

Расчет кумулятивных спектров бета-частиц и антинейтрино продуктов деления урана и плутония методом прямого суммирования

Зайцев В.Н.

Б22-102

Научный руководитель: Попов Д.В.

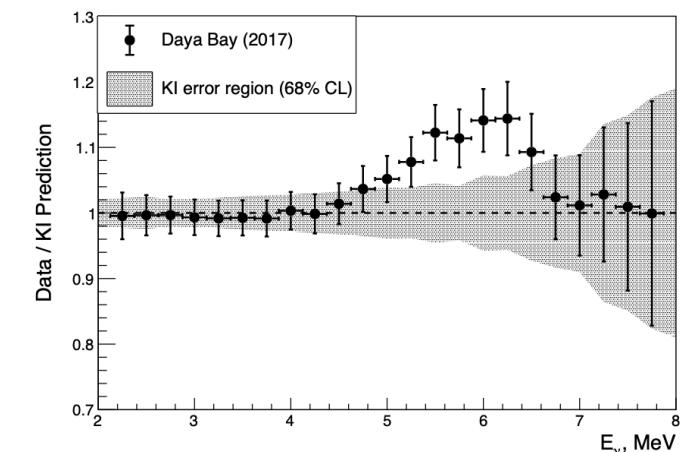
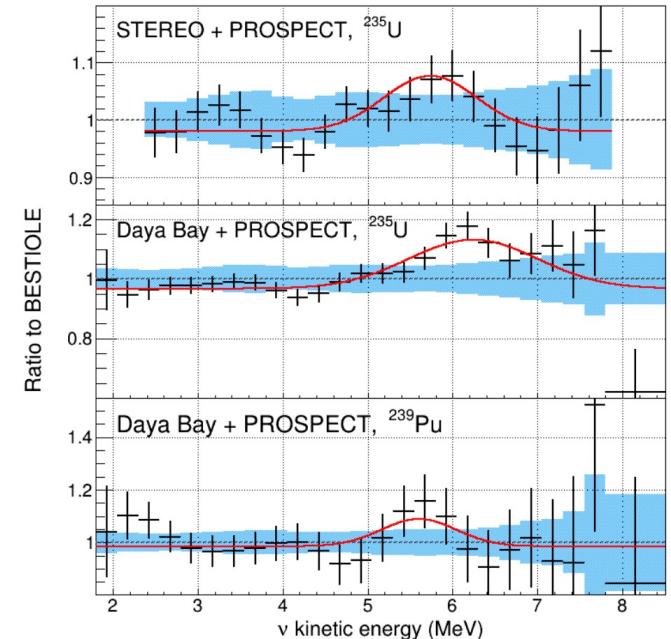
Москва, 2025



Актуальность:

Все существующие на данный момент модели спектров бета-частиц и антинейтрино имеют расхождения с экспериментально полученными значениями. Причины расхождения позитронных спектров, получаемых из спектров антинейтрино, с экспериментальными в области порядка 5-7 МэВ («bump»-эффект) все еще не установлены ни одной научной группой.

В связи с этим, актуальной темой является развитие новой теоретической модели и установление причин такого расхождения с последующей модернизацией модели для его устранения.



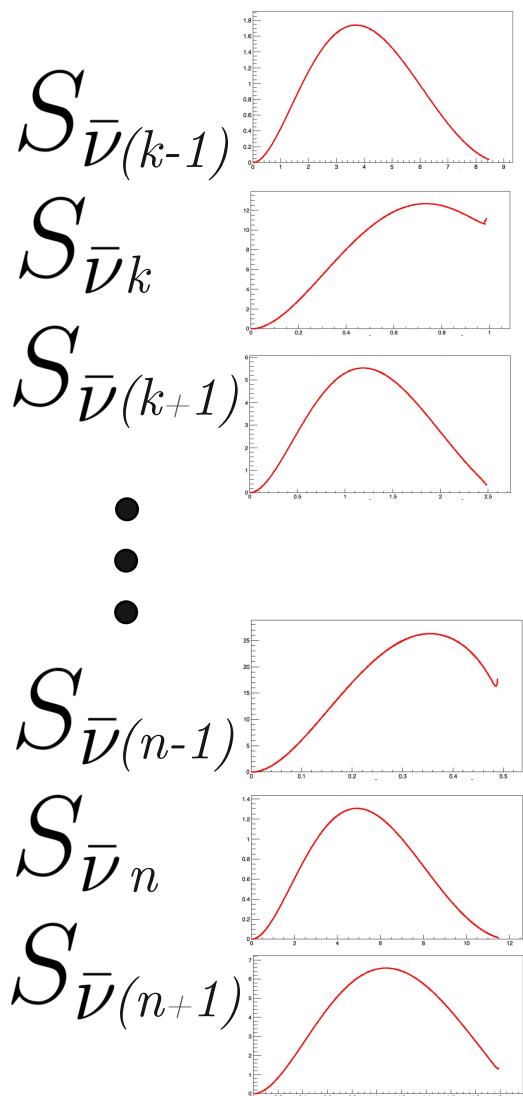
Цель:

Развитие теоретической модели, по которой можно построить кумулятивные спектры бета-частиц и антинейтрино продуктов деления урана и плутония.

Задачи:

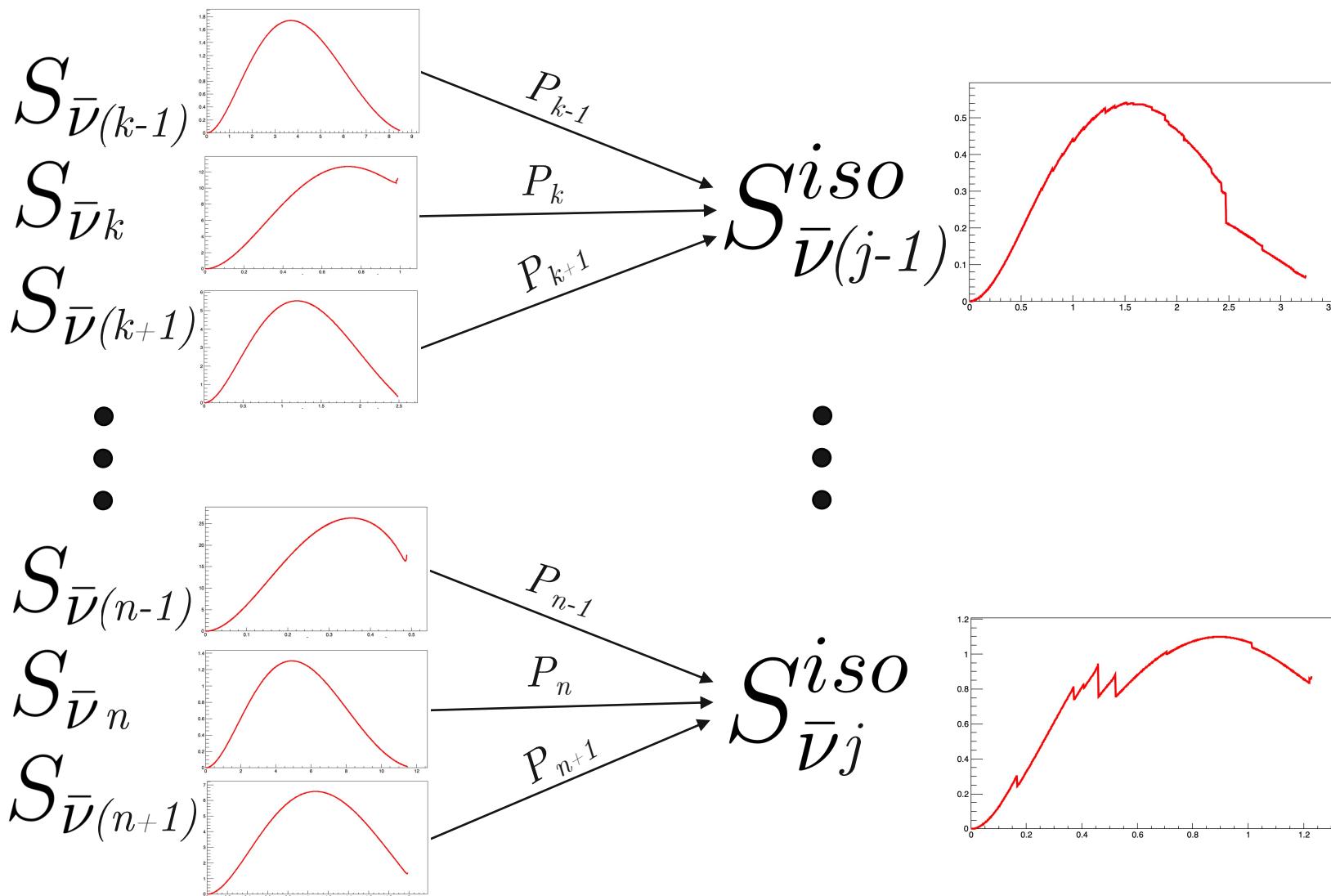
- Получить кумулятивные спектры бета-частиц и антинейтрино продуктов деления основных изотопов, используемых как топливо для ядерных реакторов (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu);
- Сравнить кумулятивные спектры с экспериментальными спектрами и другими существующими моделями;
- При несовпадении модельных спектров с экспериментальными путем вариации параметров попробовать устраниТЬ несоответствие.

Построение кумулятивного спектра



~ 17.000 переходов

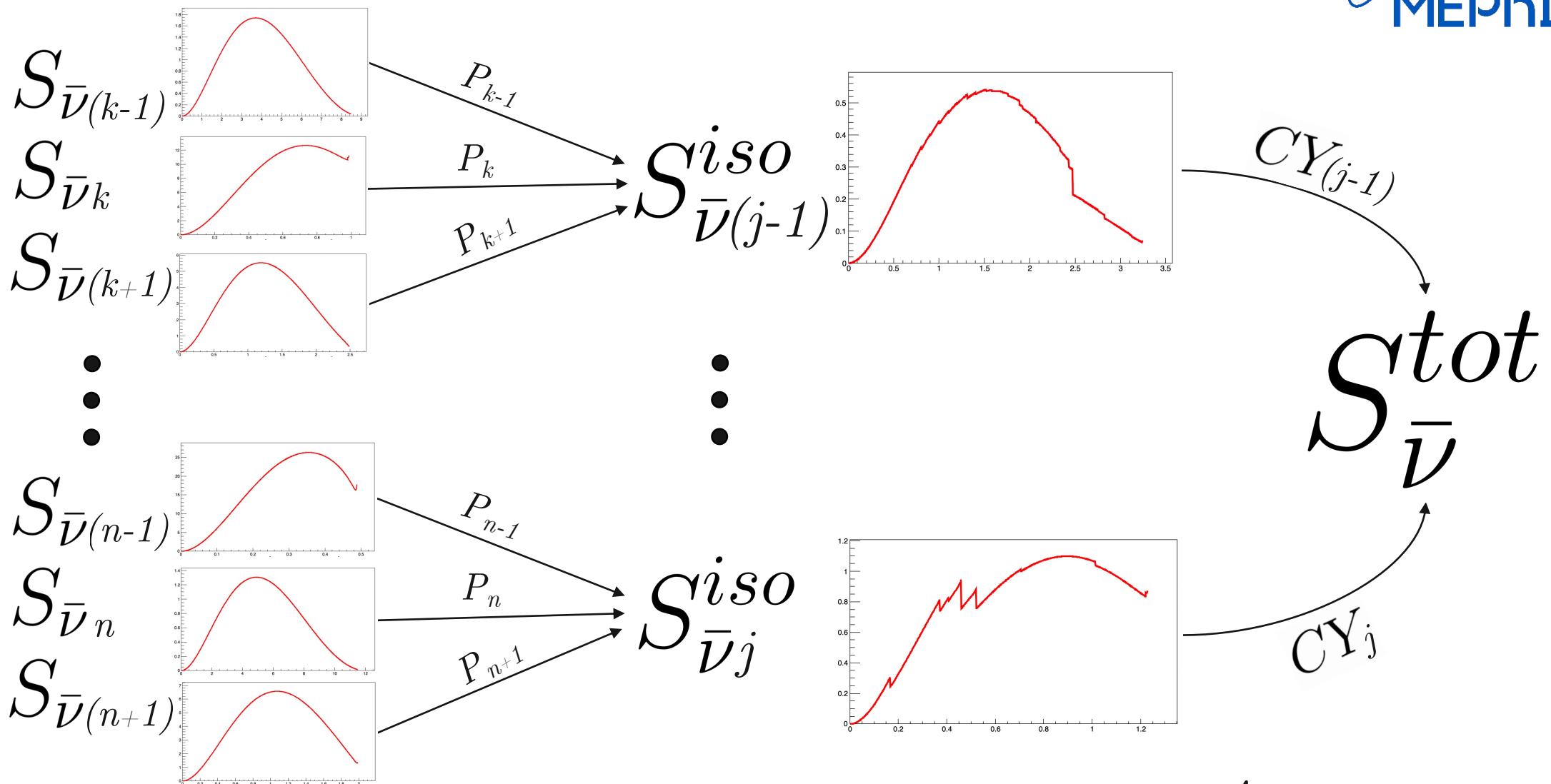
Построение кумулятивного спектра



~ 17.000 переходов

~ 660 изотопов

Построение кумулятивного спектра



~ 17.000 переходов

~ 660 изотопов

4 кумулятивных
спектра

Построение кумулятивного спектра

Общая формула: $S_e^{tot} = \sum_j CY(Z, A) S_{ej}^{iso}$, $S_{\bar{\nu}}^{tot} = \sum_j CY(Z, A) S_{\bar{\nu}j}^{iso}$

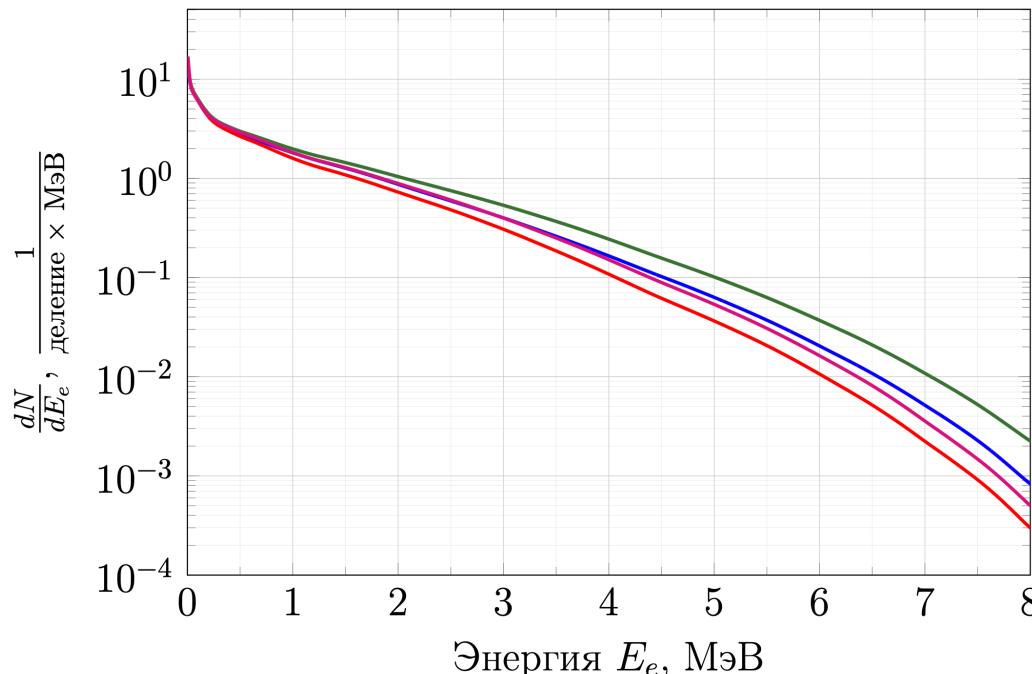


Рисунок 1 — Кумулятивные спектры бета-частиц

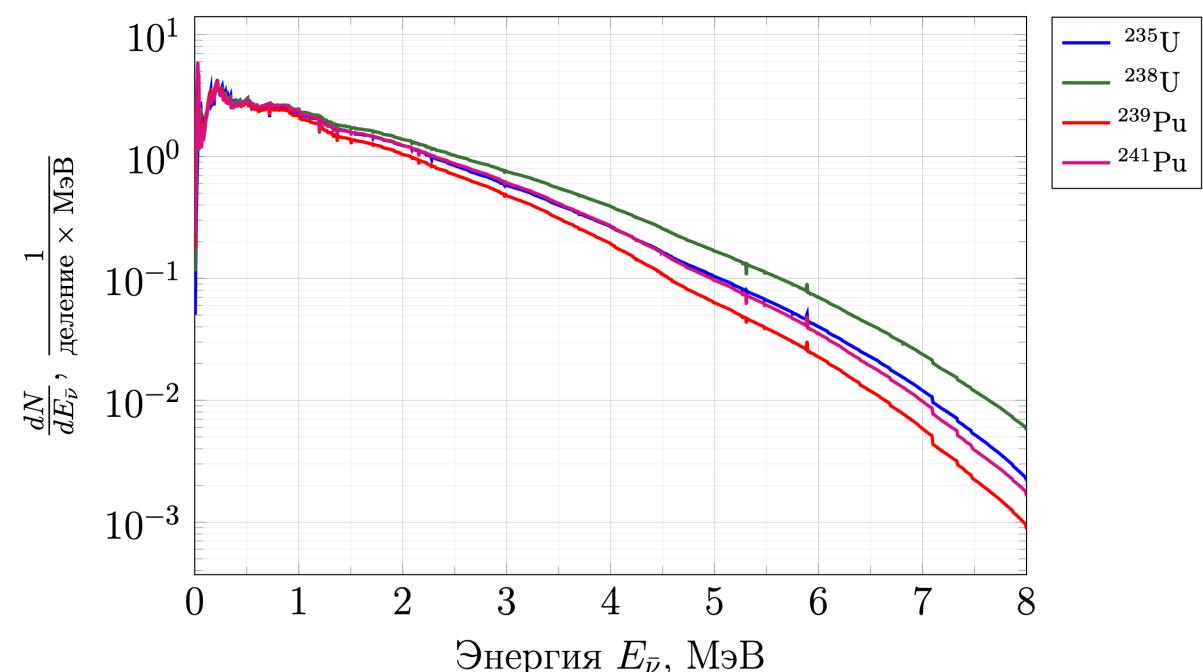


Рисунок 2 — Кумулятивные спектры антинейтрино

Реконструирование позитронного спектра

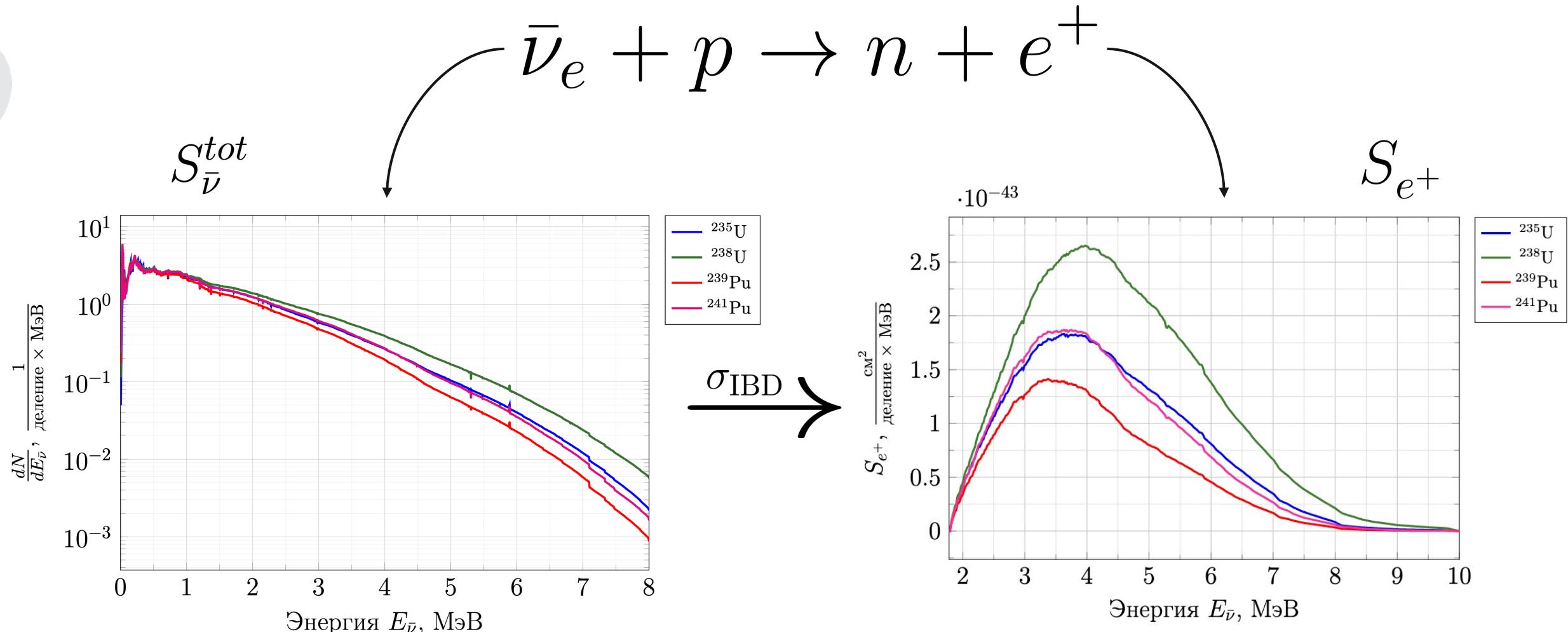


Рисунок 3 — Кумулятивные спектры антинейтрино

Рисунок 4 — Позитронные спектры

Сравнение спектров с экспериментом

Сравнение позитронных спектров (в первом приближении) с экспериментом Daya Bay и моделью BESTIOLE.

^{235}U

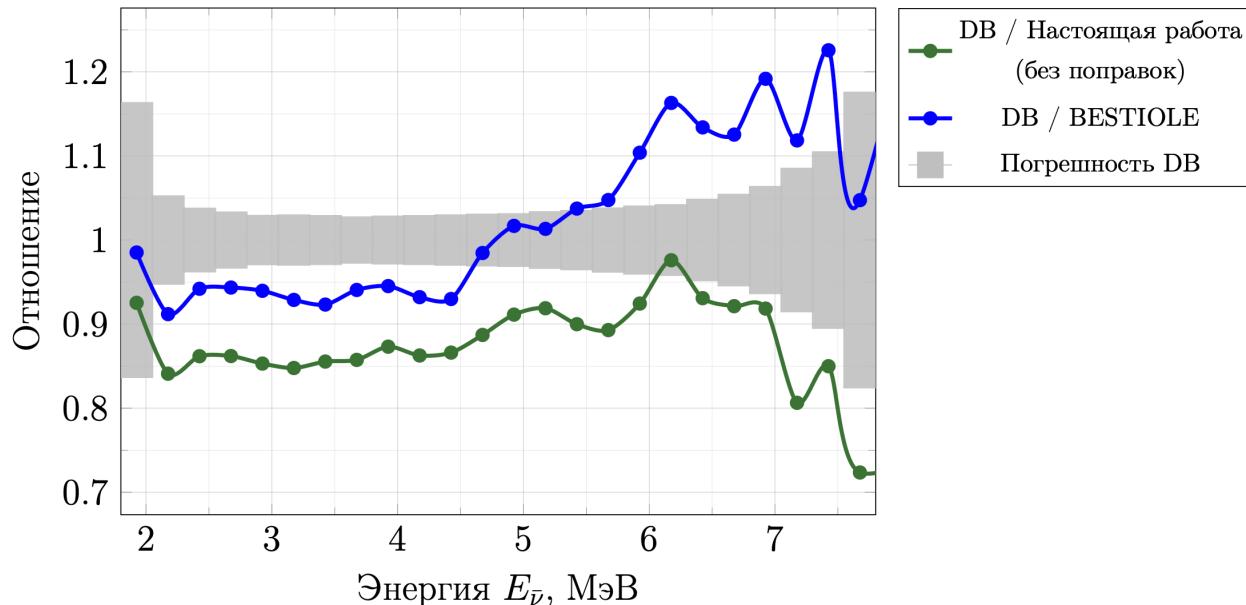


Рисунок 5 — Отношение экспериментального позитронного спектра от деления ^{235}U к модельным позитронным спектрам

^{239}Pu

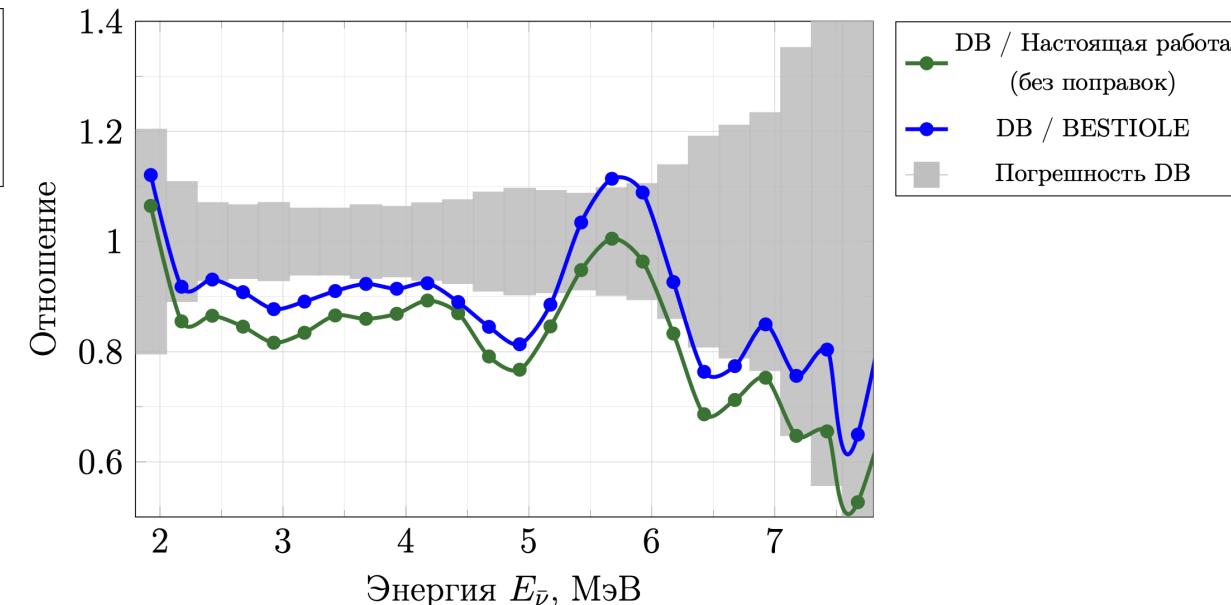
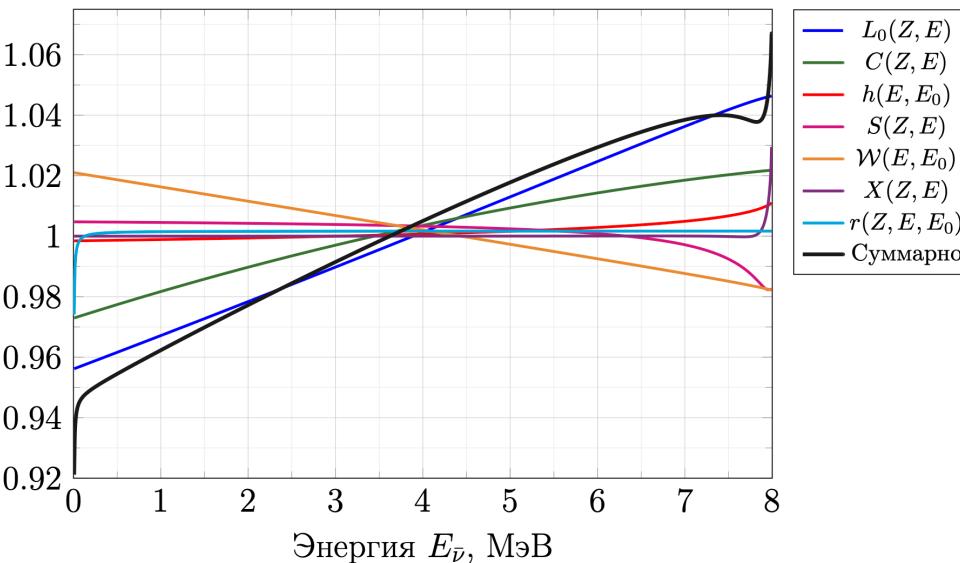
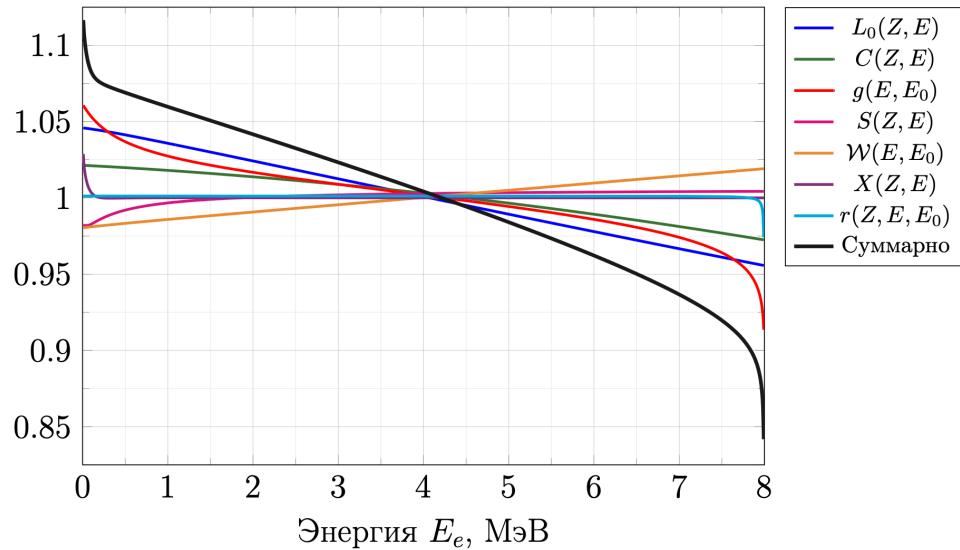


Рисунок 6 — Отношение экспериментального позитронного спектра от деления ^{239}Pu к модельным позитронным спектрам

Учет поправок к спектрам β -частиц и антинейтрино



Обозначение	Учитываемый физический фактор	Вклад в спектр
$L_0(Z, E)$	Поправка на конечный размер дочернего ядра	$\approx 4\%$
$C(Z, E)$	Поправка на конечный размер родительского ядра	$\approx 2.5\%$
$g(E, E_0)$	Радиационные поправки (β)	$\approx 6\% (\beta)$
$h(E, E_0)$	Радиационные поправки ($\bar{\nu}$)	$\approx 1\% (\bar{\nu})$
$S(Z, E)$	Учет экранирования	$\approx 2.5\%$
$W(E, E_0)$	Слабый магнетизм	$\approx 2\%$
$X(Z, E)$	«Эффект обмена»	$\approx 2.5\%$
$r(Z, E, E_0)$	Запаздывание перестройки электронной оболочки	$\approx 2\%$

Таблица 1 — Сводная таблица используемых в настоящей работе поправок к спектрам β -частиц и антинейтрино

Рисунки 7, 8 — Вклады поправок в форму одиночного синтетического спектра ($Z=46$, $E_0=me = 8$ МэВ)

Учет запрещенности переходов

	A	1U	1NU	2U	2NU	3U
^{235}U	40.16%	12.69%	27.67%	0.07%	3.79%	<0.01%
^{238}U	43.77%	8.87%	24.88%	0.07%	3.57%	<0.01%
^{239}Pu	48.06%	8.50%	23.51%	0.07%	4.38%	<0.01%
^{241}Pu	47.82%	7.09%	23.52%	0.07%	3.72%	<0.01%

	3NU	4U	4NU	5NU	S	Неизвестный тип
^{235}U	0.47%	<0.01%	0.01%	0.03%	<0.01%	15.09%
^{238}U	0.29%	<0.01%	0.02%	0.06%	<0.01%	18.46%
^{239}Pu	0.20%	<0.01%	0.03%	0.02%	<0.01%	15.22%
^{241}Pu	0.15%	<0.01%	0.04%	0.03%	0.01%	17.55%

Таблица 2 — Относительные вклады различных типов переходов в кумулятивные спектры исследуемых изотопов

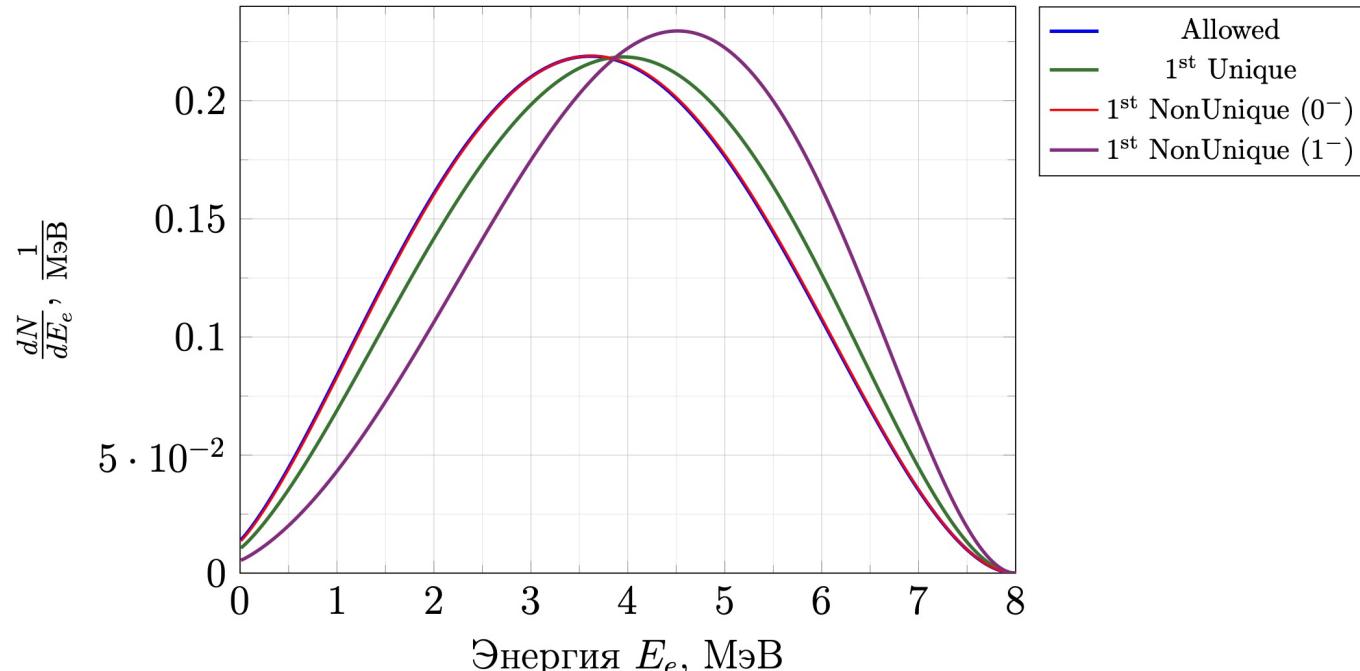


Рисунок 9 — Влияние степени и типа запрещенности на одиночный синтетический бета-спектр ($Z=46$, $E_0-\text{me} = 8$ МэВ)

Сравнение спектров с экспериментом

Сравнение позитронных спектров с экспериментом Daya Bay и моделью BESTIOLE.

^{235}U

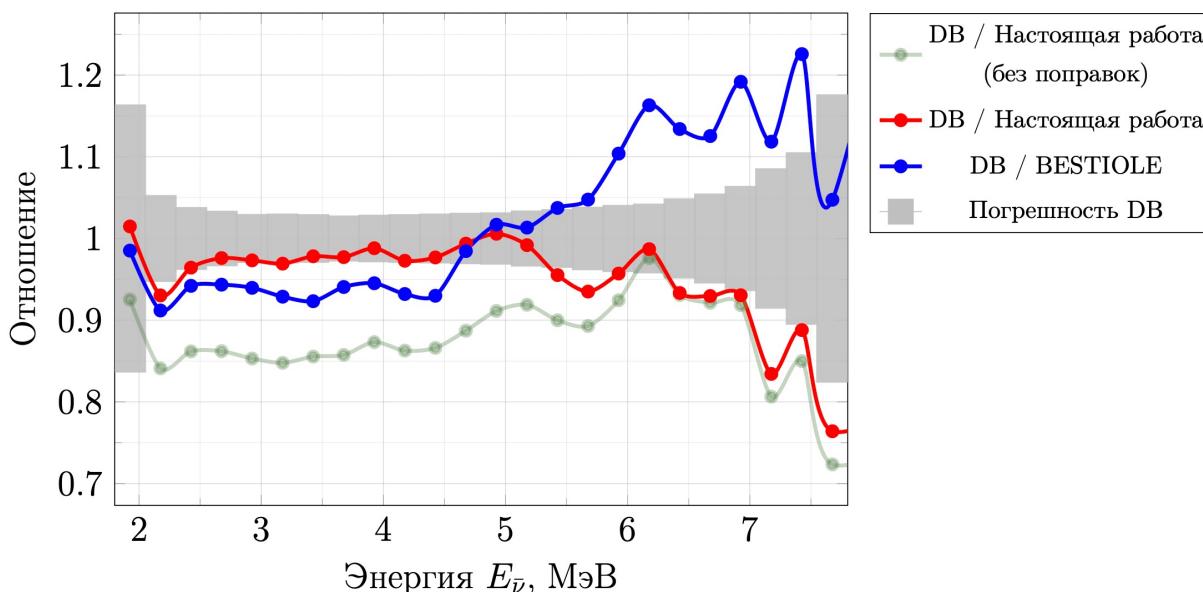


Рисунок 10 — Отношение экспериментального позитронного спектра от деления ^{235}U к модельным позитронным спектрам

^{239}Pu

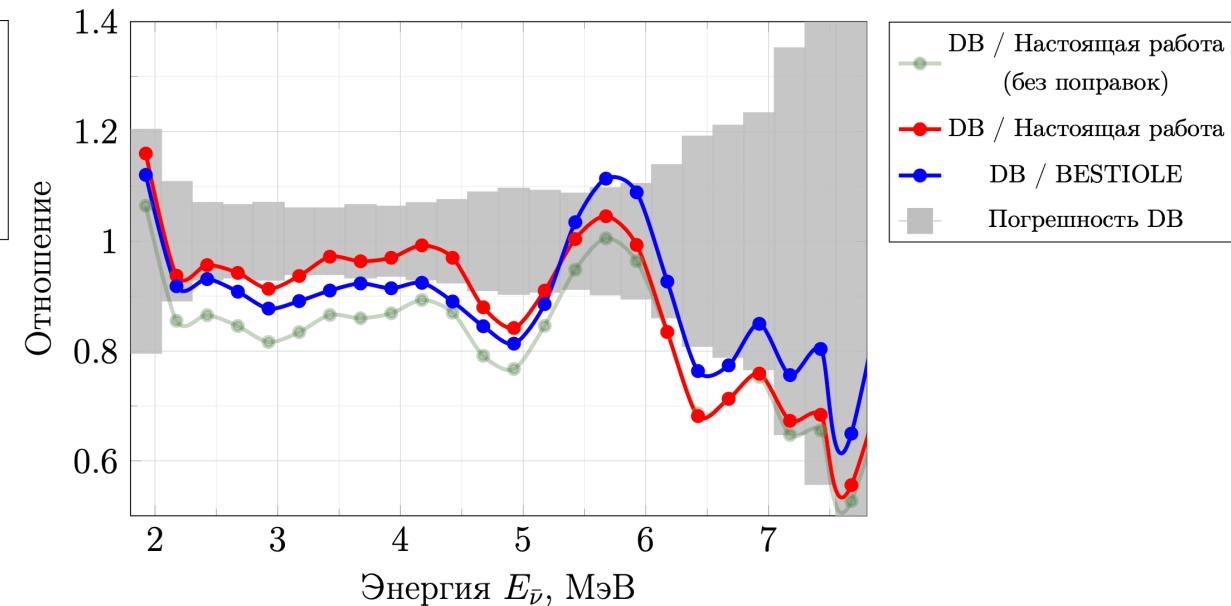


Рисунок 11 — Отношение экспериментального позитронного спектра от деления ^{239}Pu к модельным позитронным спектрам

Подгонка путем вариации кумулятивных выходов

Функция отклонения: $\chi^2 = \sum_E \left(\frac{S_{e^+}^{theory}(E, \vec{CY}) - S_{e^+}^{exp}}{\Delta_{e^+}^{exp}} \right)^2 + \sum_k \left(\frac{CY_k^{fit} - CY_k}{\Delta CY_k} \right)^2$

$$p_k = \frac{CY_k^{fit} - CY_k}{\Delta CY_k} \in (-1, 1) \longrightarrow$$

Подавление слишком большого отклонения подгоночных выходов от табличных значений

$$\chi^2 \longrightarrow \min$$

Сравнение спектров с экспериментом

Новые отношения для модельных спектров после процедуры подгонки

^{235}U

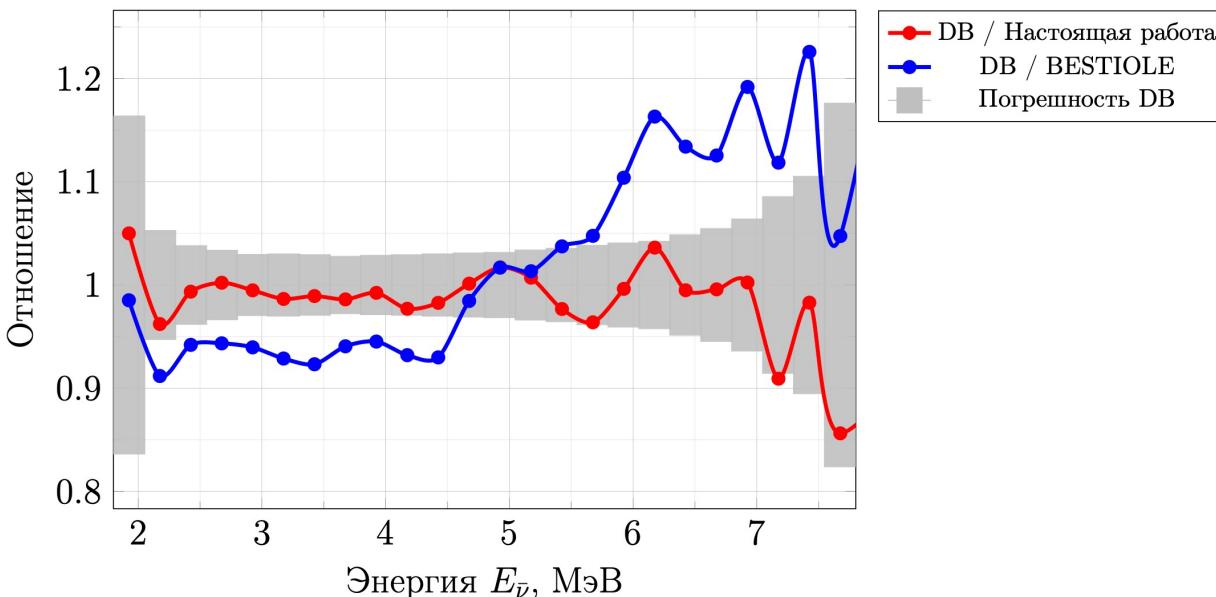


Рисунок 12 — Отношение экспериментального позитронного спектра от деления ^{235}U к модельным позитронным спектрам после процесса подгонки

^{239}Ru

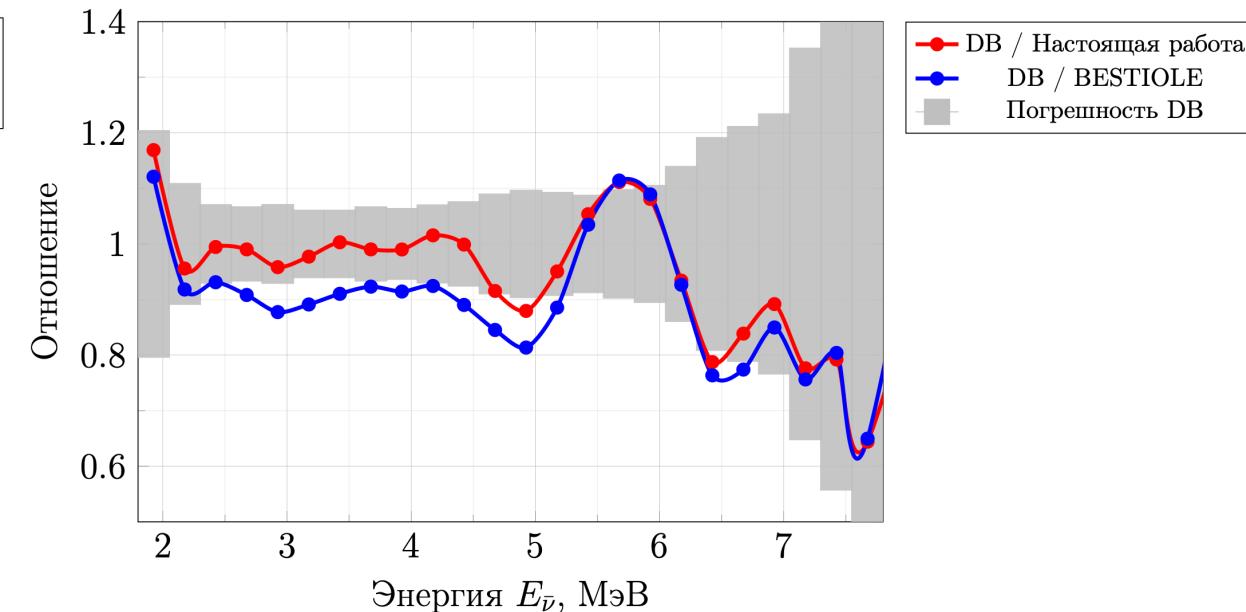


Рисунок 13 — Отношение экспериментального позитронного спектра от деления ^{239}Ru к модельным позитронным спектрам после процесса подгонки

Сравнение спектров с экспериментом

Сравнение с экспериментами Daya Bay и RENO для смеси изотопов

Daya Bay

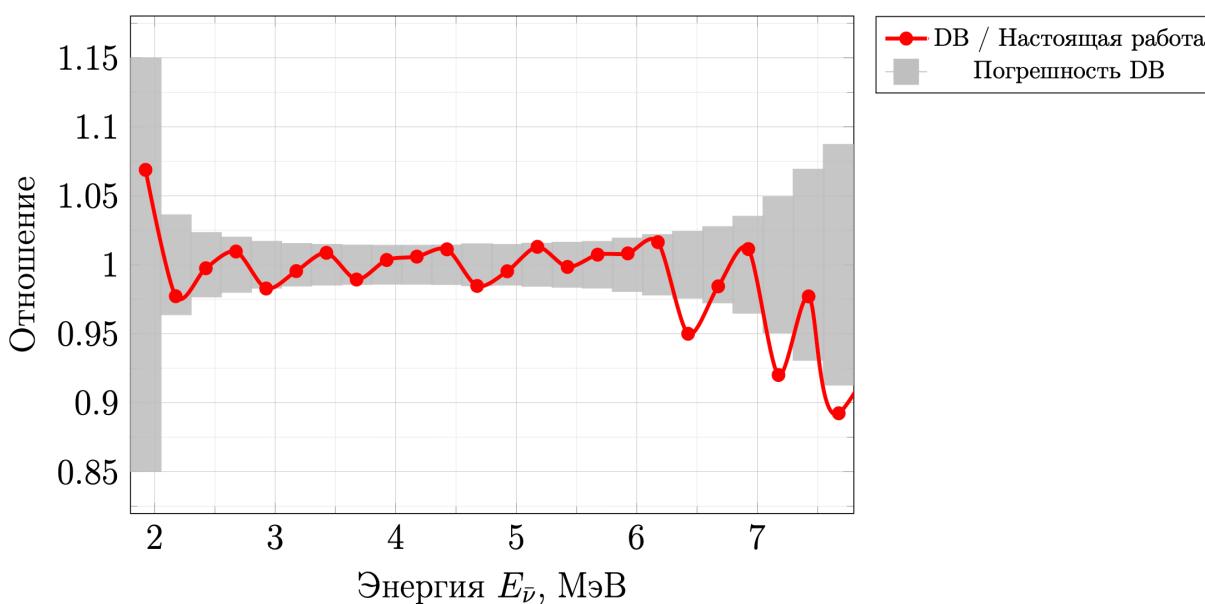


Рисунок 14 — Отношение экспериментального позитронного спектра (Daya Bay) от деления смеси изотопов к модельным позитронным спектрам

RENO

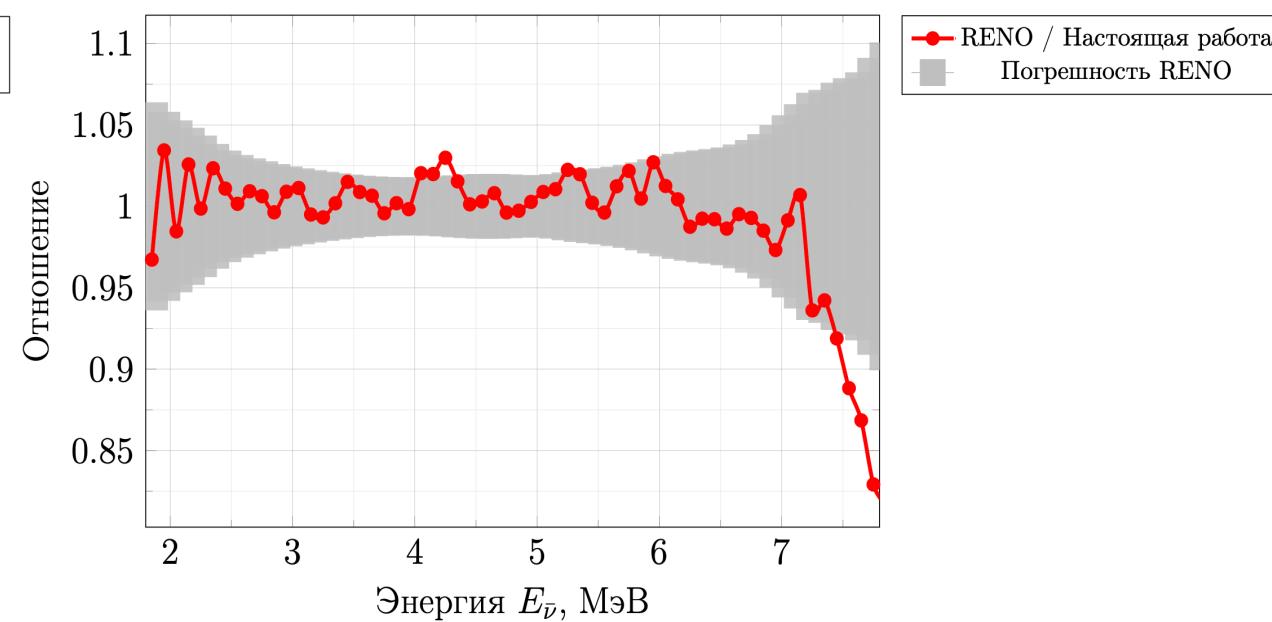
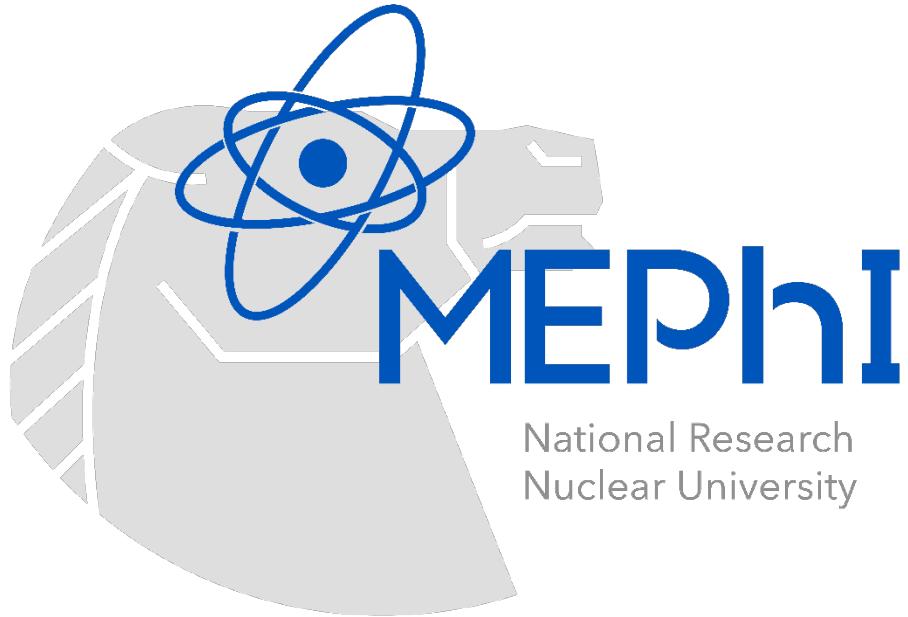


Рисунок 15 — Отношение экспериментального позитронного спектра (RENO) от деления смеси изотопов к модельным позитронным спектрам

- Были рассчитаны кумулятивные спектры антинейтрино продуктов деления основных изотопов, используемых в качестве топлива для ядерных реакторов. Были учтены запрещенность переходов и поправки на учет физических факторов, влияющих на процесс бета-распада;
- Были реконструированы спектры позитронов реакции обратного бета-распада для сравнения с реакторными экспериментами;
- Было проведено сравнение полученных в работе модельных спектров с конкурентной моделью и с экспериментальными данными;
- В связи с несоответствием модельных и экспериментальных спектров была предпринята попытка подгонки спектров путем варьирования кумулятивных выходов изотопов.

- Оптимизация метода минимизации функции отклонения χ^2 ;
- Расчет погрешностей;
- Выявление причин расхождения между модельными и экспериментальными данными.



Спасибо за
внимание!

Москва, 2025