

РАСЧЁТ СПЕКТРОВ АНТИНЕЙТРИНО И БЕТА-ЧАСТИЦ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ УРАНА И ПЛУТОНИЯ В РЕАКТОРАХ НА ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Зайцев В.Н.

Б22-102

Научный руководитель: Попов Д.В.

Москва, 2026

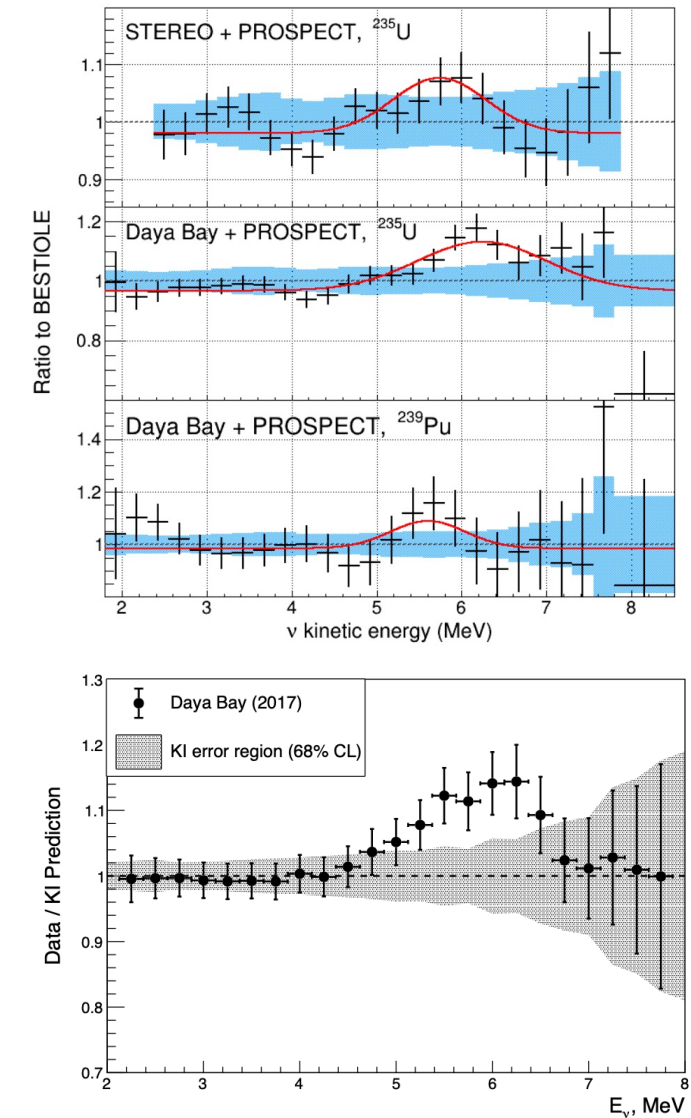


Актуальность:

Все существующие на данный момент модели спектров бета-частиц и антинейтрино имеют расхождения с экспериментально полученными значениями.

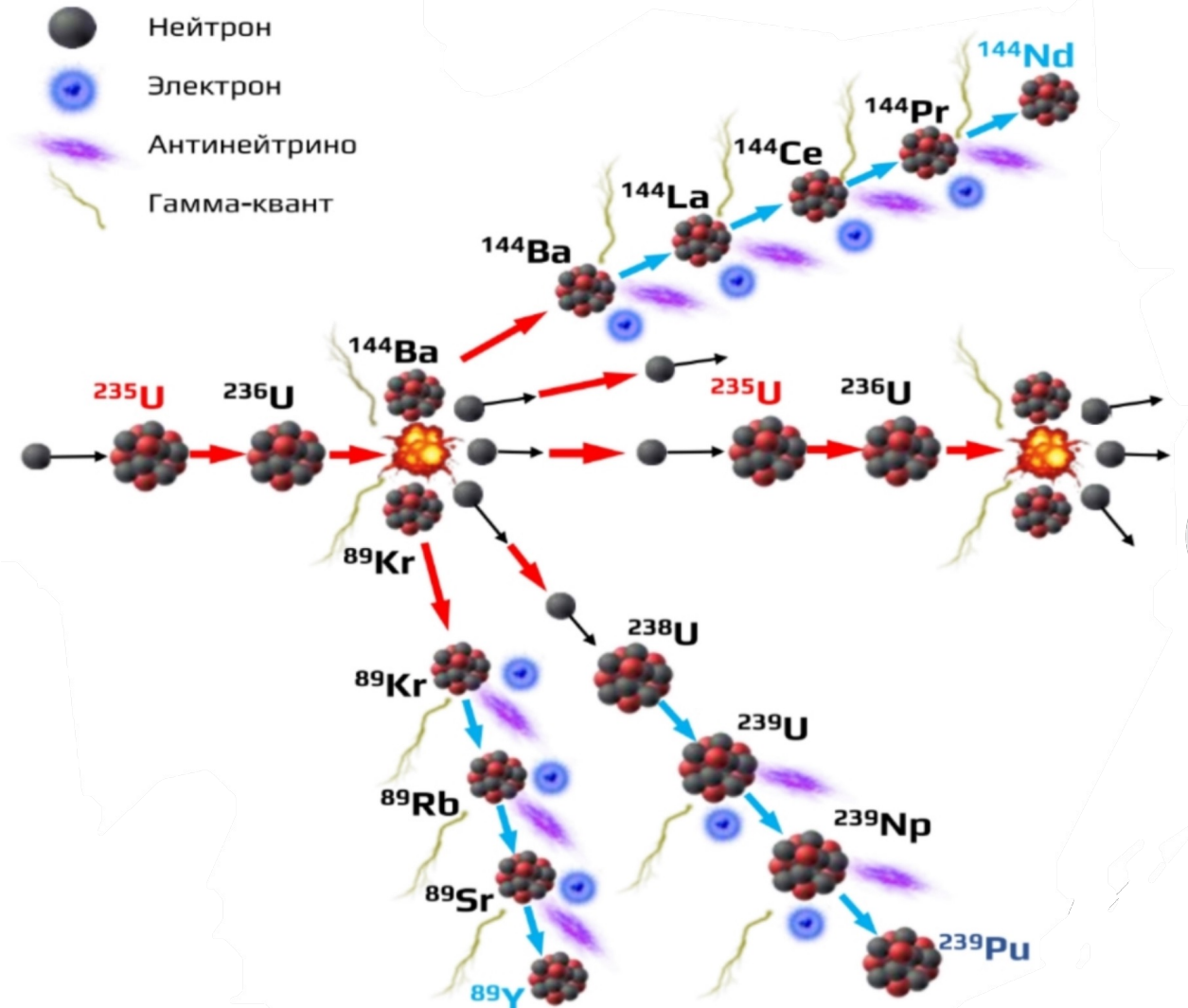
Причины расхождения позитронных спектров, получаемых из спектров антинейтрино, с экспериментальными в области порядка 5-7 МэВ (**«bump»-эффект**) все еще не установлены ни одной научной группой.

В связи с этим, актуальной темой является развитие новой теоретической модели расчета спектров методом прямого суммирования.



Формирование спектра реакторных антинейтрино

Деление изотопов U и Pu
(топливо для ядерных реакторов)

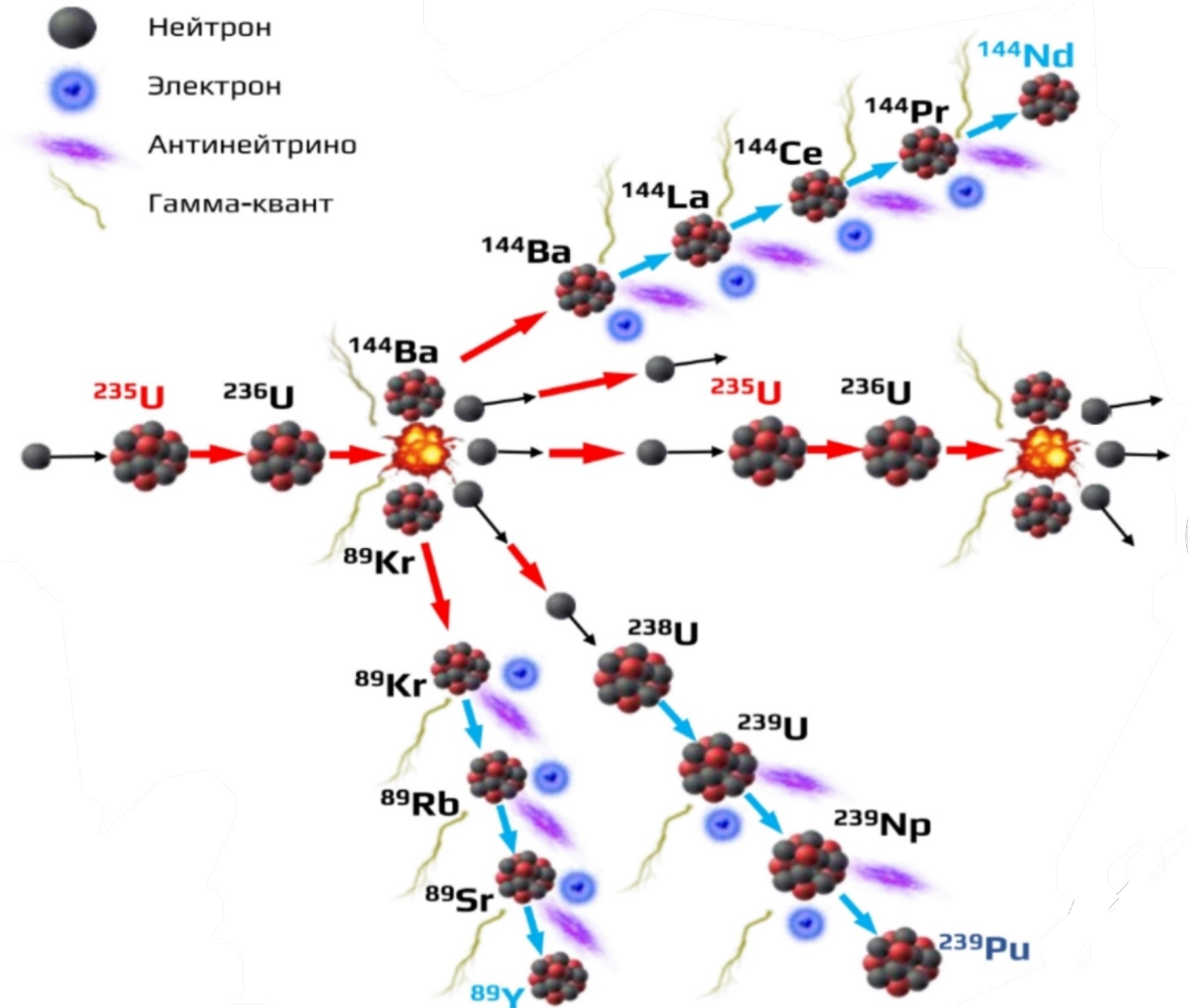


Формирование спектра реакторных антинейтрино

Деление изотопов U и Pu
(топливо для ядерных реакторов)



Образование нестабильных изотопов (бета-распадчики)

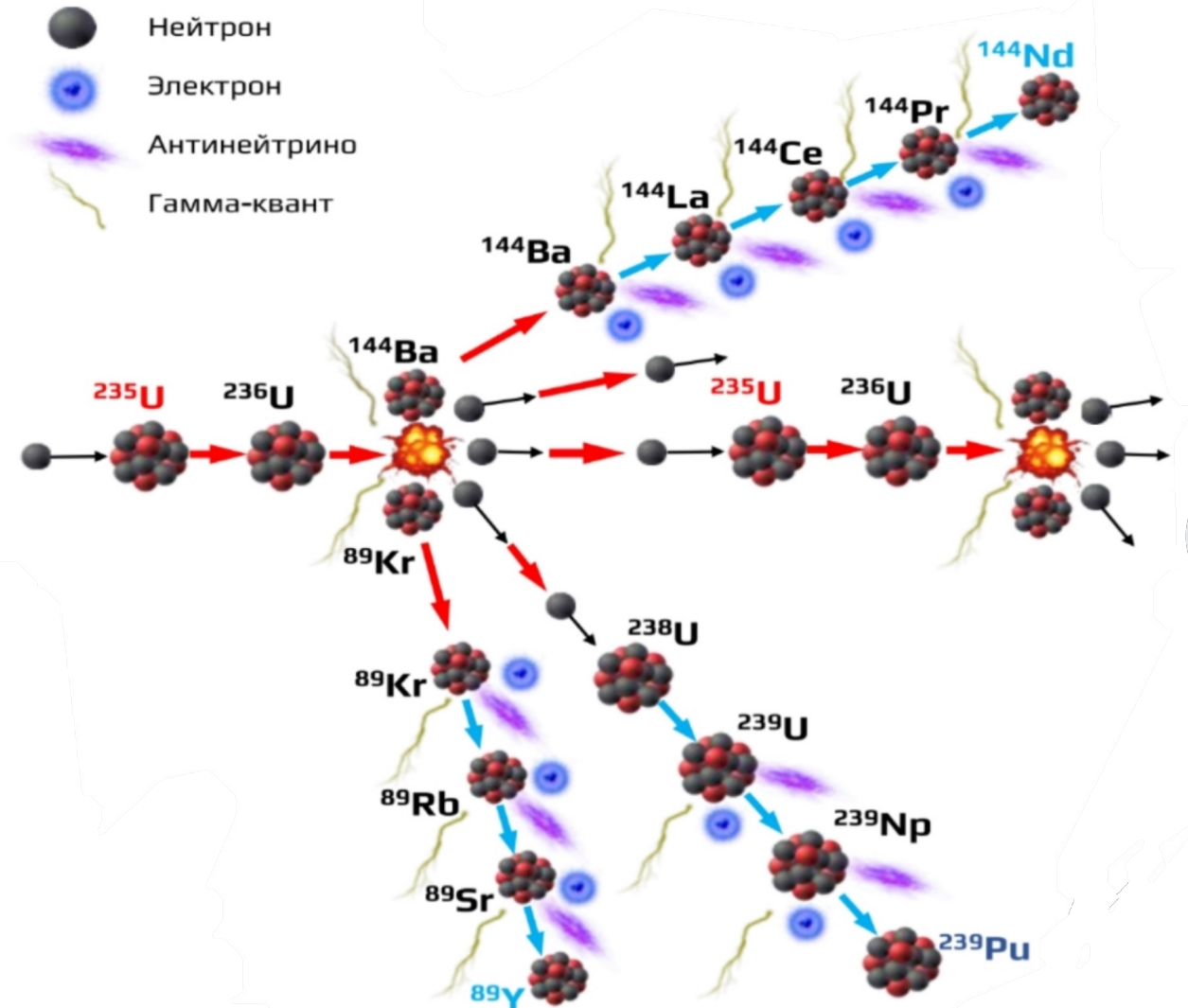


Формирование спектра реакторных антинейтрино

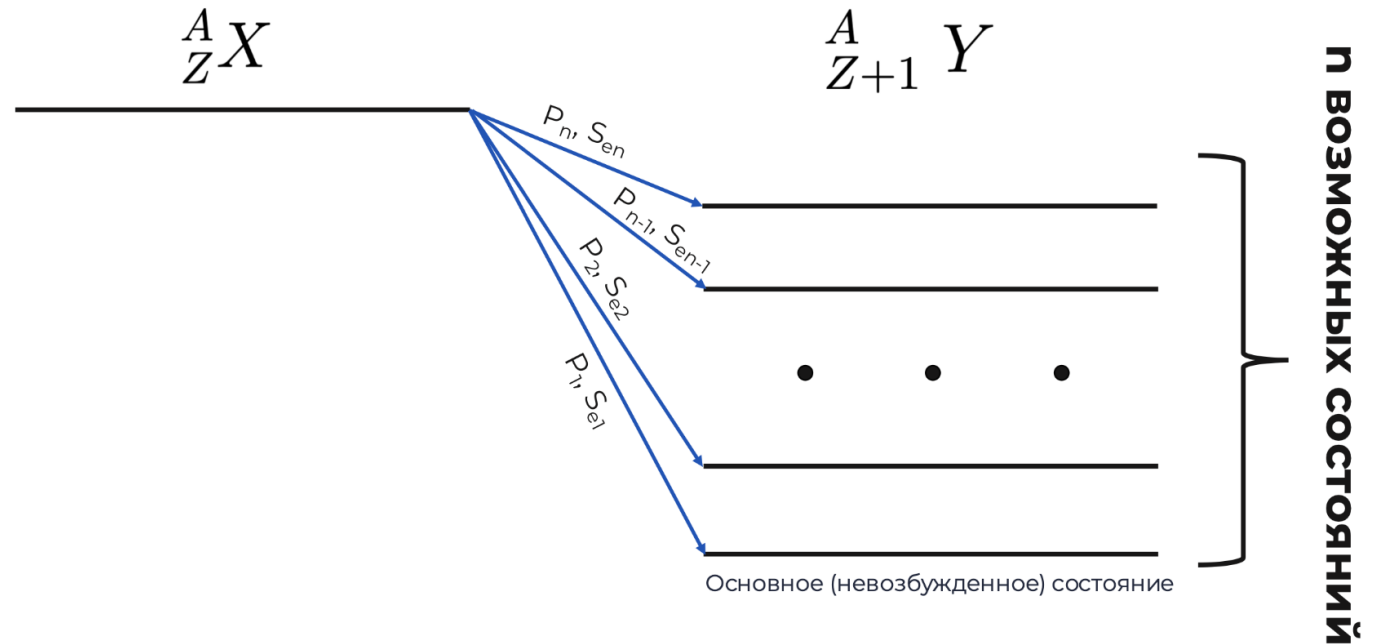
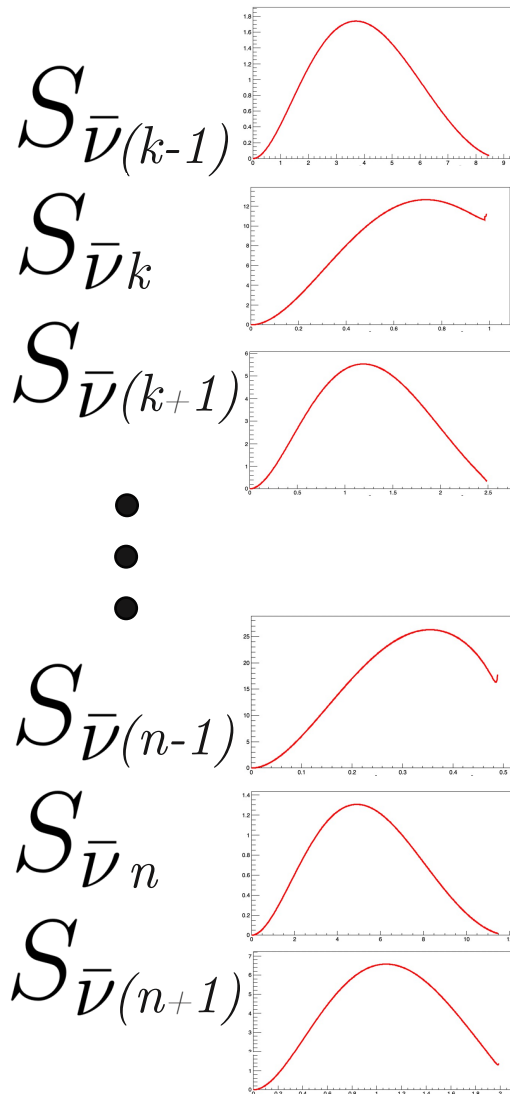
Деление изотопов U и Pu
(топливо для ядерных реакторов)

↓
Образование нестабильных изотопов (бета-распадчики)

↓
**Процесс бета-распада с
испусканием электрона и
антинейтрино**



Построение кумулятивного спектра

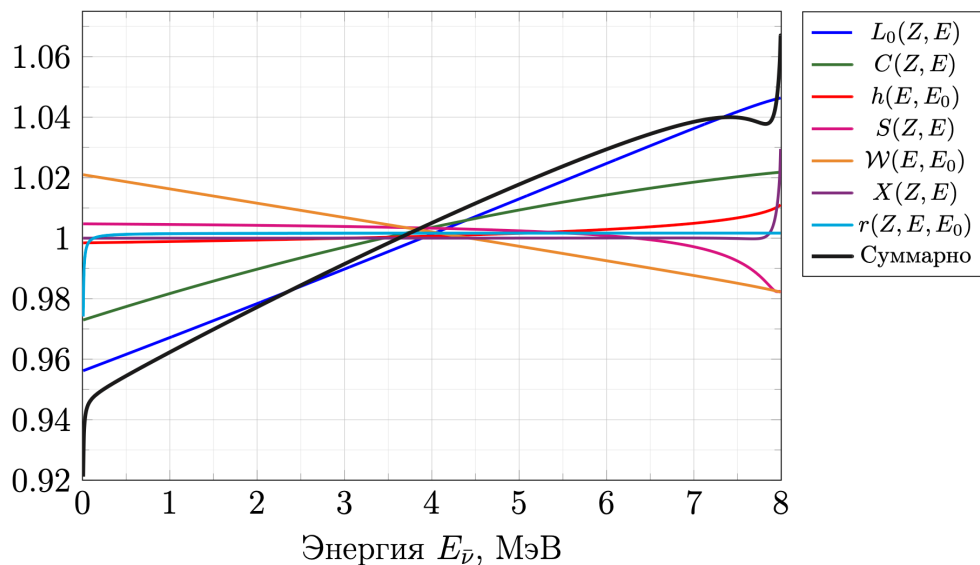
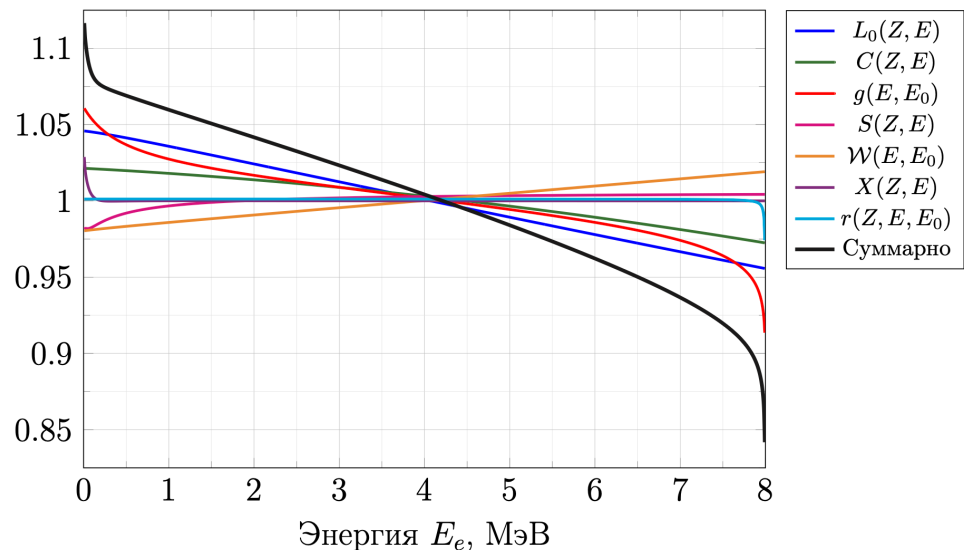
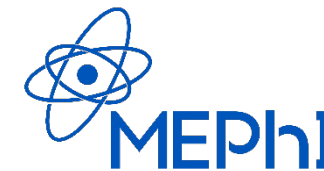


Вероятность перехода в единицу времени:

$$dW_{if} = \frac{1}{2\pi^3 \hbar^7 c^5} |\langle f | H | i \rangle|^2 \sqrt{E_e^2 - m^2 c^4} E_e (E_0 - E_e)^2 dE_e$$

~ 17.000 переходов

Учет поправок к спектрам β -частиц и антинейтрино



Вклады поправок в форму одиночного синтетического спектра ($Z=46$, $E_0 - m_e = 8$ МэВ)

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)	$\approx 6\%$ (β)
$h(E, E_0)$	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	$\approx 2\%$

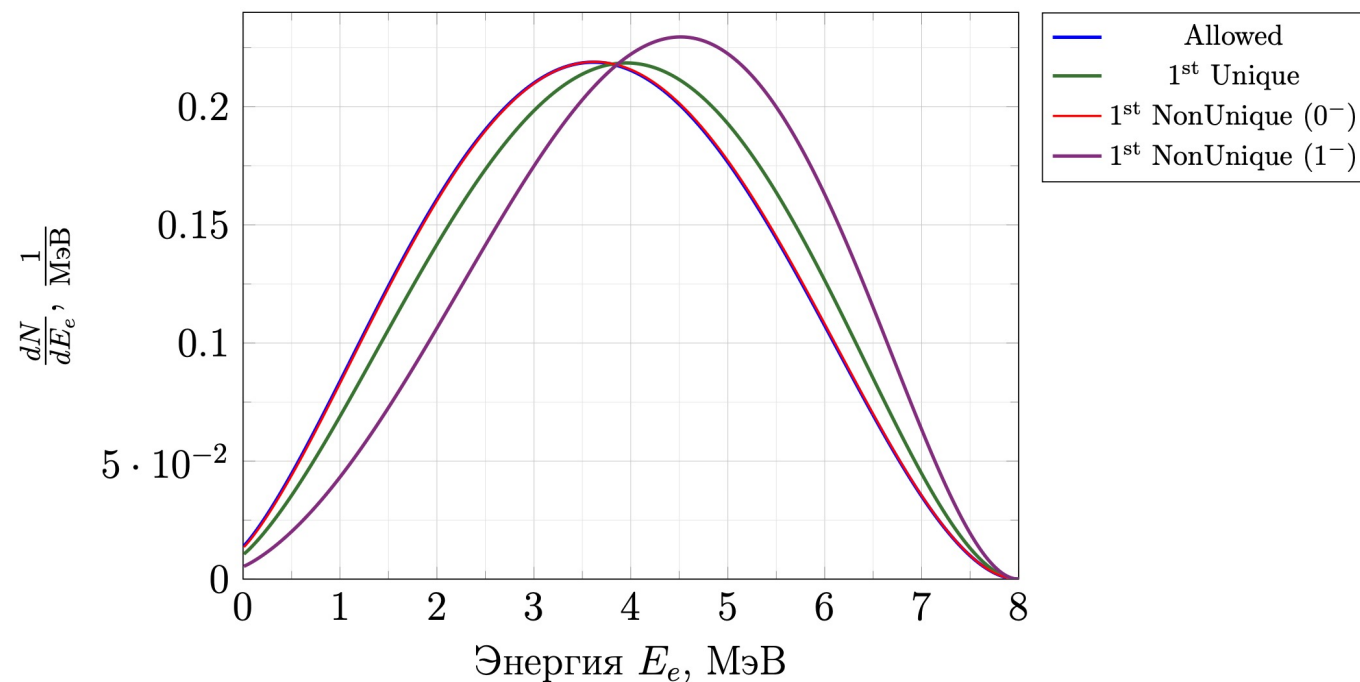
Таблица 1 — Сводная таблица используемых в настоящей работе поправок к спектрам β -частиц и антинейтрино

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%

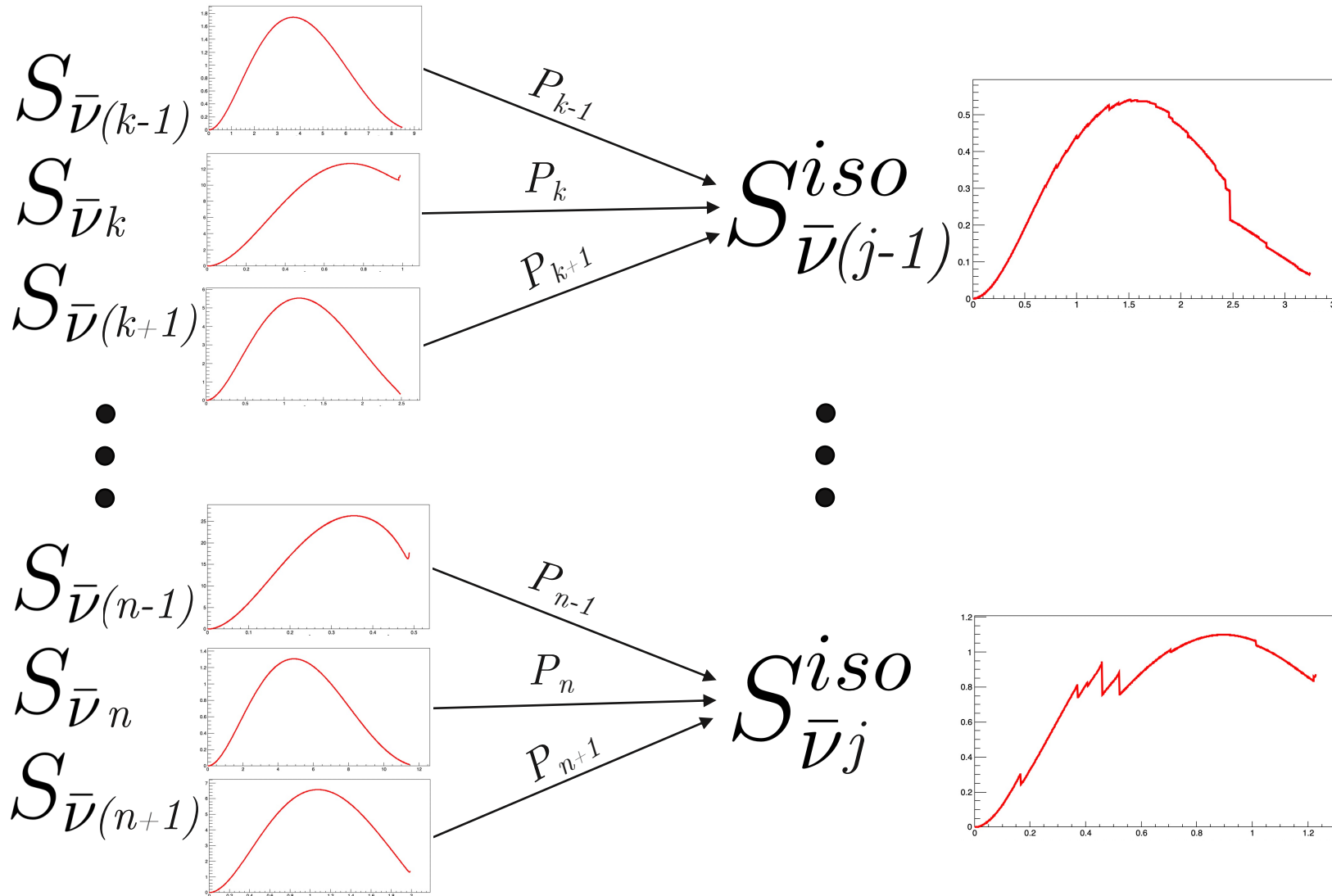
	3NU	4U	4NU	5NU	S	Неизвестный тип
²³⁵ U	0.47%	<0.01%	0.01%	0.03%	<0.01%	15.09%
²³⁸ U	0.29%	<0.01%	0.02%	0.06%	<0.01%	18.46%
²³⁹ Pu	0.20%	<0.01%	0.03%	0.02%	<0.01%	15.22%
²⁴¹ Pu	0.15%	<0.01%	0.04%	0.03%	0.01%	17.55%

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



Влияние степени и типа запрещенности на одиночный синтетический бета-спектр ($Z=46$, $E_0 - m_e = 8$ МэВ)

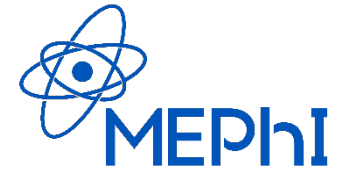
Построение кумулятивного спектра



~ 17.000 переходов

~ 800 ИЗОТОПОВ

Расчет ошибок спектров отдельных изотопов – метод Монте Карло



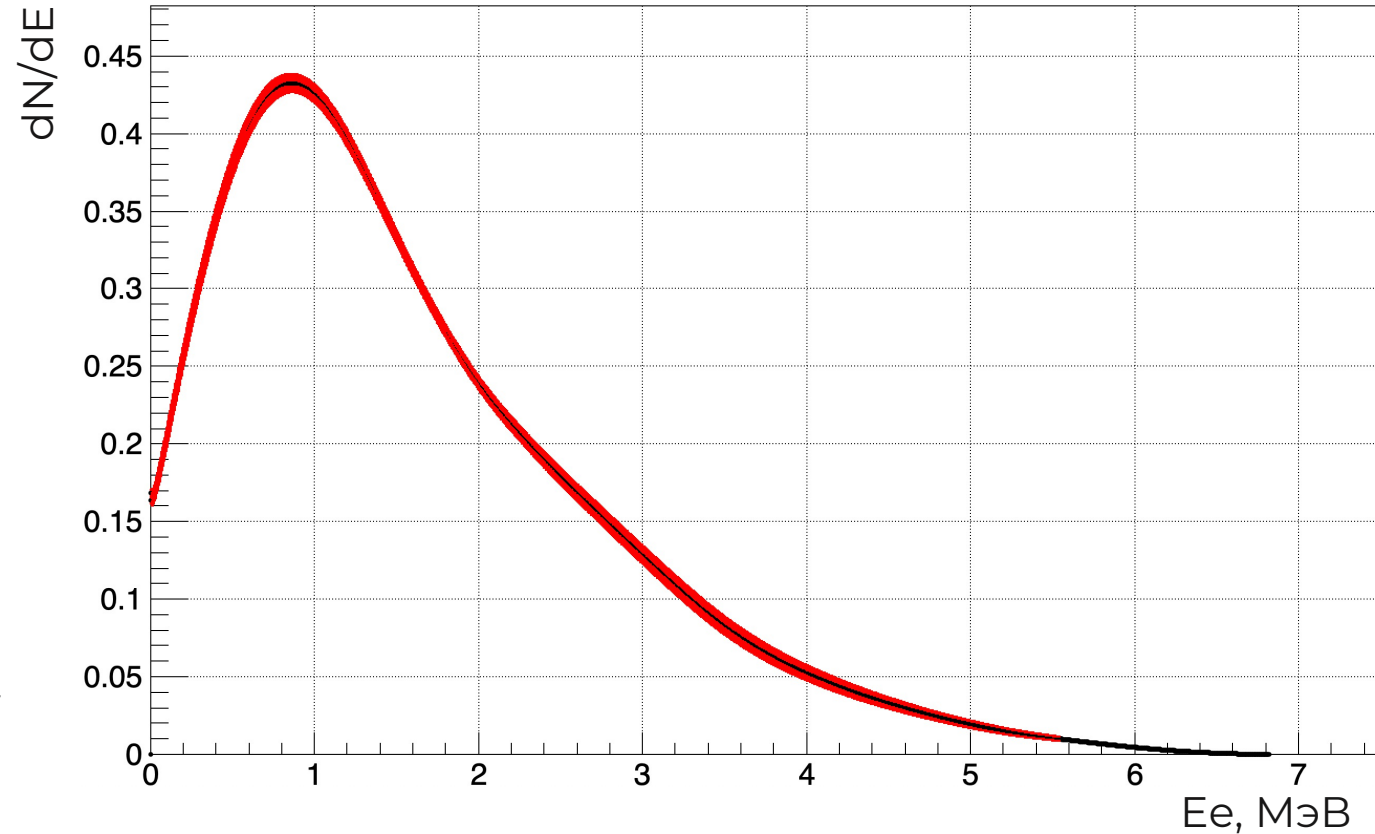
$$P_j \sim \mathcal{N}(P_j, \sigma_{P_j})$$

$$E_{0,j} \sim \mathcal{N}(E_{0,j}, \sigma_{E_{0,j}})$$

$$S^{iso}(E_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{(k)}^{iso}(E_i)$$

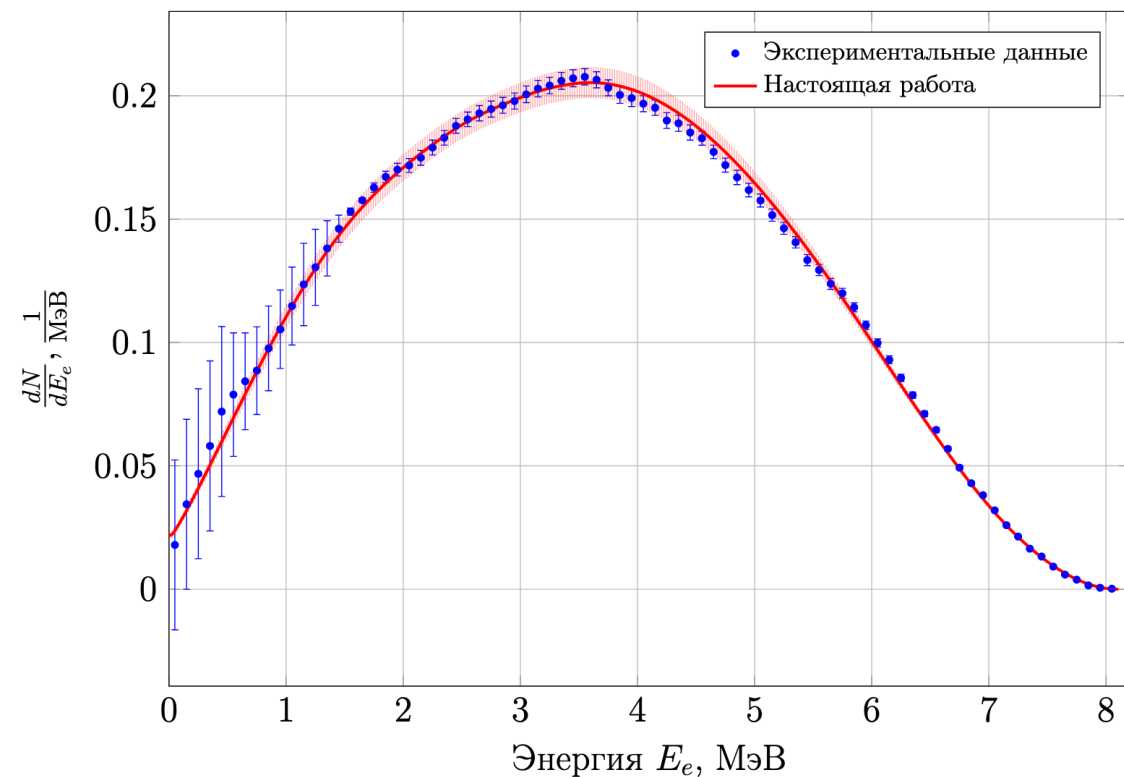
$$\sigma_{S^{iso}}(E_i) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(S_{(k)}^{iso}(E_i) - S^{iso}(E_i) \right)^2}$$

⁸⁷Br

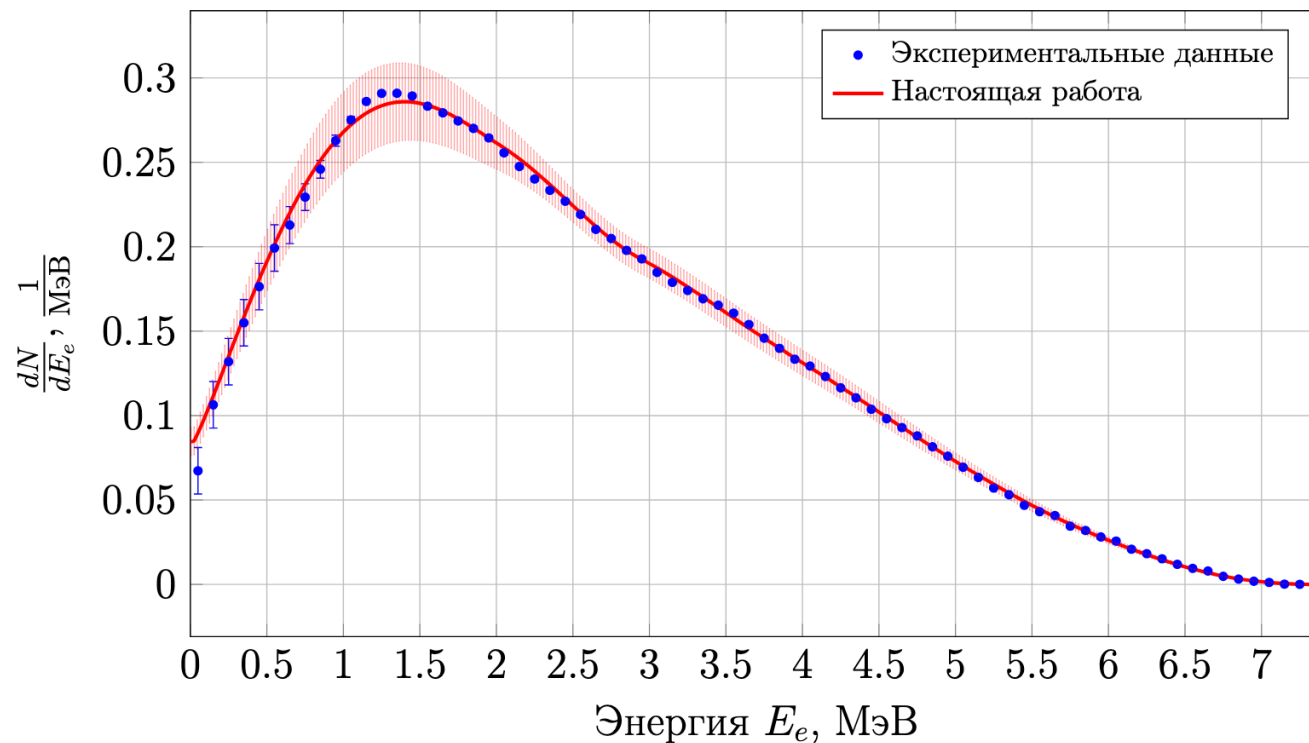


Спектр бета-частиц от распада ⁸⁷Br

Сравнение с экспериментом

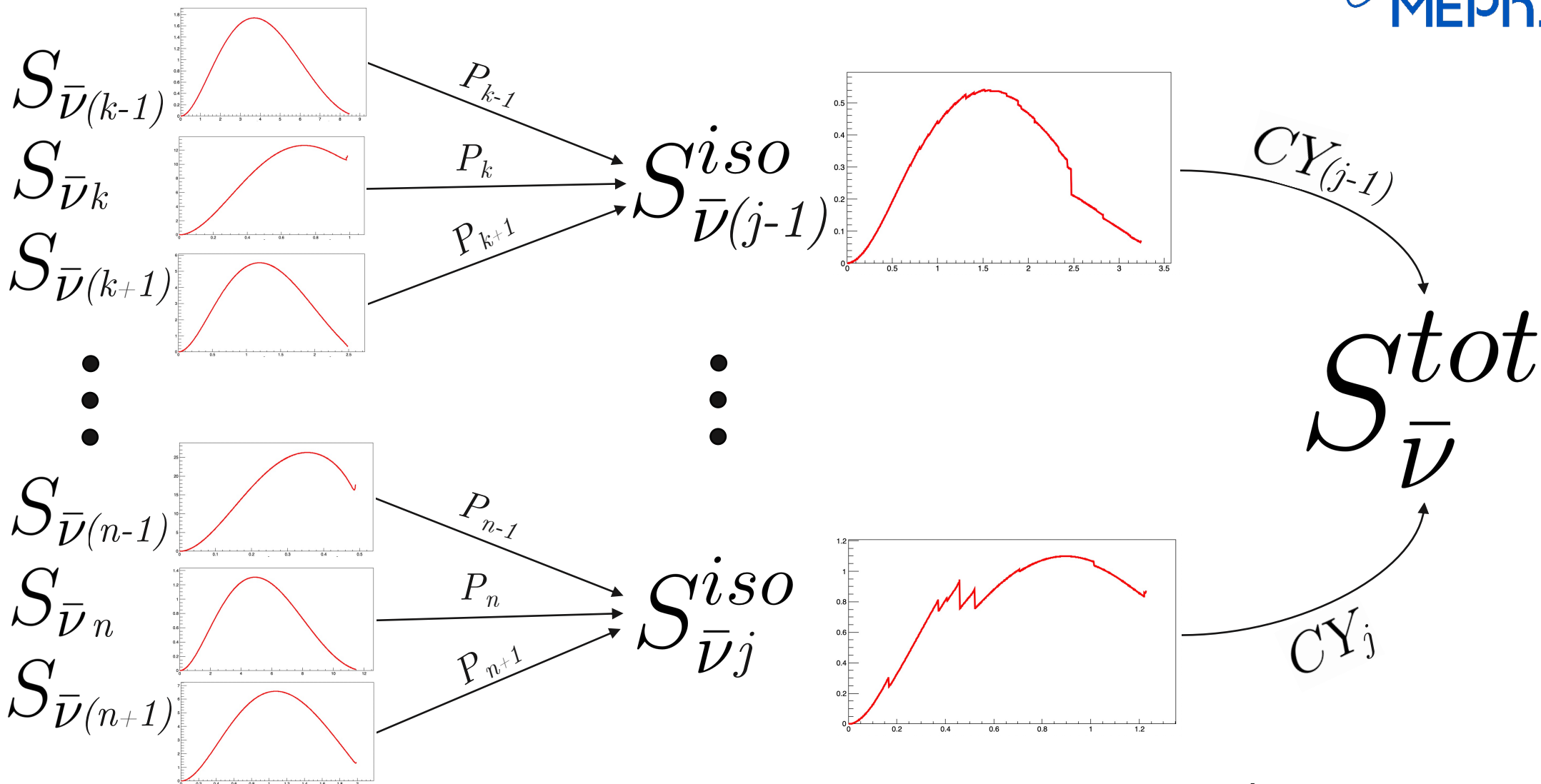


Спектр бета-частиц от распада ^{92}Rb



Спектр бета-частиц от распада ^{142}Cs

Построение кумулятивного спектра



~ 17.000 переходов

~ 800 изотопов

4 кумулятивных спектра

«Восстановление» неизвестных схем распадов

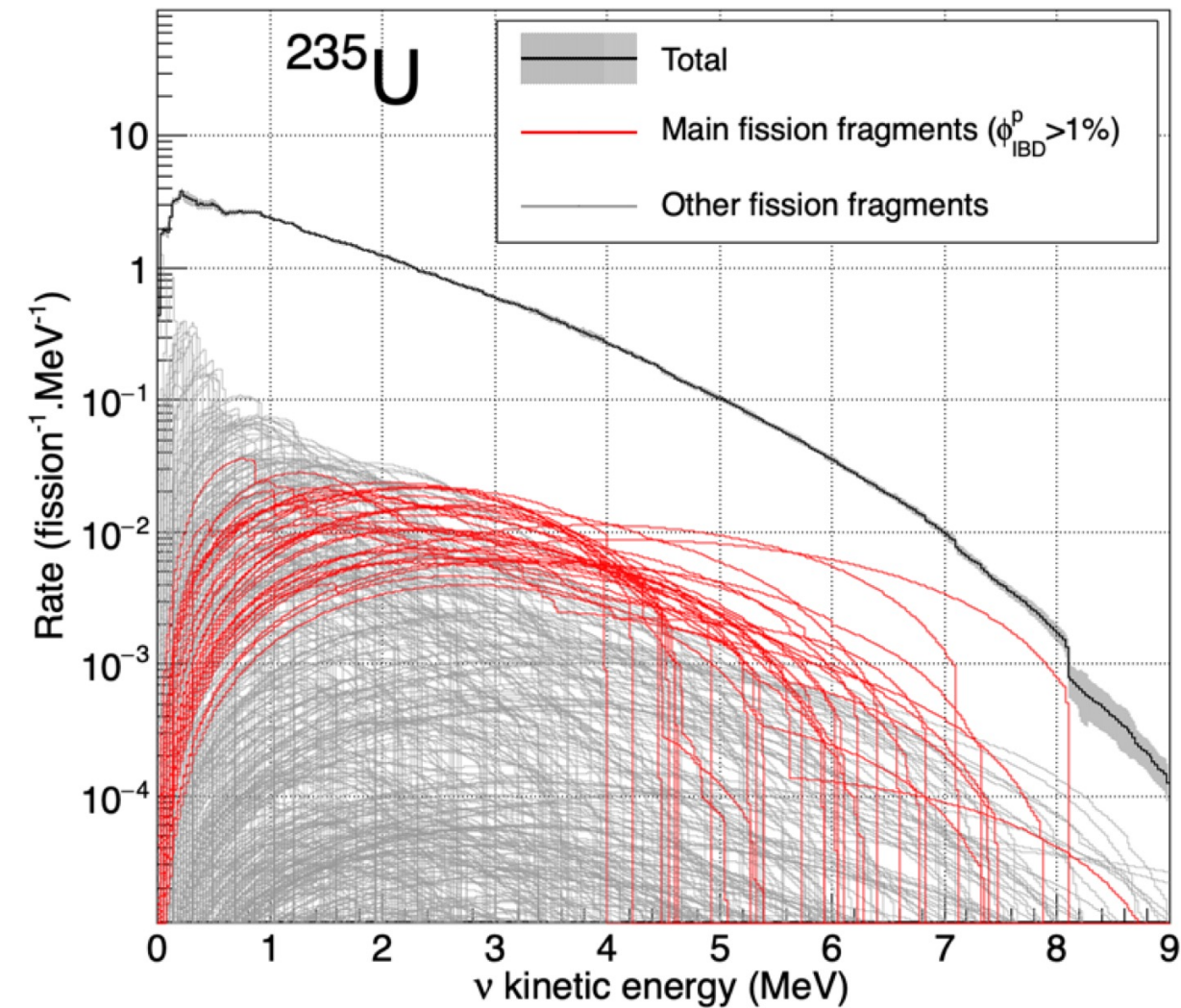
Из **~800 изотопов**, дающих вклад в кумулятивный спектр, для **~300** из них **неизвестны параметры распадов**.

Влияние на спектр: ~3-6% от общего кумулятивного спектра антинейтрино.

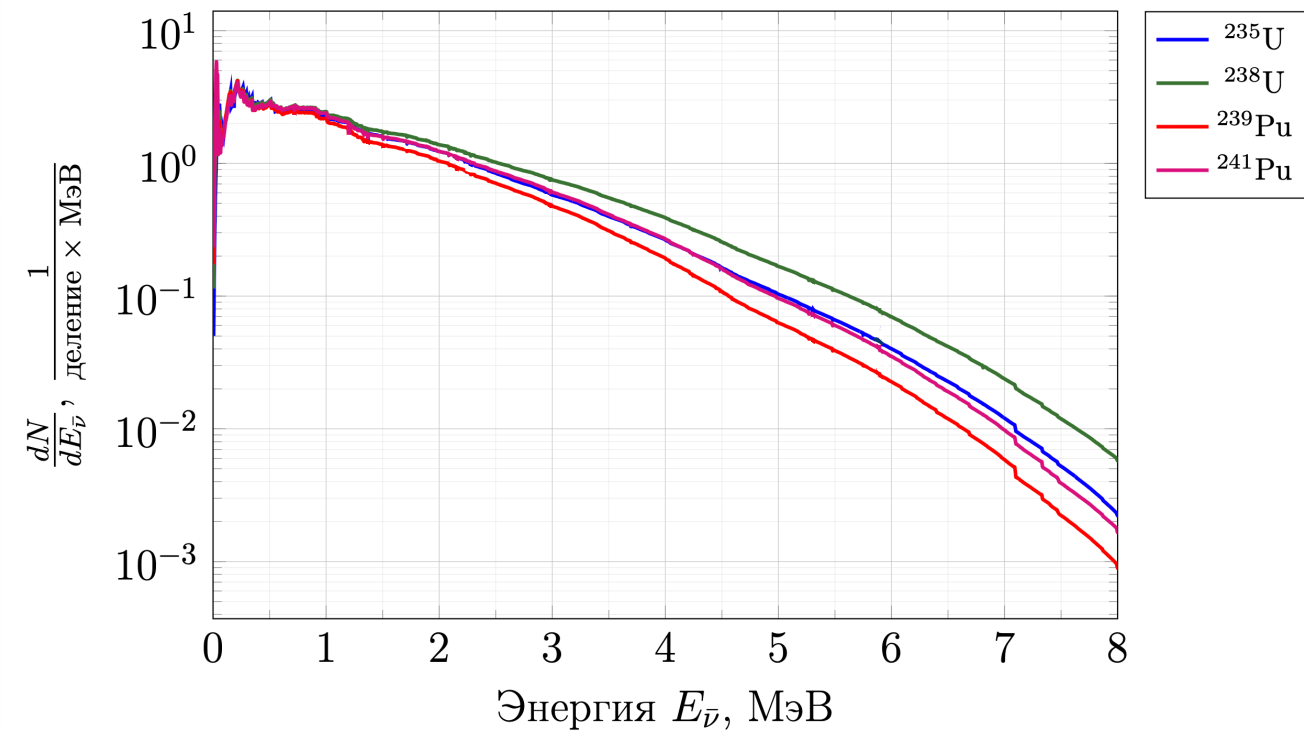
Основные допущения:

- Чем выше энергия распада – тем большим числом переходов предполагается описывать спектр;
- При особенно высоких энергиях распада у нейтрон-избыточных ядер учитывается наличие конкурентного канала – испускание нейтрона;
- У близких по заряду, массе и энергии распада ядер схемы распада полагаются схожими.

Построение кумулятивного спектра



$$S_{\bar{\nu}}^{\text{tot}} = \sum_j \text{CY}(Z, A) S_{\bar{\nu}j}^{\text{iso}}$$



Кумулятивные спектры
antineйтрино

Расчет ошибок кумулятивных спектров – метод Монте-Карло



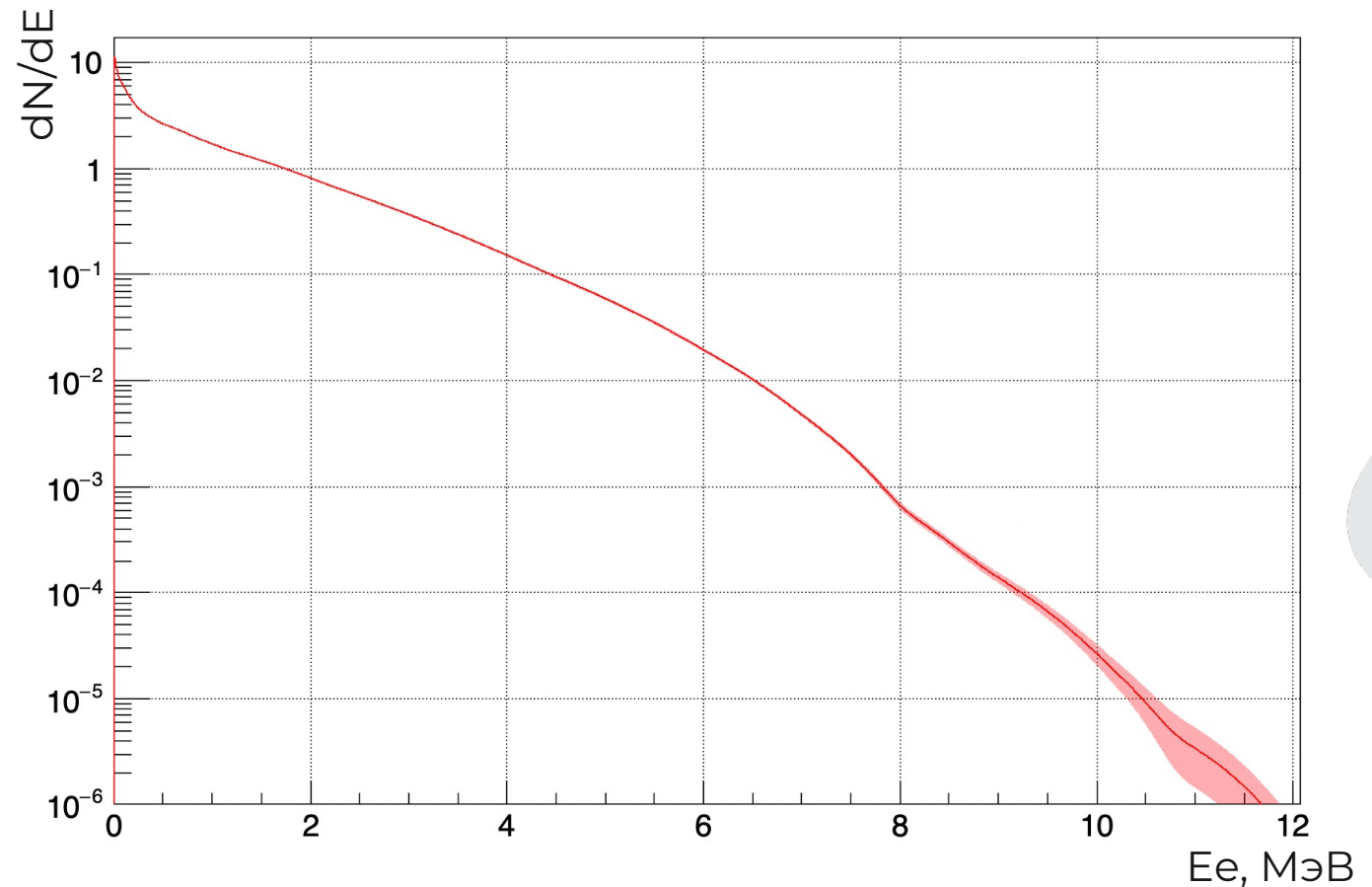
$$Y_j^{(k)} \sim \mathcal{N}(Y_j, \sigma_{Y_j})$$

$$S_{(k)}^{iso} \sim \mathcal{N}(S^{iso}, \sigma_{S^{iso}})$$

$$S^{tot} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{(k)}^{tot}$$

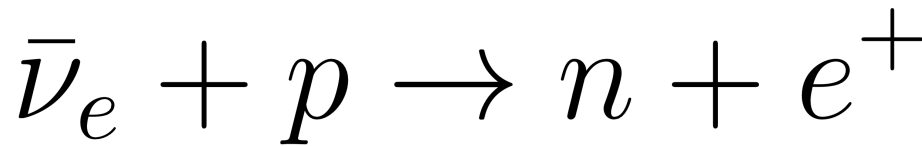
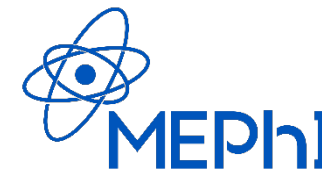
$$\sigma_{S^{tot}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(S_{(k)}^{tot} - S^{tot} \right)^2}$$

²³⁵U



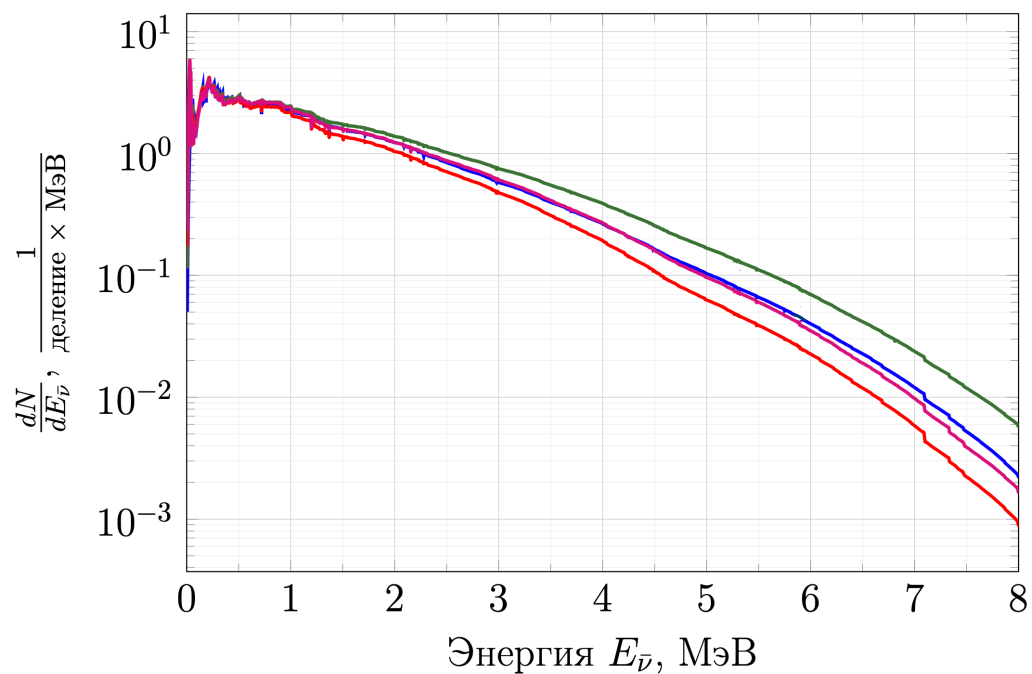
Кумулятивный спектр бета-частиц
продуктов деления ²³⁵U

Реконструирование позитронного спектра

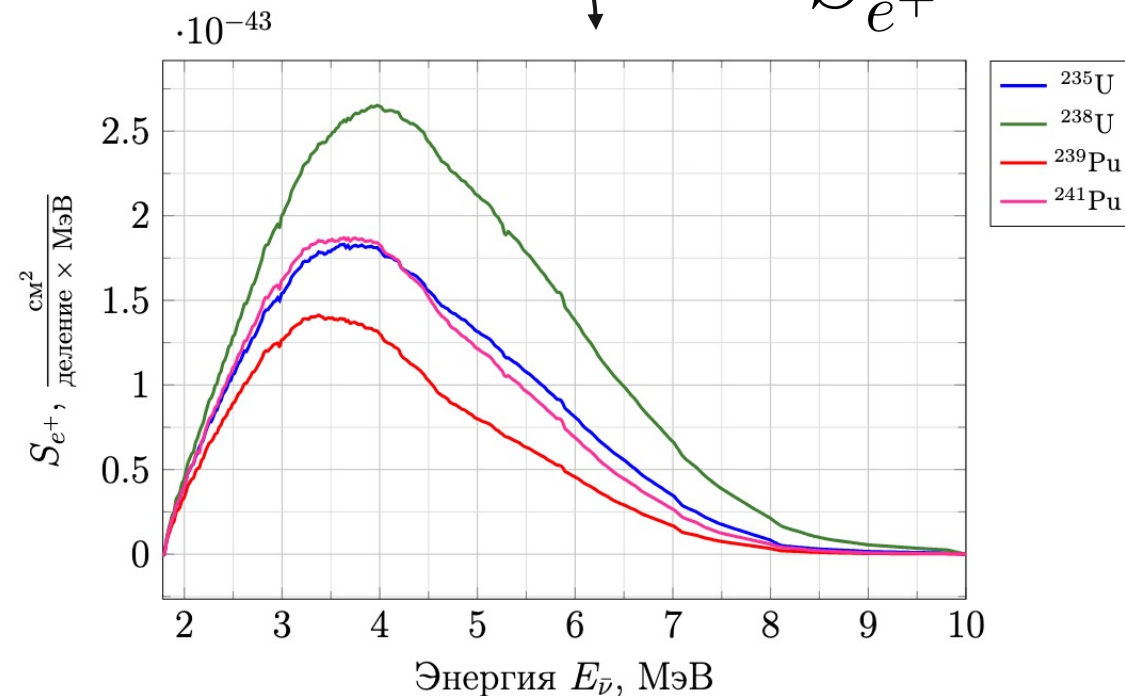


$S_{\bar{\nu}}$ ^{tot}

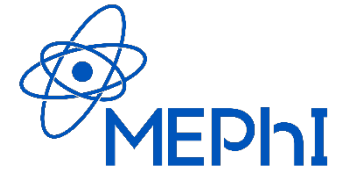
S_{e^+}



σ_{IBD}

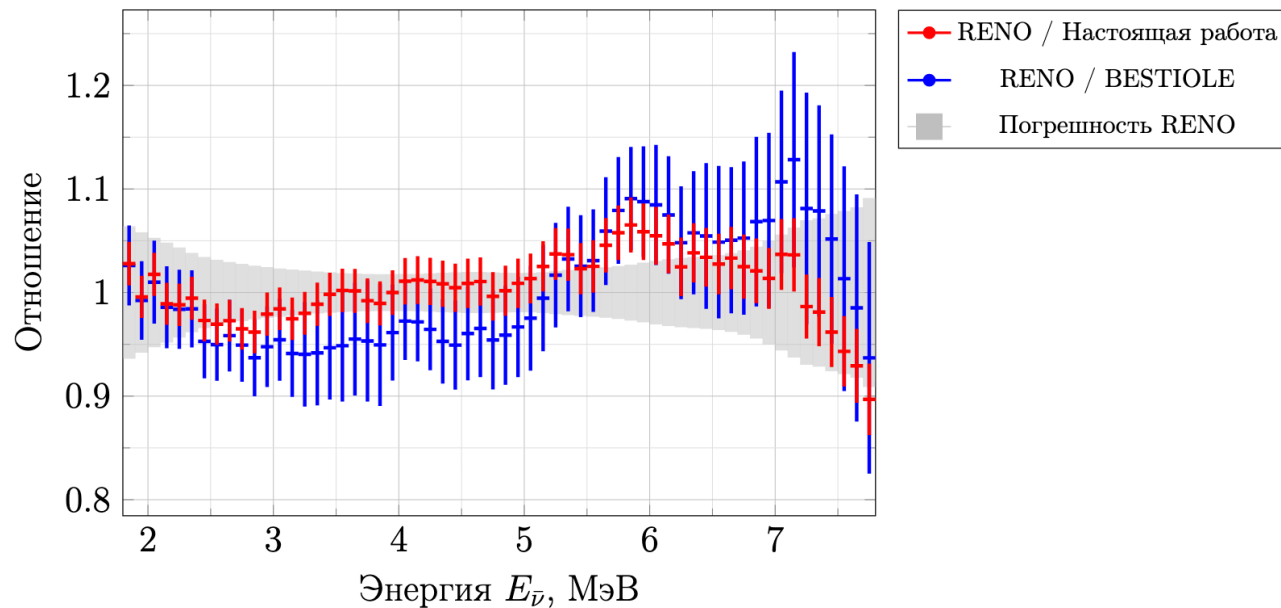


Сравнение спектров с экспериментом



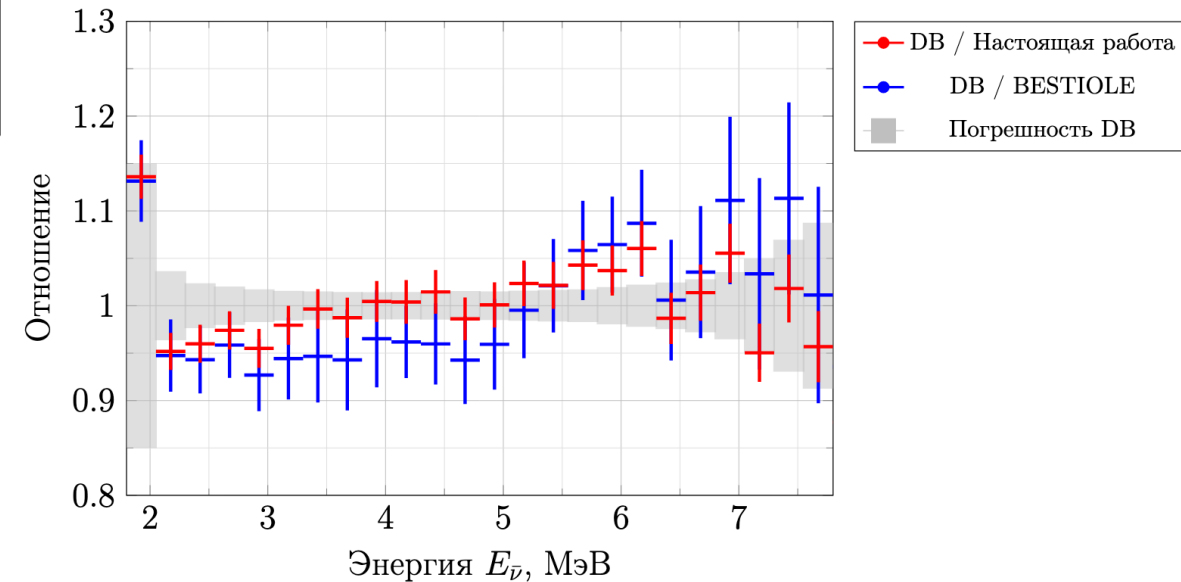
Сравнение позитронных спектров с экспериментами Daya Bay и RENO.

RENO



Отношение экспериментального позитронного спектра (RENO) к модельным позитронным спектрам

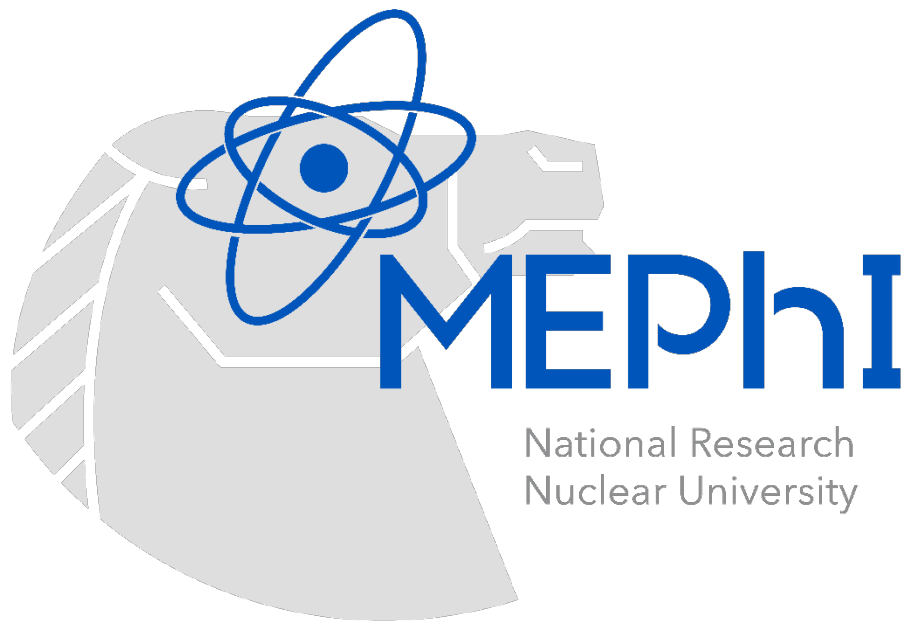
Daya Bay



Отношение экспериментального позитронного спектра (Daya Bay) к модельным позитронным спектрам

- Была **«восстановлена» библиотека** неизвестных схем бета-распадов изотопов;
- Были рассчитаны **кумулятивные спектры антинейтрино** продуктов деления тепловыми нейтронами основных изотопов, используемых в качестве топлива для ядерных реакторов;
- Были рассчитаны **ошибки** спектров отдельных изотопов и кумулятивных спектров;
- Была проведена **валидация** полученных в работе модельных спектров;
- Показано, что полученная модель является **самой точной расчетной моделью из существующих** на момент представления работы и может быть использована для дальнейших расчетов кумулятивных спектров от деления изотопов **быстрыми нейтронами**.

1. Moscow International School of Physics 2026, HSE Study Center "Voronovo", 25 февраля - 4 марта 2026 - "Development of a model for calculating the dynamics of the energy spectrum of beta particles and antineutrinos of nuclear fission products"
2. XIII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», НИЯУ МИФИ, 21-23 апреля 2026 - "Расчёт кумулятивных спектров бета-частиц и антинейтрино продуктов деления урана и плутония методом прямого суммирования"



**Спасибо за
внимание!**

Москва, 2026