

Выпускная квалификационная работа бакалавра



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

Выполнил: **Зайцев В.Н.**^{1,2}

Группа: Б22-102

Научный руководитель: **Попов Д.В.**^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт»

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»



Цель:

Расчет спектров бета-частиц и антинейтрино продуктов деления изотопов в активной зоне реактора методом прямого суммирования

Актуальность:

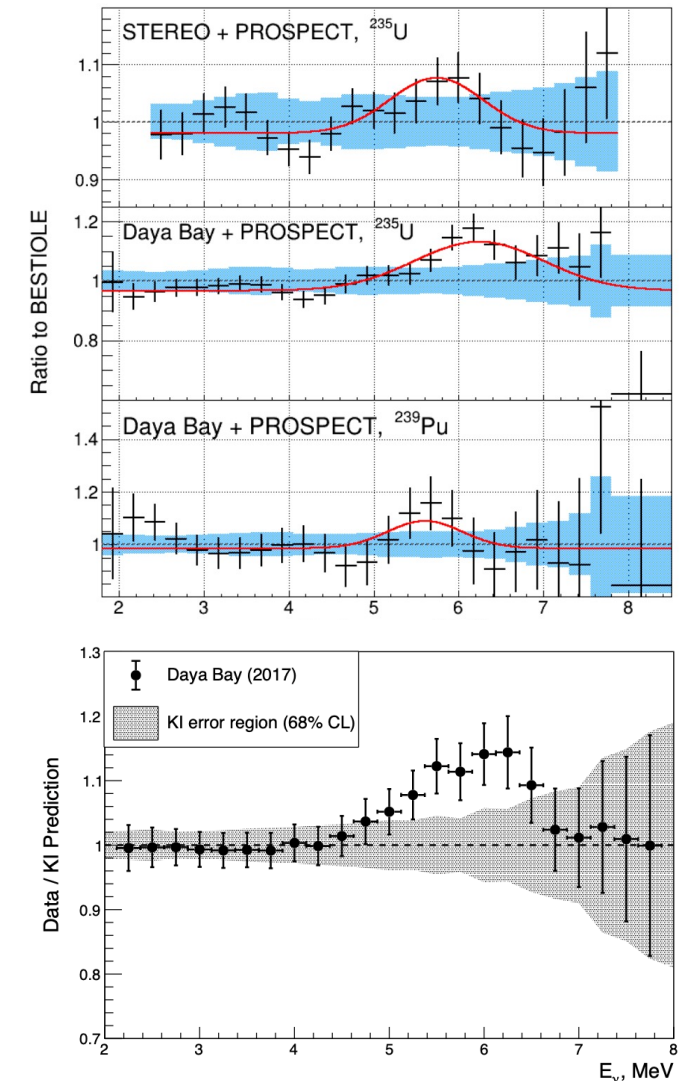
При сопоставлении с существующими моделями наблюдаются:

- Реакторная антинейтринная аномалия (дефицит наблюдаемого потока антинейтрино)
- «Бамп-эффект» – локальный избыток событий в области энергий 5-7 МэВ



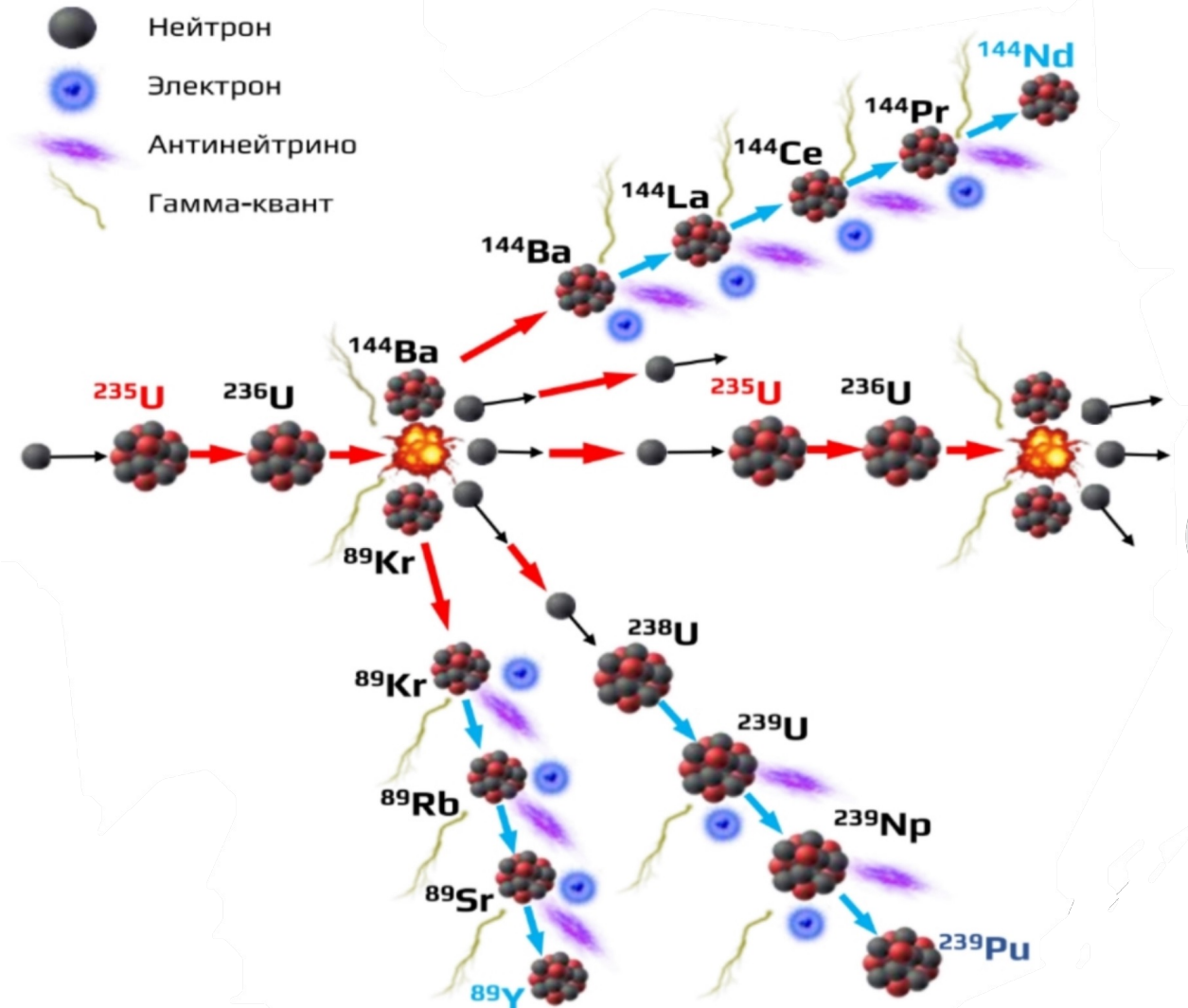
Эти эффекты осложняют интерпретацию экспериментальных данных

- Фундаментальная физика (нейтринные осцилляции, иерархия масс нейтрино)
- Поиск новой физики (стерильные нейтрино)
- Прикладные исследования (мониторинг ядерного реактора нейтринным методом)



Формирование спектра реакторных антинейтрино

Деление изотопов U и Pu
(топливо для ядерных реакторов)

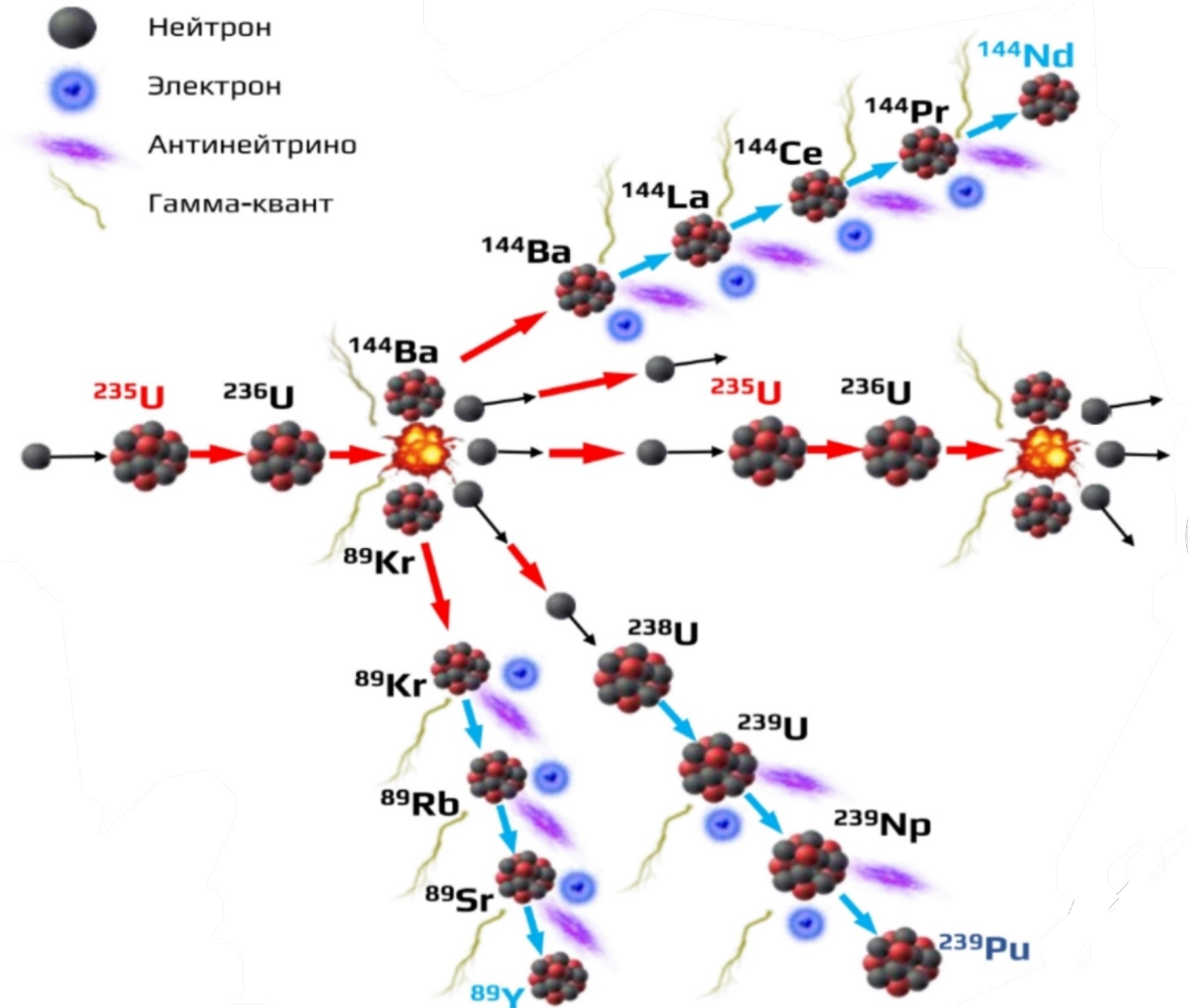


Формирование спектра реакторных антинейтрино

Деление изотопов U и Pu
(топливо для ядерных реакторов)



Образование нестабильных изотопов (бета-распадчики)

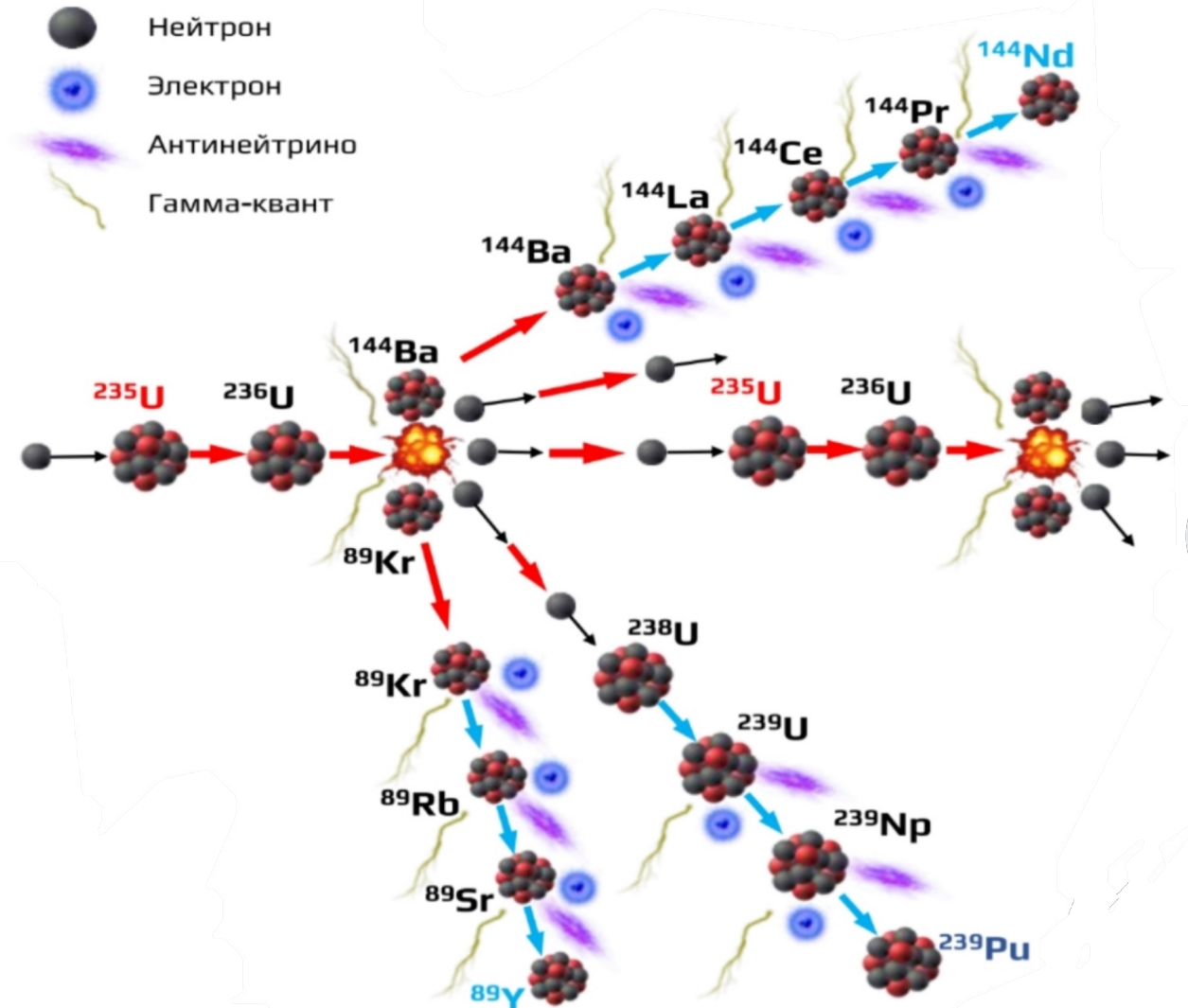


Формирование спектра реакторных антинейтрино

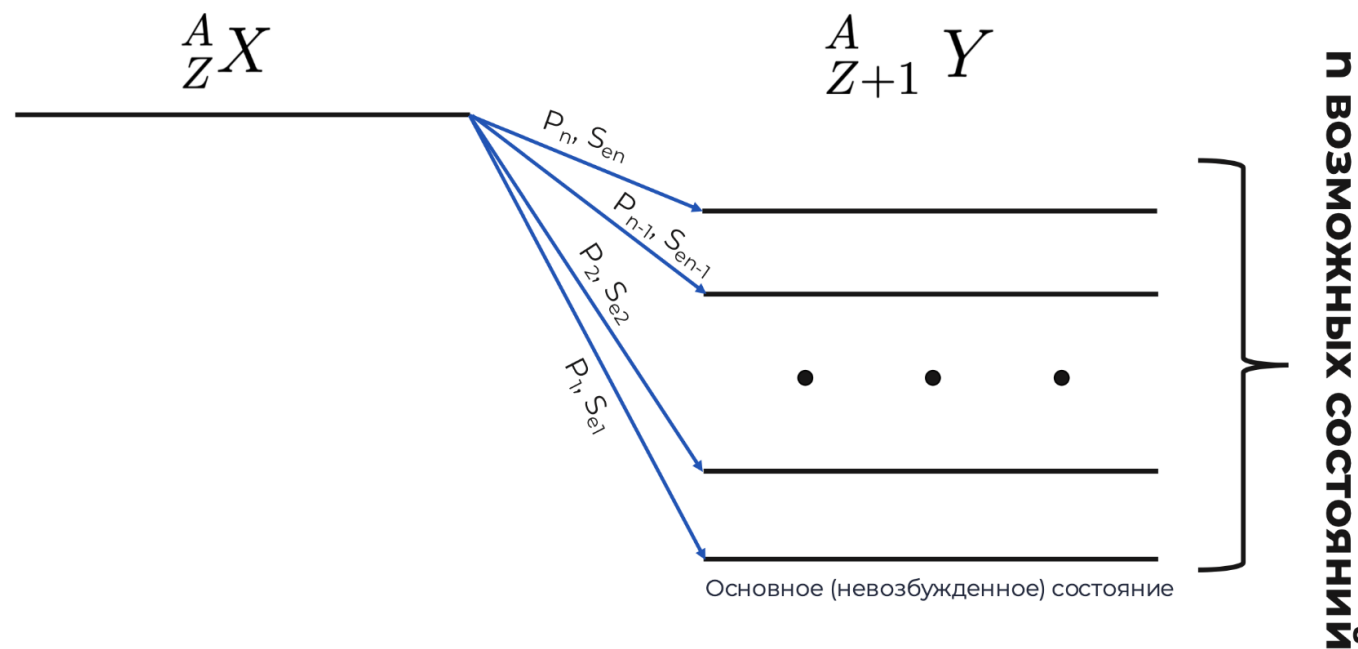
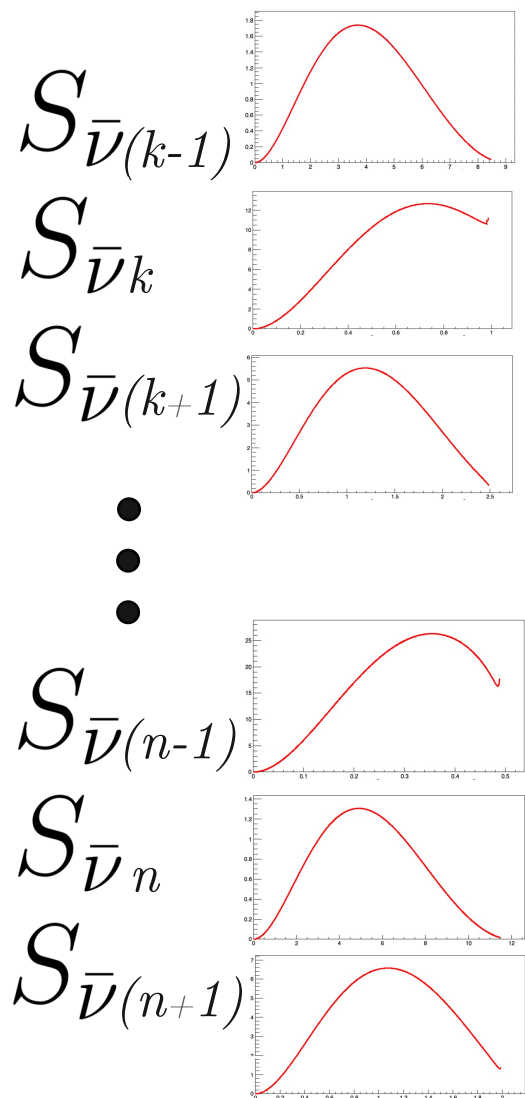
Деление изотопов U и Pu
(топливо для ядерных реакторов)

↓
Образование нестабильных изотопов (бета-распадчики)

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



Построение кумулятивного спектра

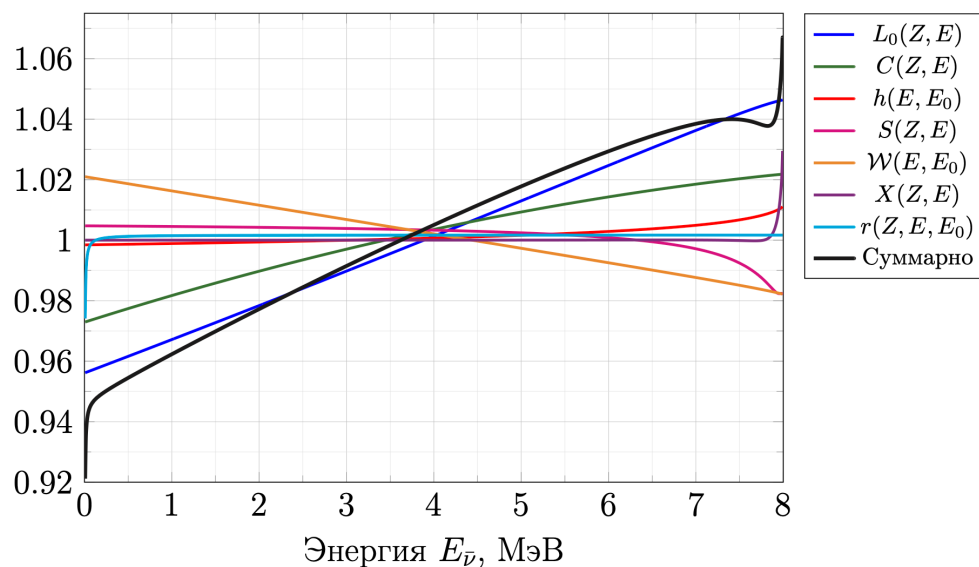
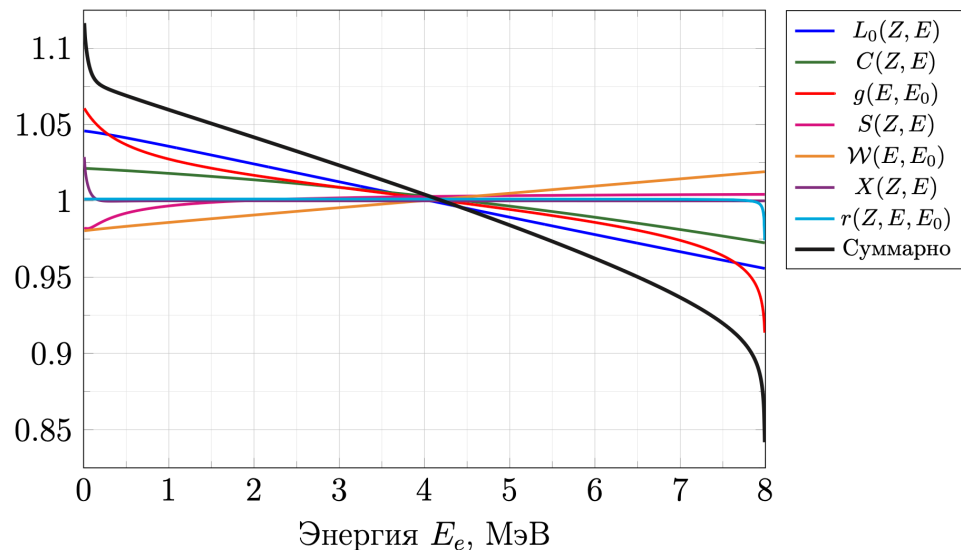
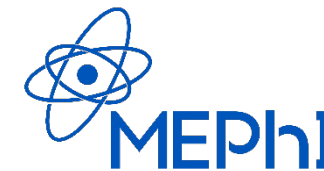


Вероятность перехода в единицу времени:

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

~ 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	$\approx 2\%$

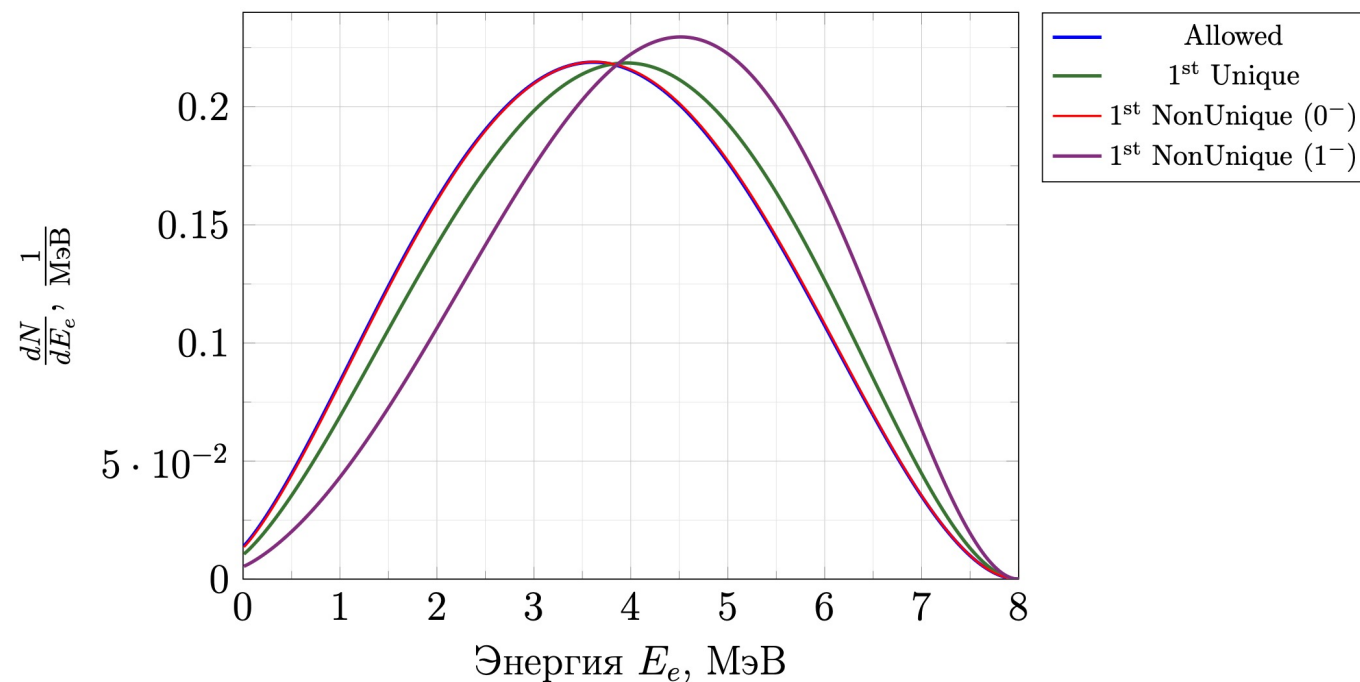
Таблица 1 — Сводная таблица используемых в настоящей работе поправок к спектрам β -частиц и антинейтрино

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%

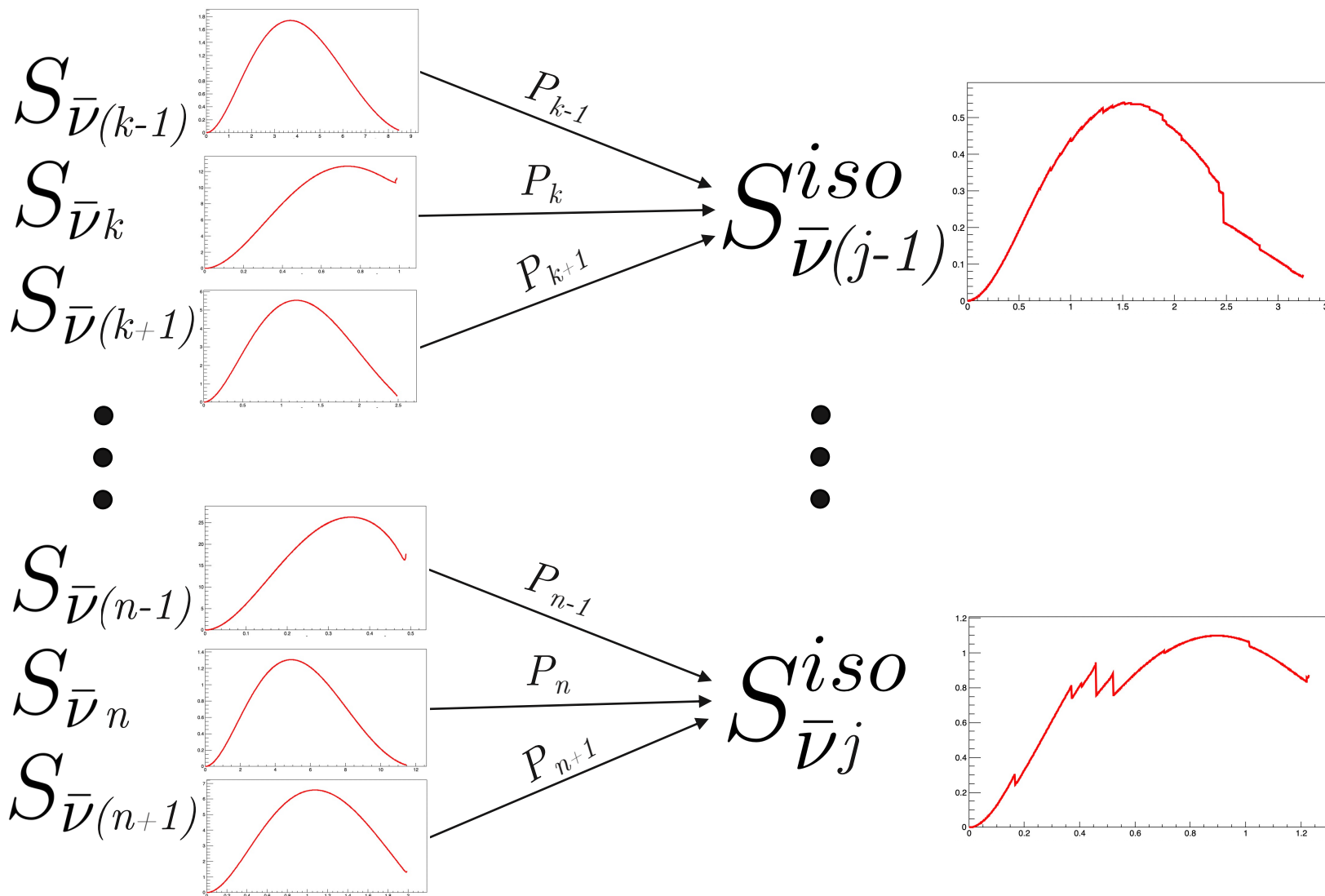
	3NU	4U	4NU	5NU	S	Неизвестный тип
²³⁵ U	0.47%	<0.01%	0.01%	0.03%	<0.01%	15.09%
²³⁸ U	0.29%	<0.01%	0.02%	0.06%	<0.01%	18.46%
²³⁹ Pu	0.20%	<0.01%	0.03%	0.02%	<0.01%	15.22%
²⁴¹ Pu	0.15%	<0.01%	0.04%	0.03%	0.01%	17.55%

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)

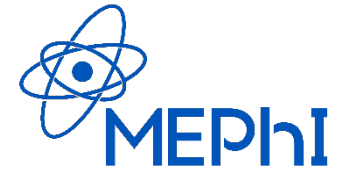
Построение кумулятивного спектра



~ 17.000 переходов

~ 800 изотопов

Расчет ошибок спектров отдельных изотопов – метод Монте Карло



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

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

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

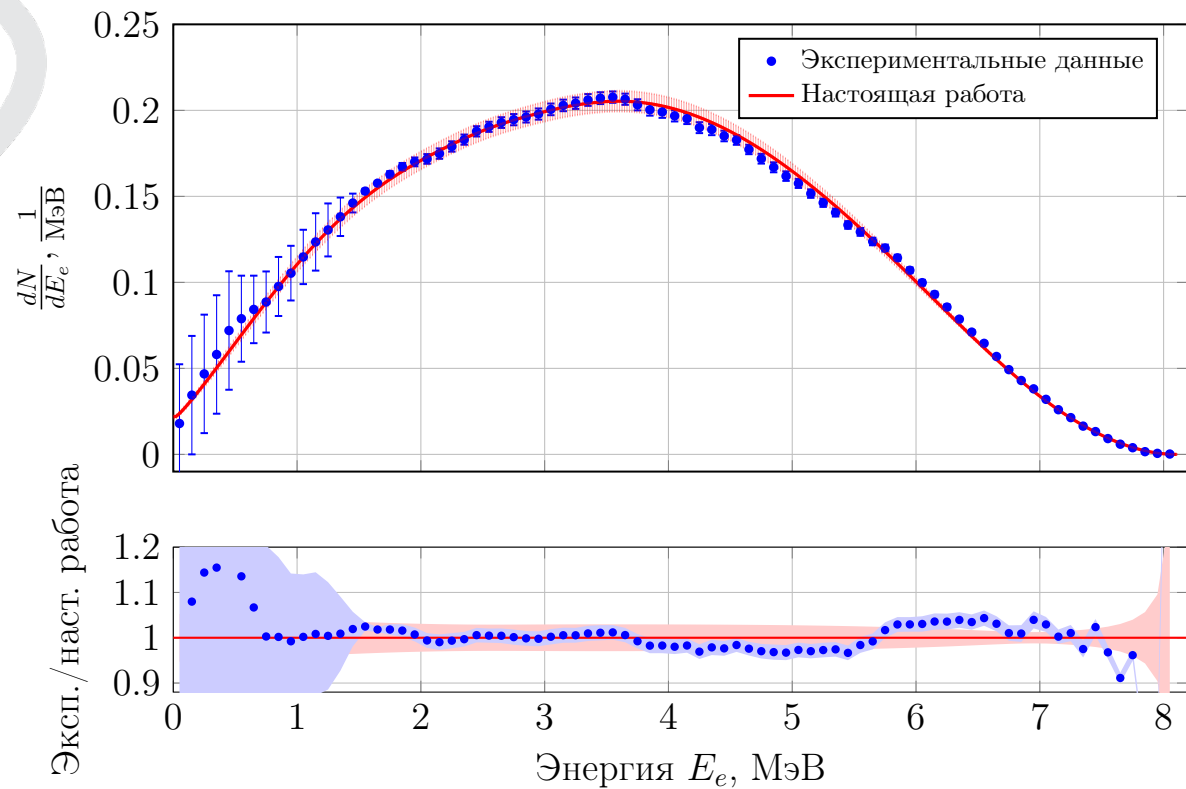
$$\sigma_{S^{iso}}(E_i) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(S_{(k)}^{iso}(E_i) - S^{iso}(E_i) \right)^2}$$

⁸⁷Br

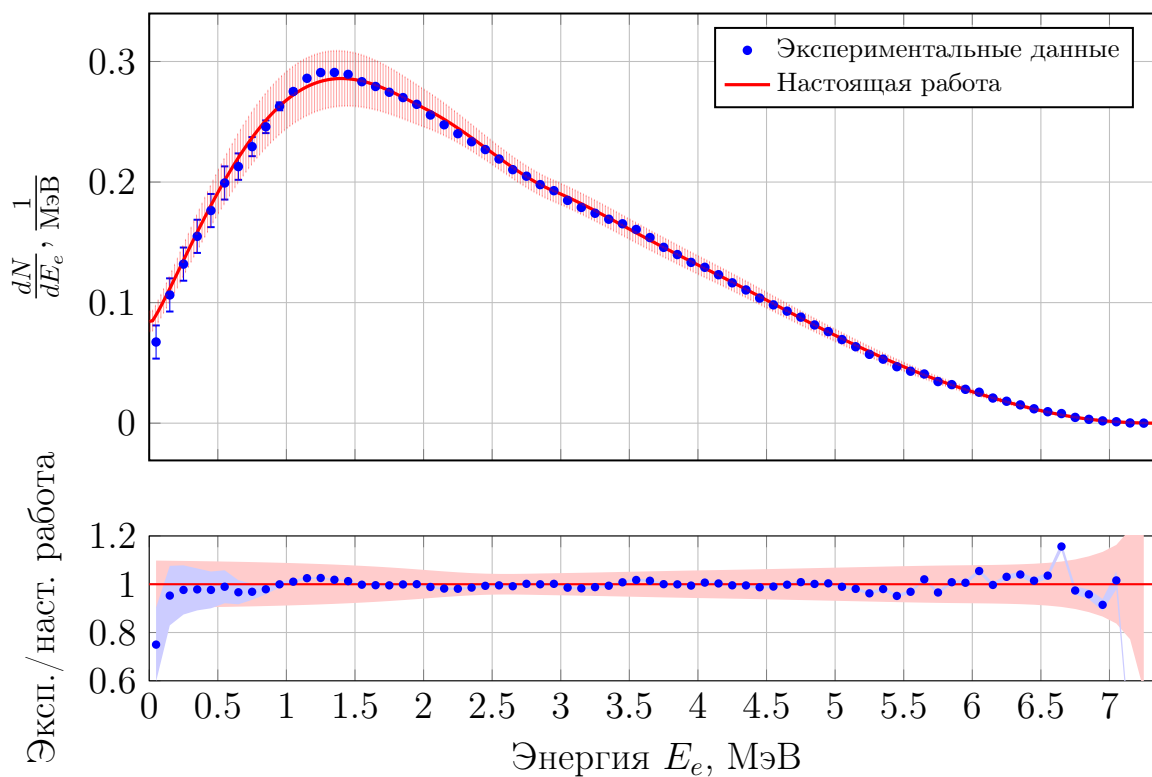


Спектр бета-частиц от распада ⁸⁷Br

Сравнение с экспериментом

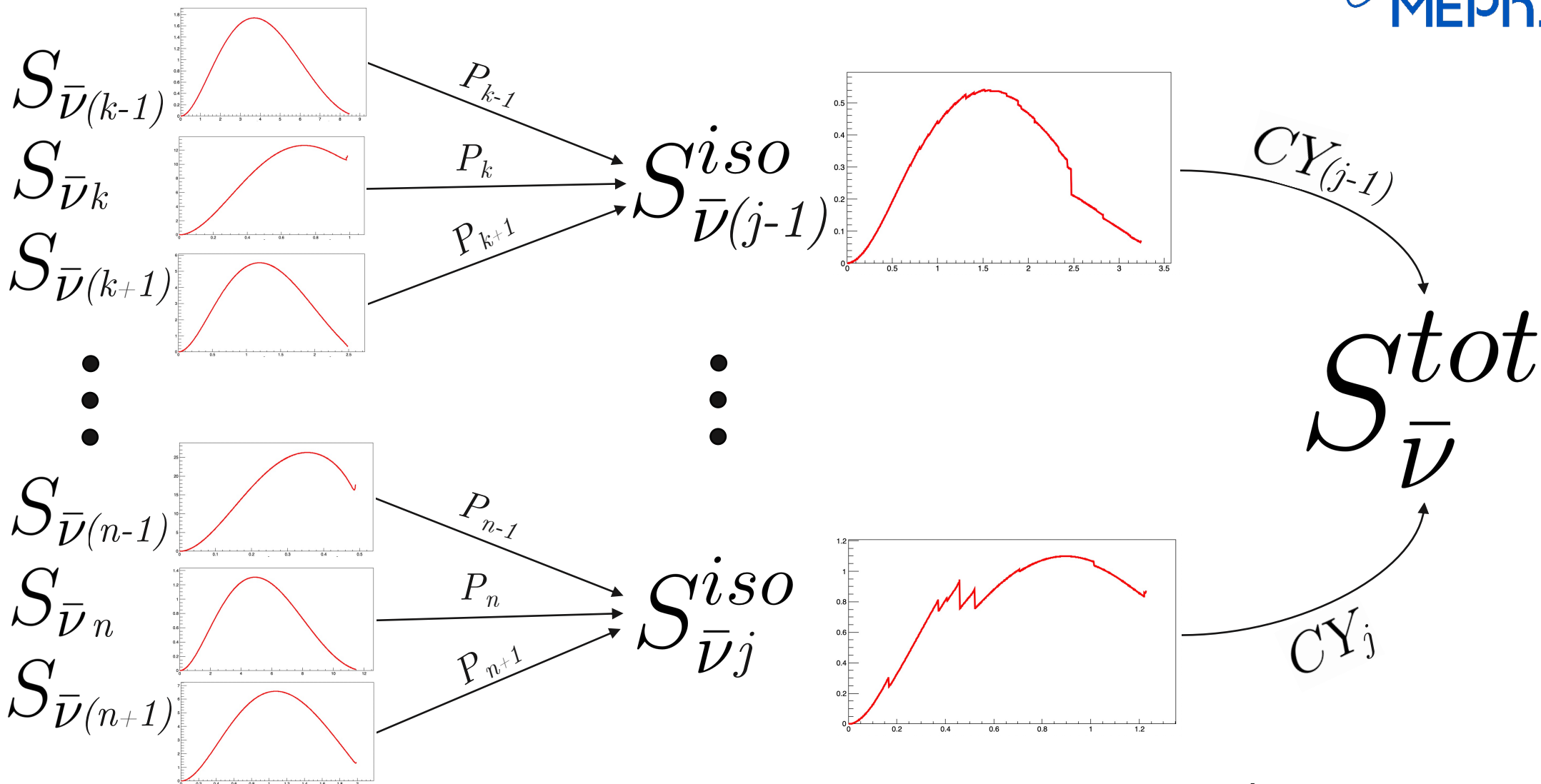


Спектр бета-частиц от распада ^{92}Rb



Спектр бета-частиц от распада ^{142}Cs

Построение кумулятивного спектра



~ 17.000 переходов

~ 800 изотопов

4 кумулятивных спектра

«Восстановление» неизвестных схем распадов

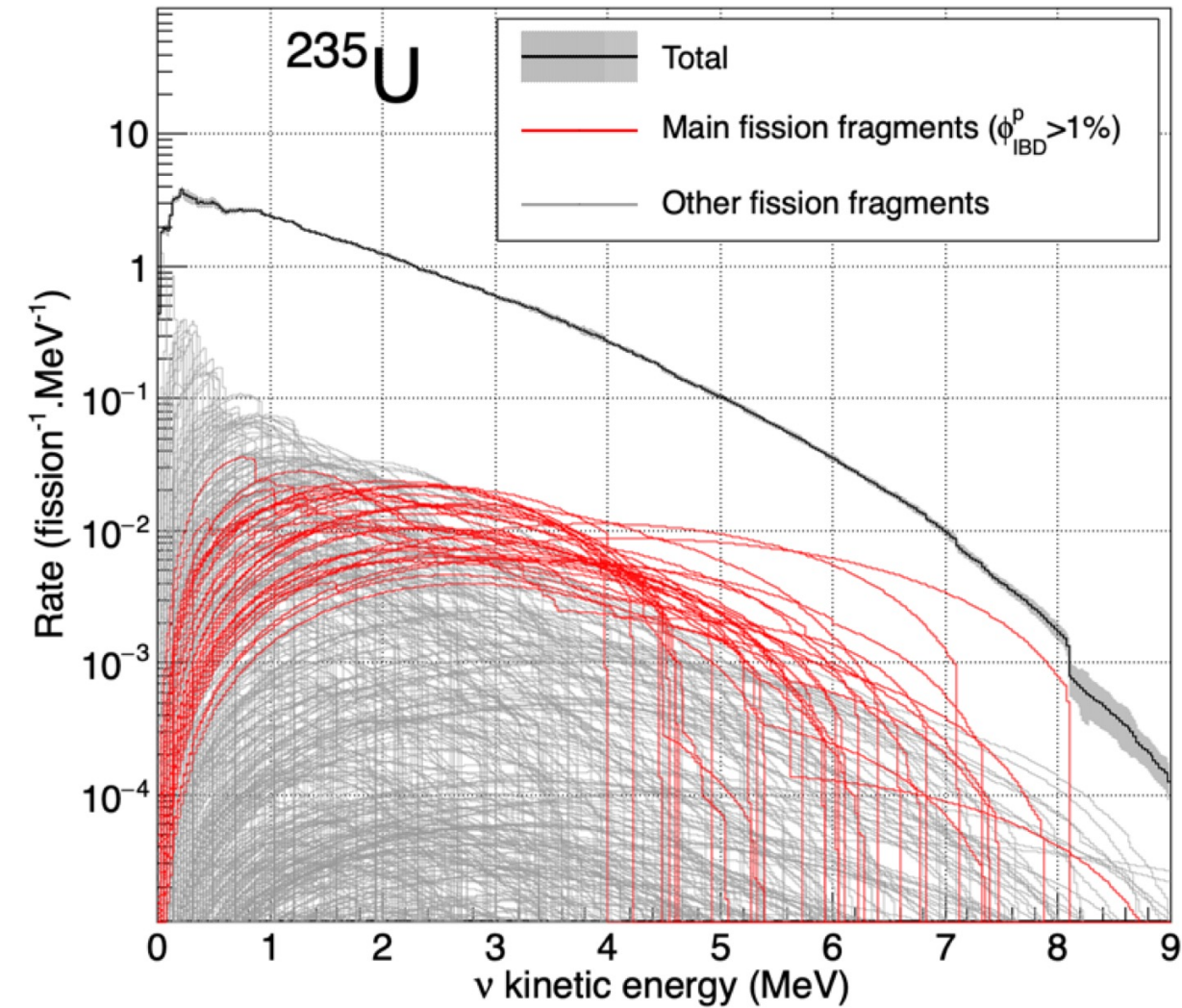
Из **~800 изотопов**, дающих вклад в кумулятивный спектр, для **~300** из них **неизвестны параметры распадов**.

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

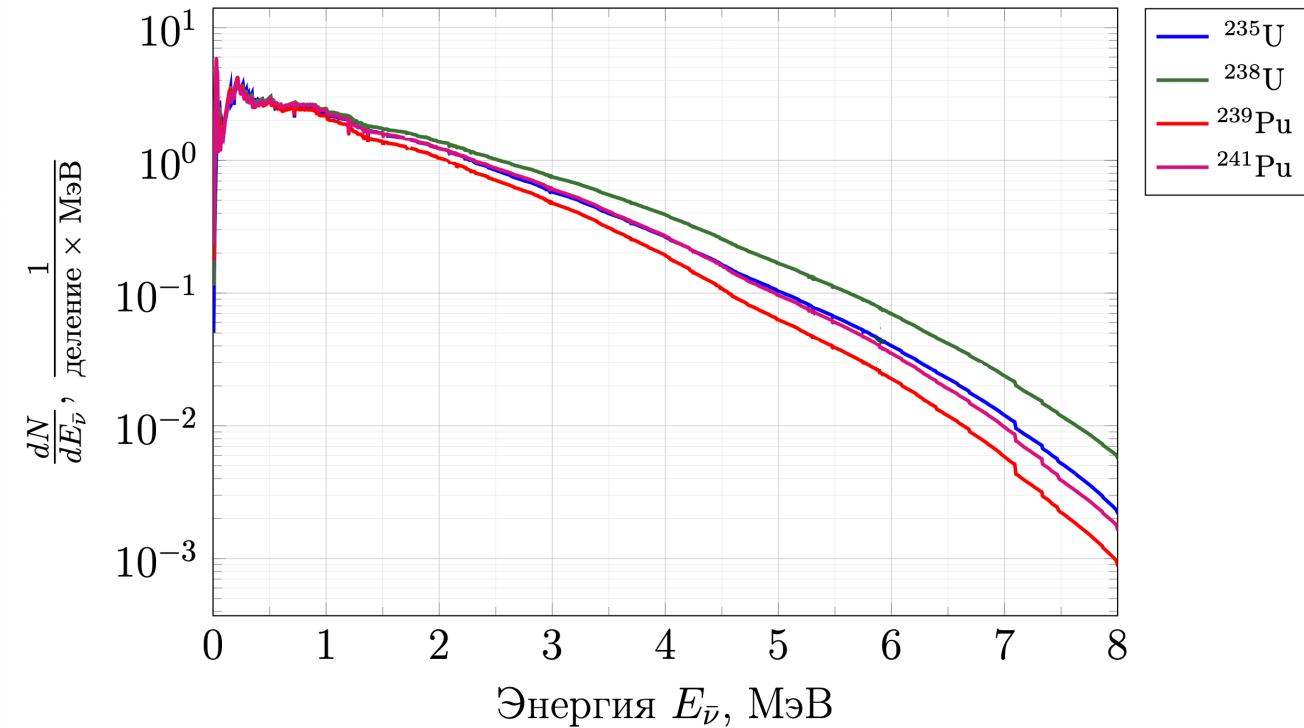
Основные допущения:

- 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



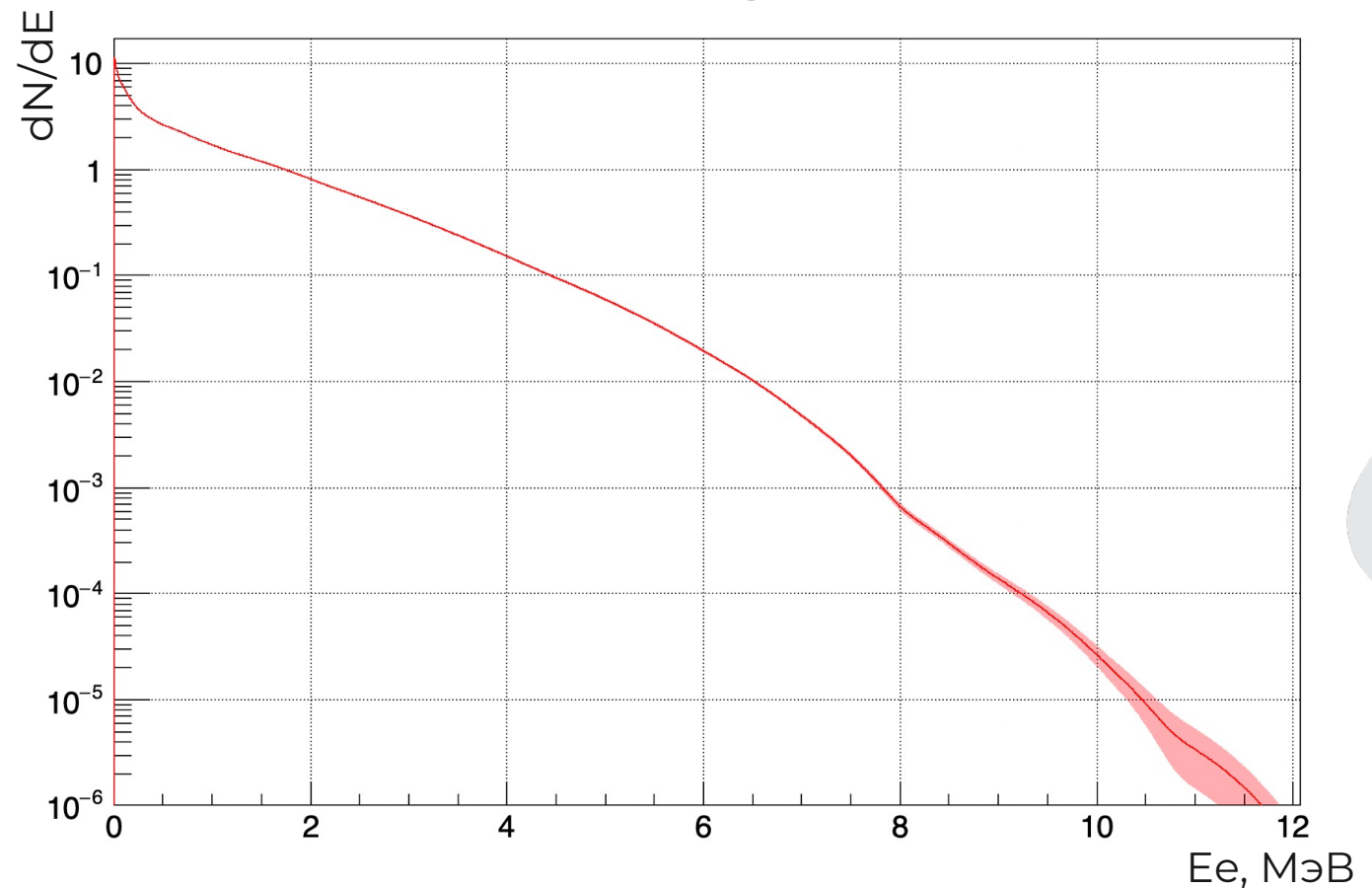
$$Y_j^{(k)} \sim \mathcal{N}(Y_j, \sigma_{Y_j})$$

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

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

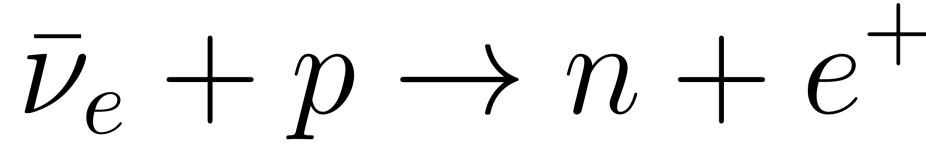
$$\sigma_{S^{tot}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(S_{(k)}^{tot} - S^{tot} \right)^2}$$

²³⁵U



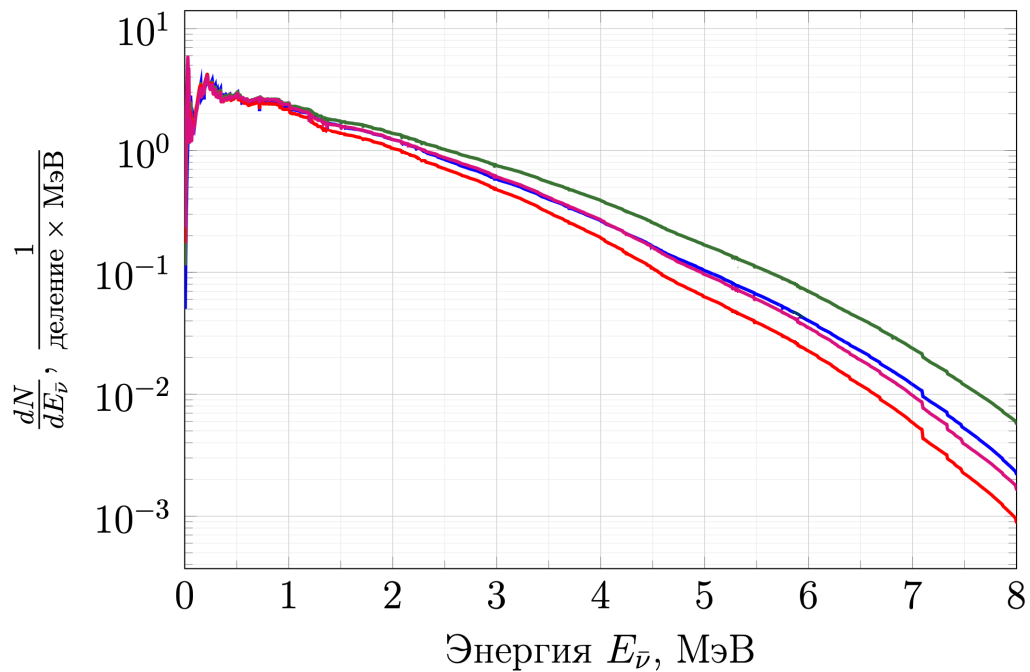
Кумулятивный спектр бета-частиц
продуктов деления ²³⁵U

Реконструирование позитронного спектра

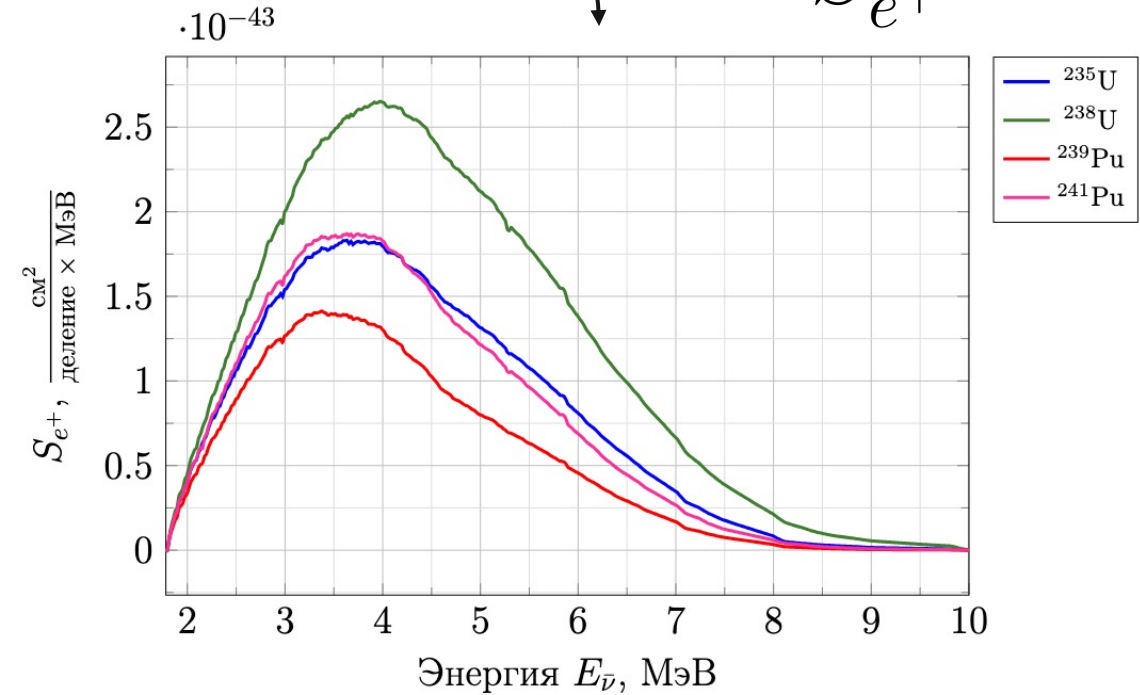


$S_{\bar{\nu}}$ ^{tot}

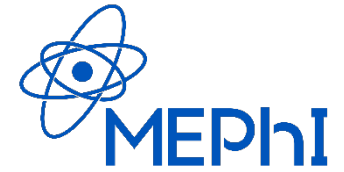
S_{e^+}



σ_{IBD}

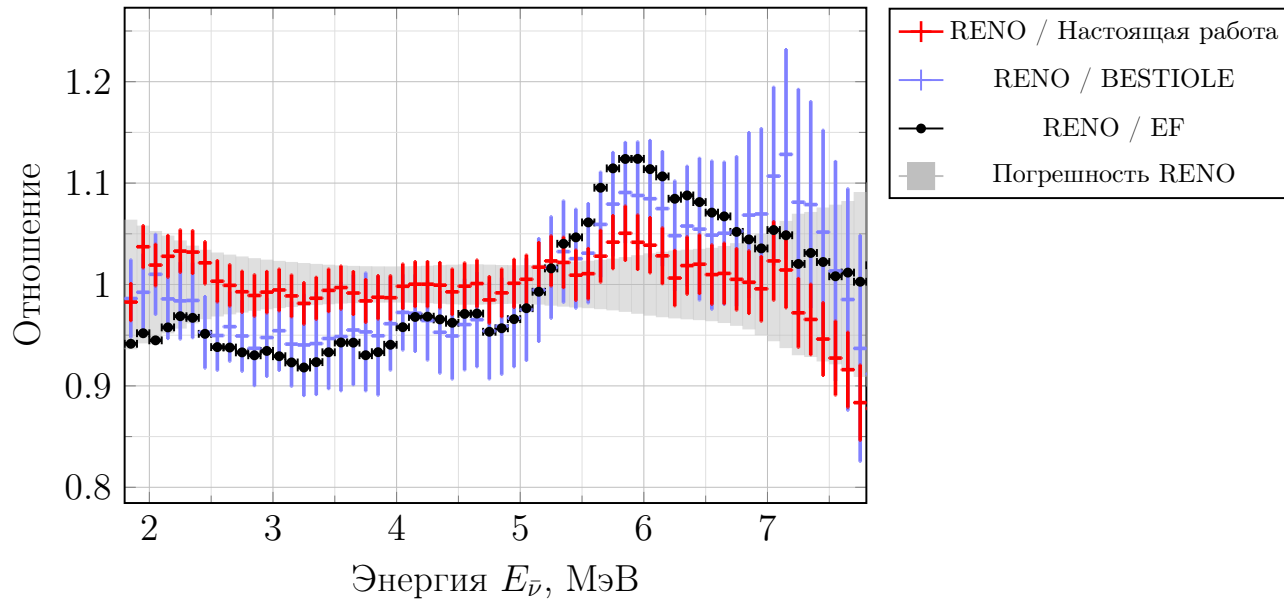


Сравнение спектров с экспериментом



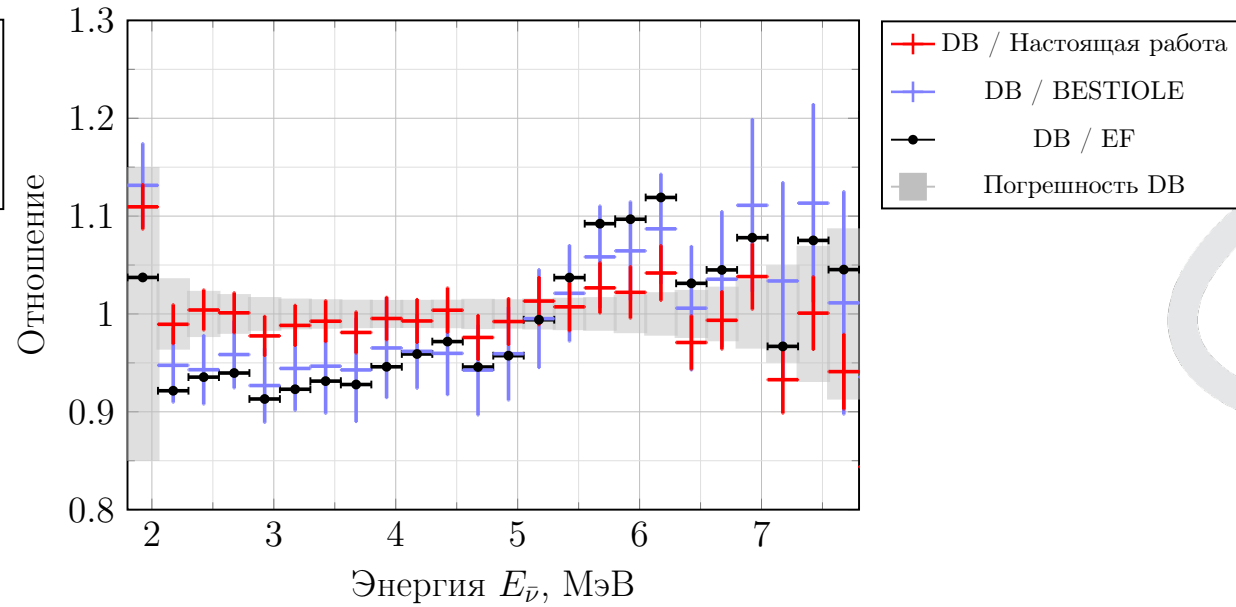
Сравнение позитронных спектров с экспериментами Daya Bay и RENO.

RENO



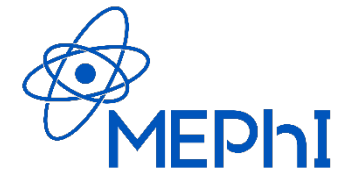
Отношение экспериментального позитронного спектра (RENO) к модельным позитронным спектрам

Daya Bay

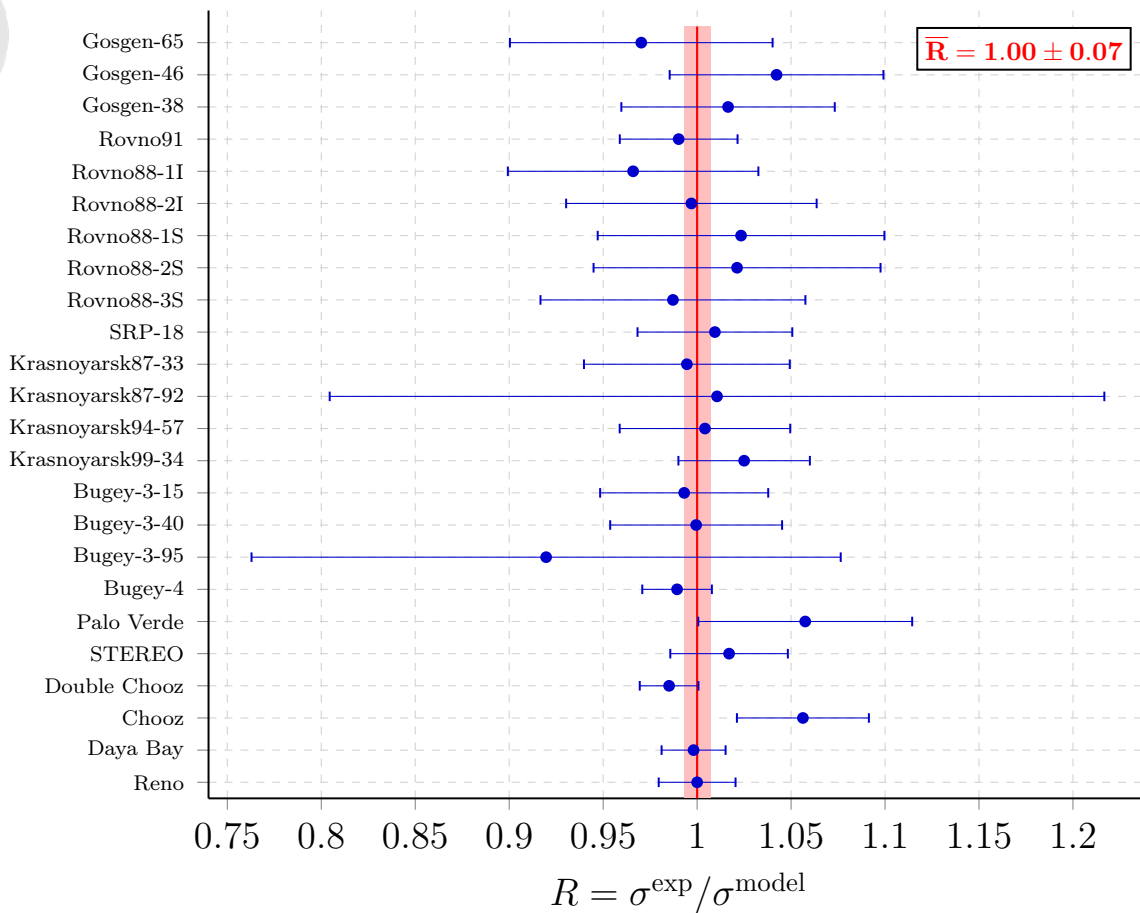


Отношение экспериментального позитронного спектра (Daya Bay) к модельным позитронным спектрам

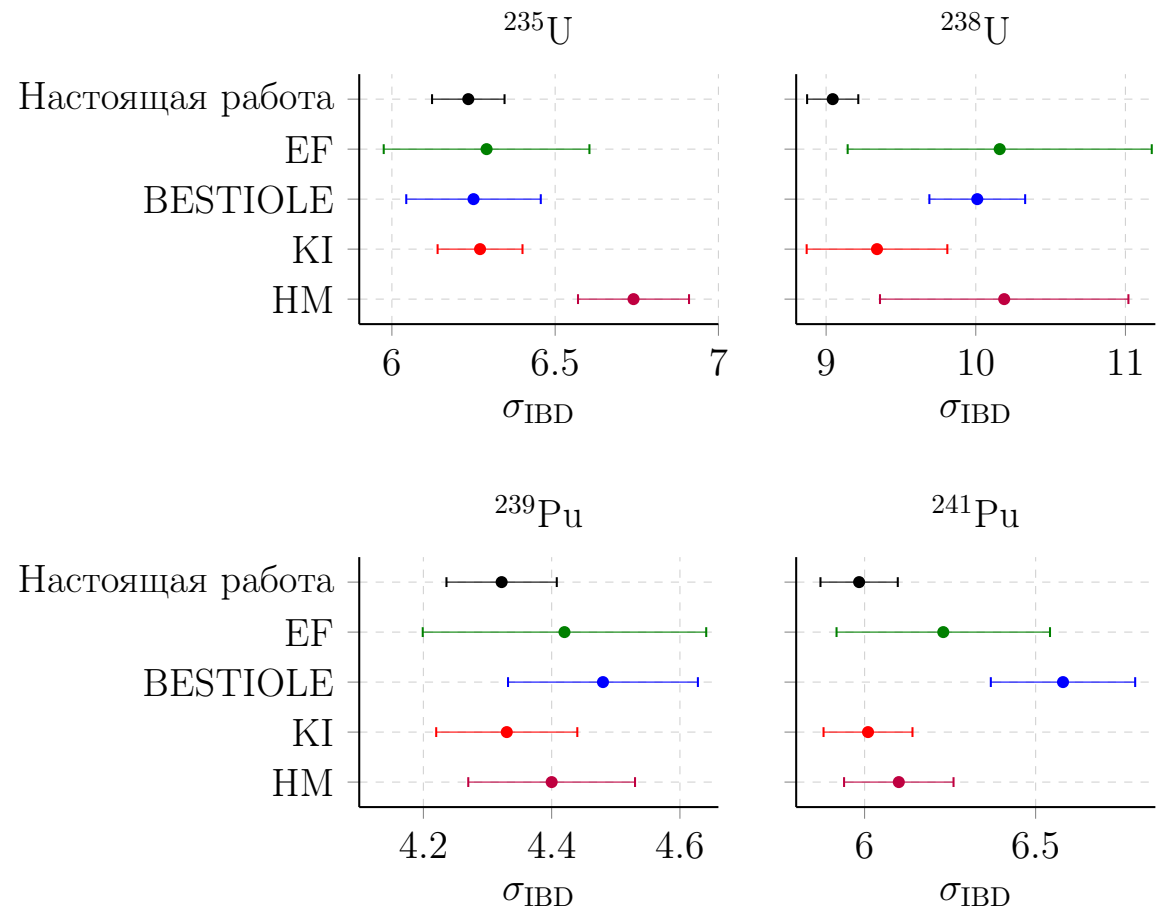
Сравнение выходов ОБР



Сравнение предсказываемых моделью выходов ОБР с экспериментами и другими моделями.



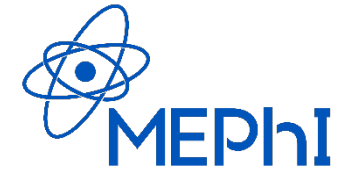
Отношение экспериментально измеренных выходов ОБР к предсказываемым моделью



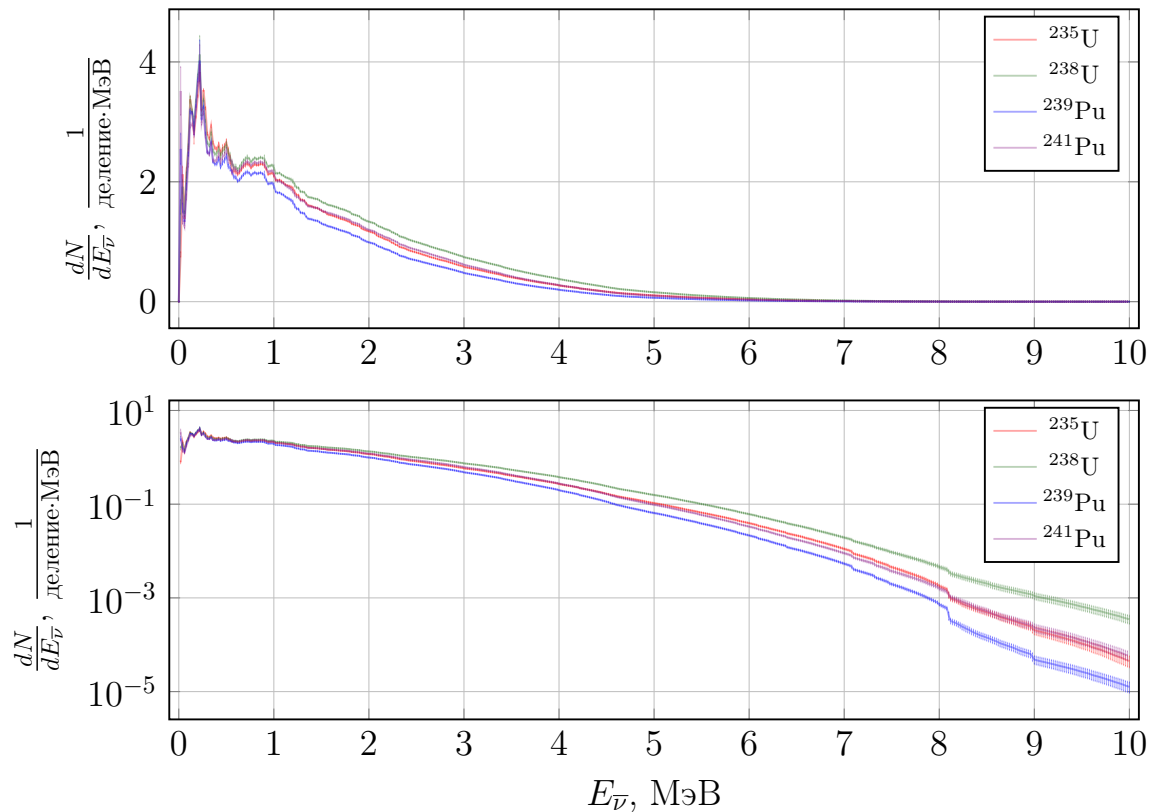
Предсказываемые разными моделями выходы ОБР изотопов урана и плутония

Расчет для **быстрых*** нейтронов

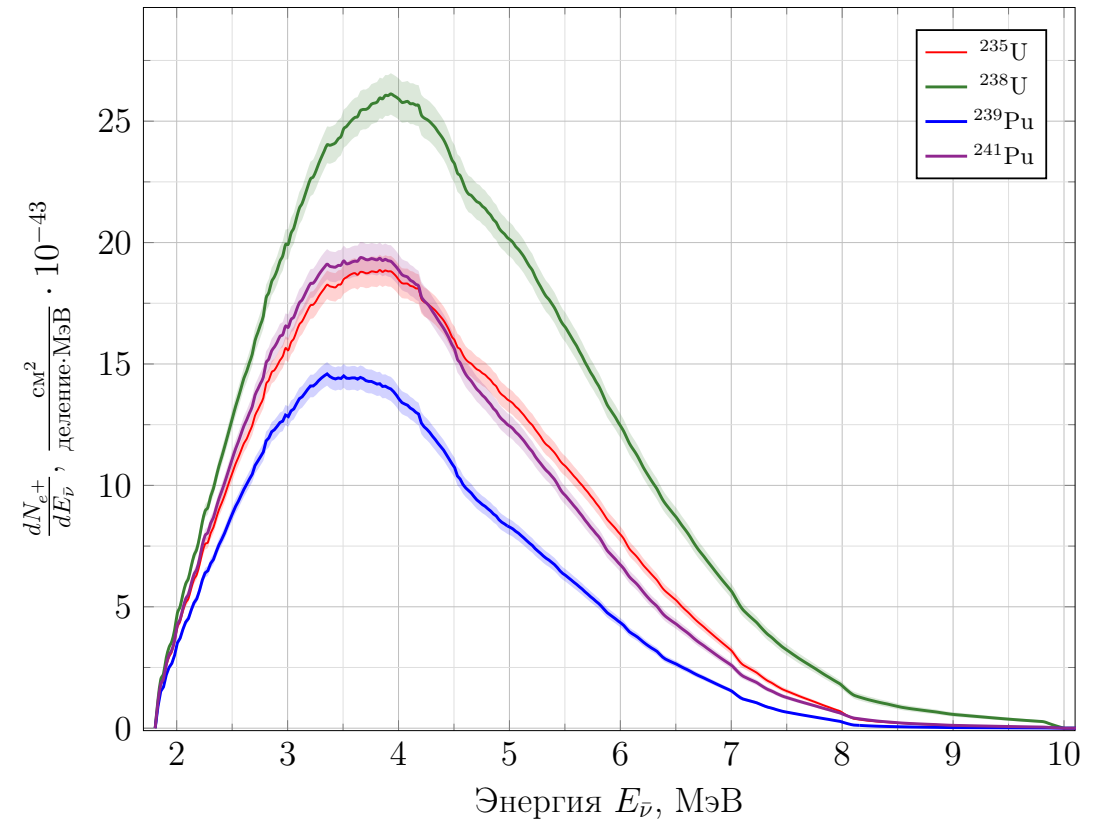
*нейтроны энергией 0,5 МэВ



После валидации модели на ее основе были рассчитаны **кумулятивные спектры антинейтрино** продуктов деления урана и плутония **быстрыми нейтронами** и ожидаемые **спектры позитронов**.



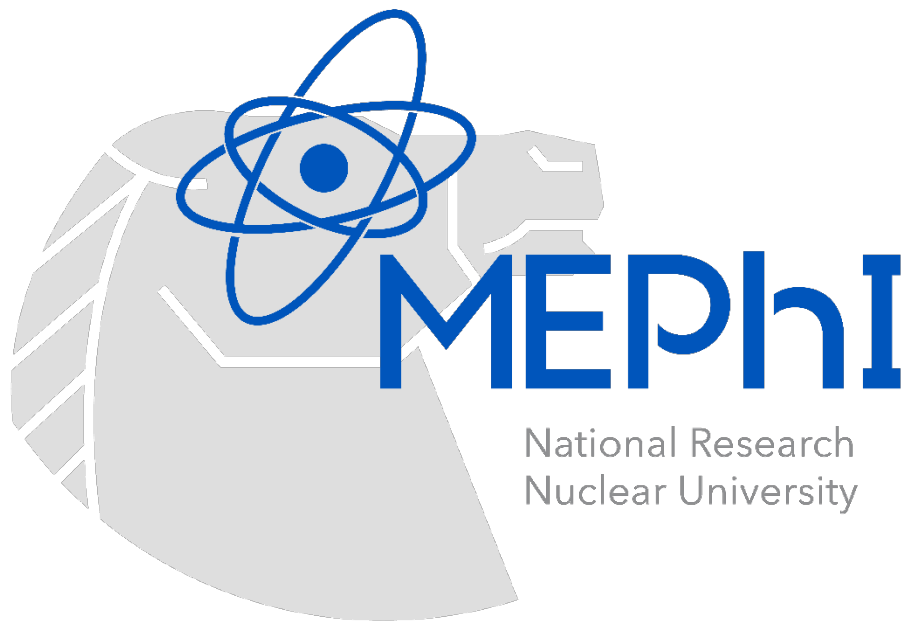
Кумулятивные спектры антинейтрино продуктов деления изотопов урана и плутония быстрыми нейтронами



Предсказываемые моделью спектры позитронов реакции ОБР для изотопов урана и плутония в реакторе на быстрых нейтронах

1. Была разработана **модель расчета** спектров бета-частиц и антинейтрино **отдельных изотопов** с учетом набора физических эффектов, имеющих наибольшее влияние на процесс β -распада;
2. Был предложен и реализован способ **восстановления неизвестных схем** распадов в библиотеках ядерных баз данных;
3. Были рассчитаны **кумулятивные спектры антинейтрино** продуктов деления основных изотопов, используемых в качестве топлива для ядерных реакторов на **тепловых** нейтронах;
4. Была проведена **валидация** полученных в работе модельных спектров;
5. Были рассчитаны **кумулятивные спектры антинейтрино** продуктов деления изотопов урана и плутония в реакторах на **быстрых** нейтронах и **ожидаемые спектры позитронов**.

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»;
3. Всероссийская весенняя научная сессия СНО НИЯУ МИФИ, 12-14 мая 2026 – «Расчет спектров антинейтрино и бета-частиц продуктов деления изотопов урана и плутония в реакторах на тепловых и быстрых нейтронах»;
4. Регистрация патента на программу для ЭВМ «Spectrum40v1», разработанную в рамках подготовки настоящей работы.

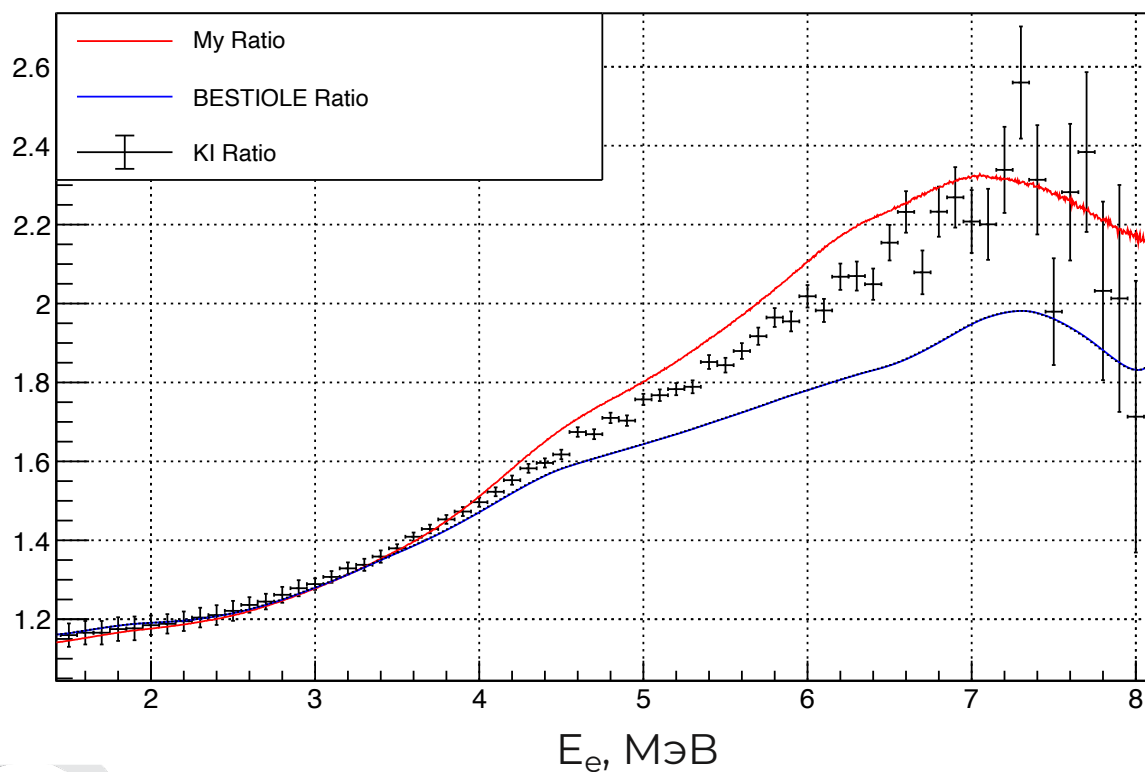


**Спасибо за
внимание!**

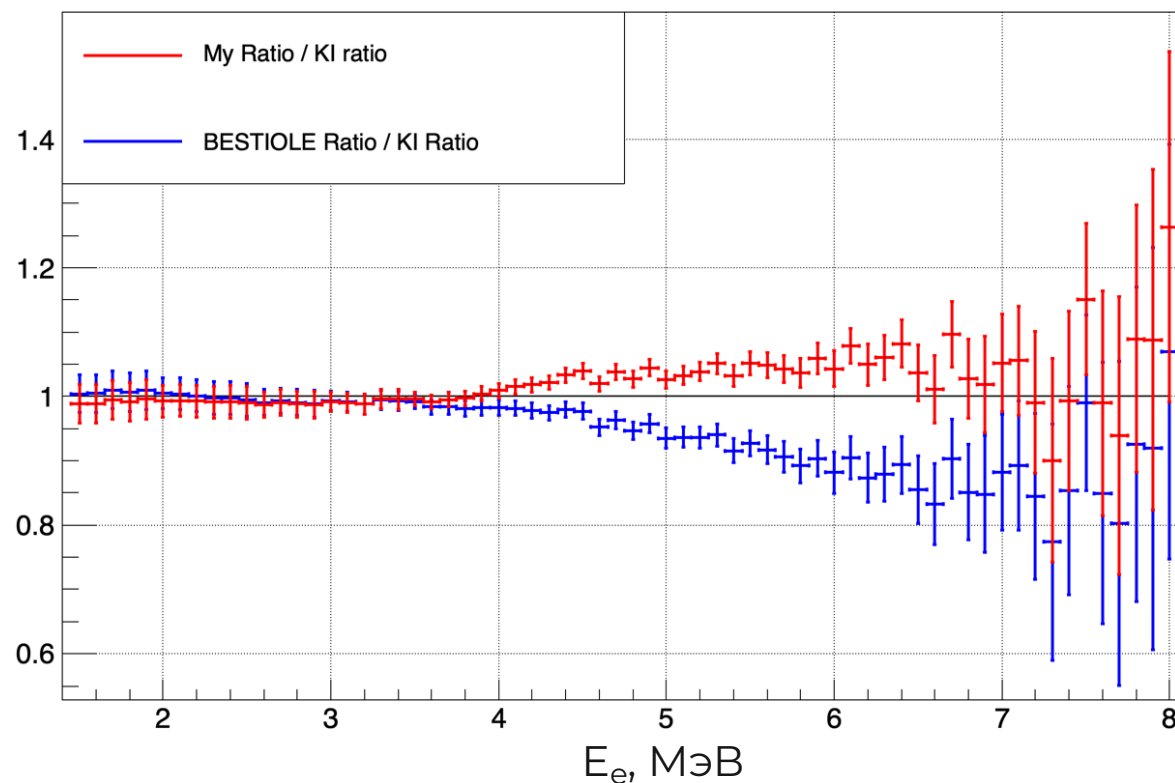
Москва, 2026

Сравнение с данными эксперимента «Бета» (НИЦ КИ)

Отношение бета-спектра продуктов деления ^{235}U к бета-спектру продуктов деления ^{239}Pu



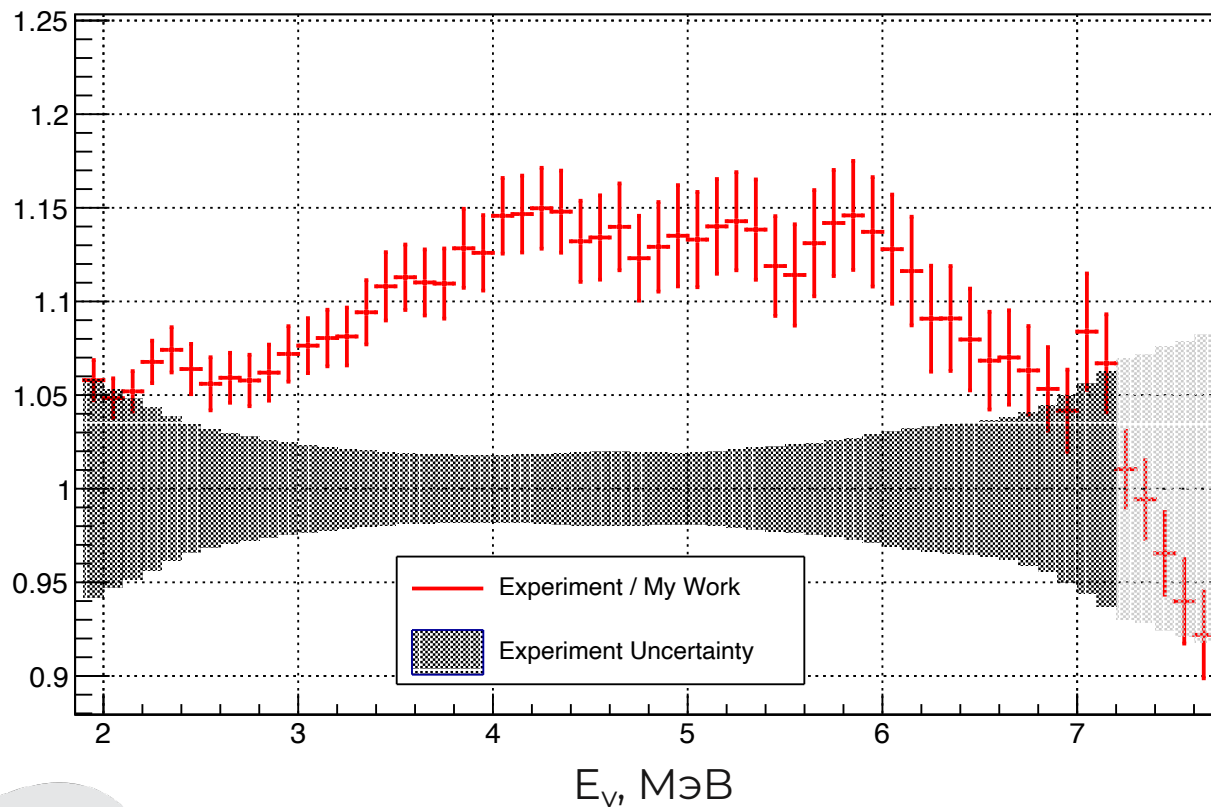
Отношение модельных отношений к экспериментальному



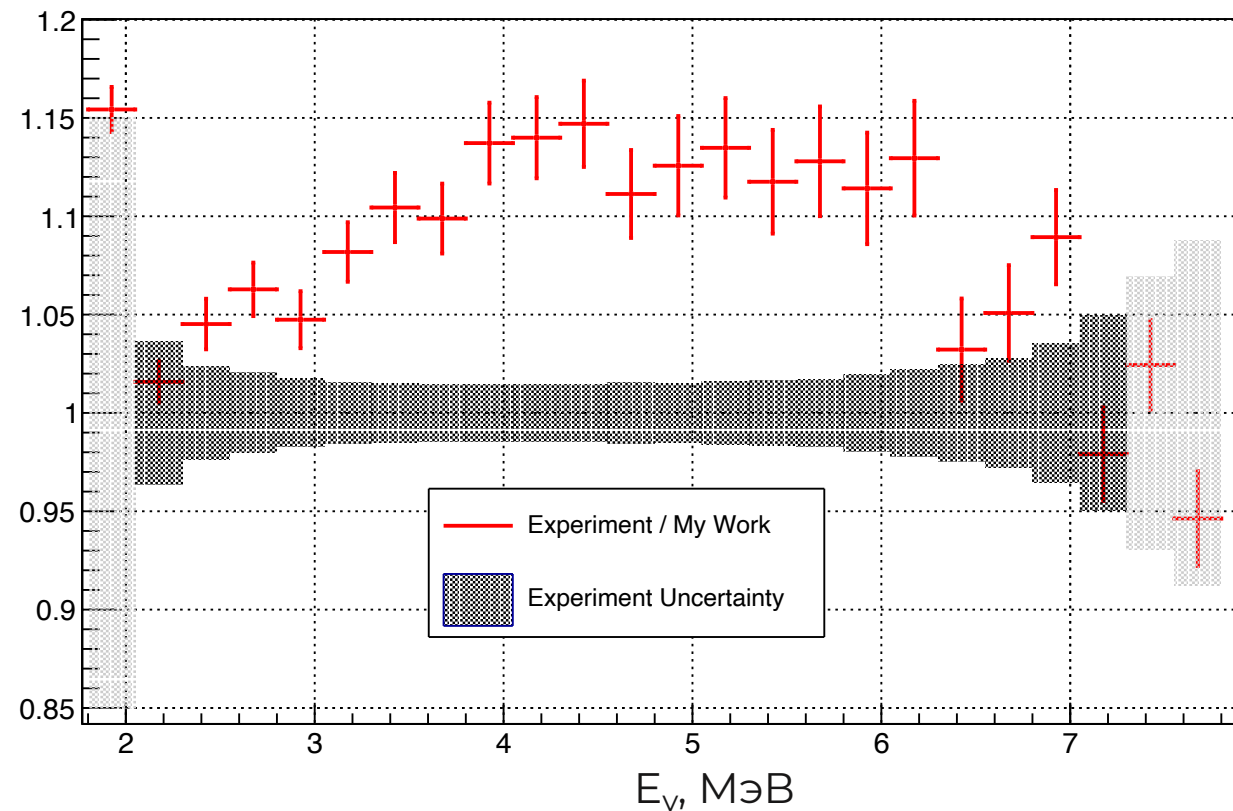
Дополнительный слайд №2

Сравнение с экспериментами RENO и Daya Bay до восстановления схем распадов

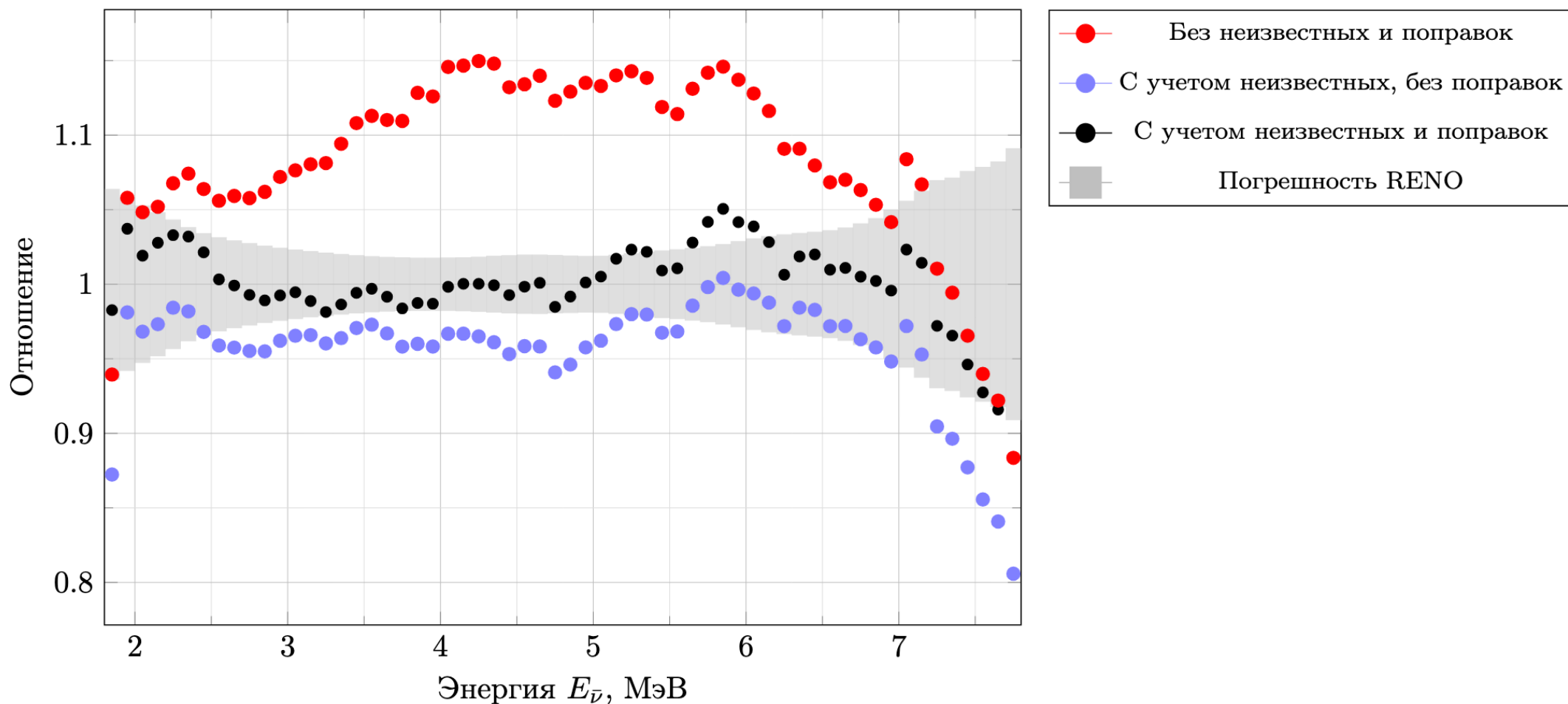
RENO_EMPTY



DB_EMPTY



Сравнение с экспериментом RENO на разных этапах работы



Предсказываемые моделью выходы ОБР

Изотоп	$\sigma^{\text{model}}, 10^{-43} \frac{\text{см}^2}{\text{деление}}$
^{235}U	6.23 ± 0.11
^{238}U	9.05 ± 0.17
^{239}Pu	4.32 ± 0.09
^{241}Pu	5.98 ± 0.11

Деление **тепловыми**
(0.0253 эВ) нейтронами
(для ^{238}U – **быстрыми**)

Изотоп	$\sigma^{\text{model}}, 10^{-43} \frac{\text{см}^2}{\text{деление}}$
^{235}U	6.30 ± 0.12
^{238}U	9.05 ± 0.17
^{239}Pu	4.38 ± 0.09
^{241}Pu	6.15 ± 0.12

Деление **быстрыми (0.5 МэВ)**
нейтронами

Дополнительный слайд №5

Экспериментально
полученные **выходы ОБР**
для ряда реакторных
экспериментов и
соответствующие им
модельные выходы ОБР

Эксперимент	f_{235}	f_{238}	f_{239}	f_{241}	$\sigma^{\text{exp}}, 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление}$	$\sigma^{\text{model}}, 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление}$
Gosgen-65	0.543	0.070	0.329	0.058	5.615 ± 0.399	5.787 +- 0.068
Gosgen-46	0.584	0.068	0.298	0.050	6.090 ± 0.324	5.843 +- 0.071
Gosgen-38	0.619	0.067	0.272	0.042	5.989 ± 0.326	5.892 +- 0.074
Rovno91	0.614	0.074	0.274	0.038	5.850 ± 0.170	5.908 ± 0.074
Rovno88-1I	0.607	0.074	0.277	0.042	5.700 ± 0.387	5.901 ± 0.073
Rovno88-2I	0.603	0.076	0.276	0.045	5.890 ± 0.387	5.908 ± 0.073
Rovno88-1S	0.606	0.074	0.277	0.043	6.040 ± 0.444	5.902 ± 0.073
Rovno88-2S	0.557	0.076	0.313	0.054	5.960 ± 0.440	5.836 ± 0.069
Rovno88-3S	0.606	0.074	0.274	0.046	5.830 ± 0.410	5.906 +- 0.073
SRP-18	1.000	0.000	0.000	0.000	6.293 ± 0.231	6.234 ± 0.111
Krasnoyarsk87-33	1.000	0.000	0.000	0.000	6.200 ± 0.323	6.234 ± 0.111
Krasnoyarsk87-92	1.000	0.000	0.000	0.000	6.300 ± 1.280	6.234 ± 0.111
Krasnoyarsk94-57	1.000	0.000	0.000	0.000	6.260 ± 0.260	6.234 ± 0.111
Krasnoyarsk99-34	1.000	0.000	0.000	0.000	6.390 ± 0.186	6.234 ± 0.111
Bugey-3-15	0.538	0.078	0.328	0.056	5.772 ± 0.251	5.812 ± 0.068
Bugey-3-40	0.538	0.078	0.328	0.056	5.809 ± 0.257	5.812 ± 0.068
Bugey-3-95	0.538	0.078	0.328	0.056	5.345 ± 0.909	5.812 ± 0.068
Bugey-4	0.538	0.078	0.328	0.056	5.750 ± 0.084	5.812 ± 0.068
Palo Verde	0.600	0.070	0.270	0.060	6.253 ± 0.327	5.900 +- 0.072
STEREO	1.000	0.000	0.000	0.000	6.340 ± 0.159	6.234 ± 0.111
Double Chooz	0.520	0.087	0.333	0.060	5.710 ± 0.063	5.826 ± 0.067
Chooz	0.496	0.087	0.351	0.066	6.117 ± 0.191	5.791 ± 0.066
Daya Bay	0.564	0.076	0.304	0.056	5.840 ± 0.072	5.851 ± 0.069
RENO	0.571	0.073	0.300	0.056	5.852 ± 0.097	5.852 ± 0.070