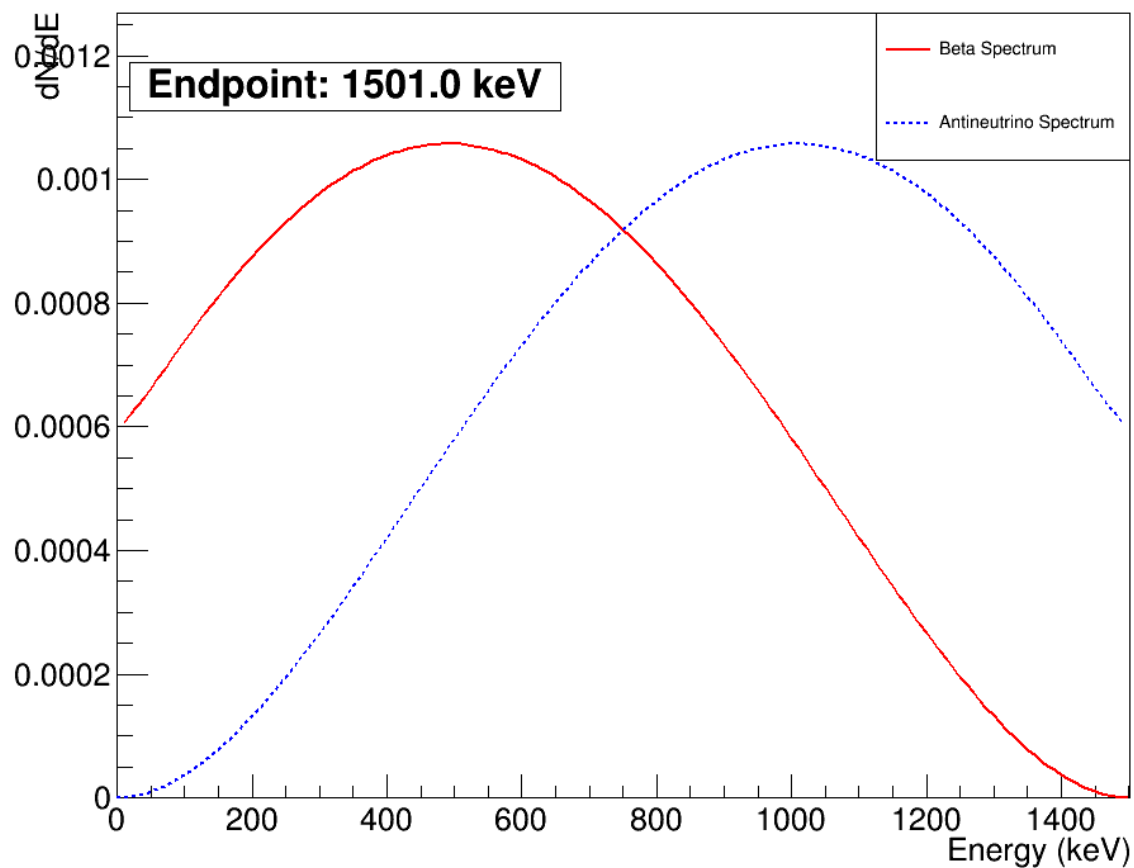


Beta -

#	$\langle E_\beta \rangle$ [keV]	$I_\beta$ (abs) [%]	Daughter level [keV]	$J^\pi$	$E_{\beta-, \max}$ [keV]	logft	Transition type	Comments
1	191.3 70	0.00964 5	908.960 25	9/2+	(592)	11.083 7	2 <sup>nd</sup> non-unique	
2	587.1 17	<b>99.99036 5</b>	0	1/2-	(1501)	9.432 5	1 <sup>st</sup> unique	

Рис. 5 бета-распад изотона стронция

Beta and Antineutrino Spectra



Beta and Antineutrino Spectra

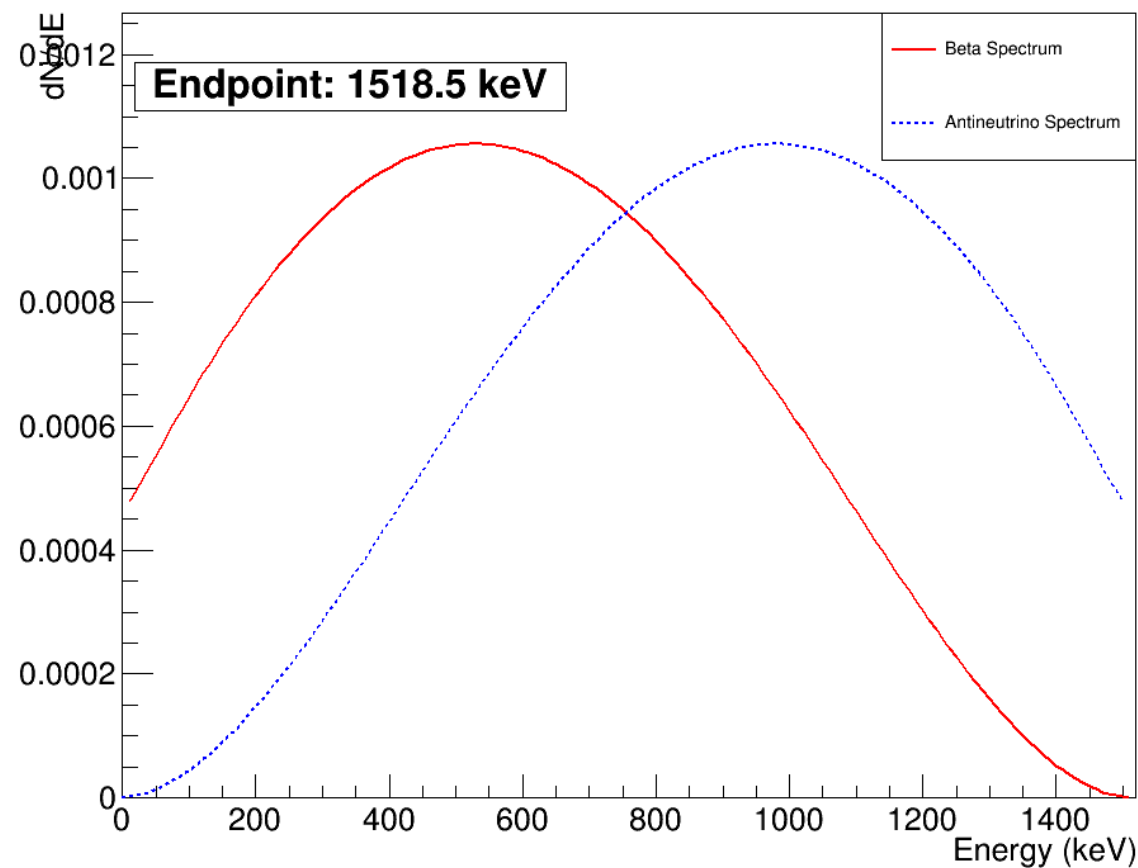
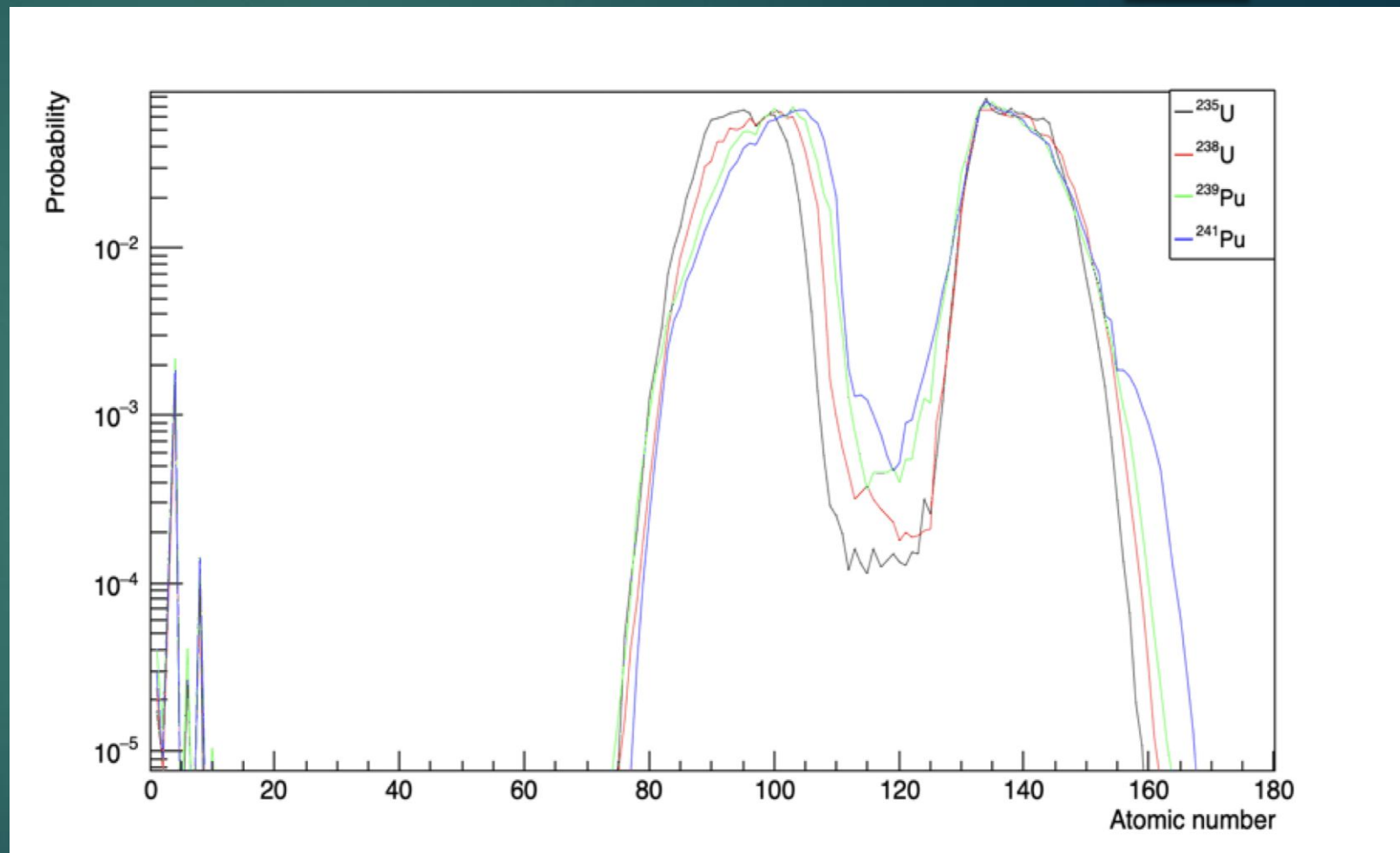


Рис. 6 бета и антинейтринно-спектр стронция ( $^{89}\text{Sr}$ ) Рис. 7 бета и антинейтринно-спектр хрома ( $^{56}\text{Cr}$ )

- Основные Осколки лежат в диапазоне  $A \approx 60-160$
- Распределение — пики около  $A \approx 95$  и  $A \approx 140$
- Лёгкие ядра ( $A = 1-15$ ), такие как водород, гелий, углерод, появляются при тройном делении и тоже вносят вклад в антинейтринный спектр
- Это распределение критично для расчёта антинейтринного спектра: оно определяет, какие Осколки чаще рождаются и какие дают наиболее энергичные  $\beta$ -распады.



*Рис.8 Массовое распределение осколков деления :  $^{235}\text{U}$  — черная,  $^{238}\text{U}$  — красная,  $^{239}\text{Pu}$  — зеленая и  $^{241}\text{Pu}$  — синяя*

В ходе работы были изучены методы расчёта  $\beta$ - и антинейтринных спектров на основе баз данных по  $\beta$ -распадам продуктов деления. Показано, что базы данных недостаточны для точного воспроизведения экспериментальных спектров, особенно в области высоких энергий.

Была исследована и реализована методика изменения формы индивидуального спектра осколка деления с помощью силовой функции. Этот подход позволил гибко корректировать вклад неизвестных осколков и добиться согласия расчётных спектров с экспериментальными данными нескольких нейтринных коллабораций.

Спасибо за внимание!