



Разработка методов расчета и анализа спектров реакторных антинейтрино для фундаментальных и прикладных задач

Студент: **Даниэль Попов**

Научный руководитель: **Олег Титов**
Лаборатория теоретической физики ОФН НИЦ КИ

Москва 2022



Мотивация и цели работы

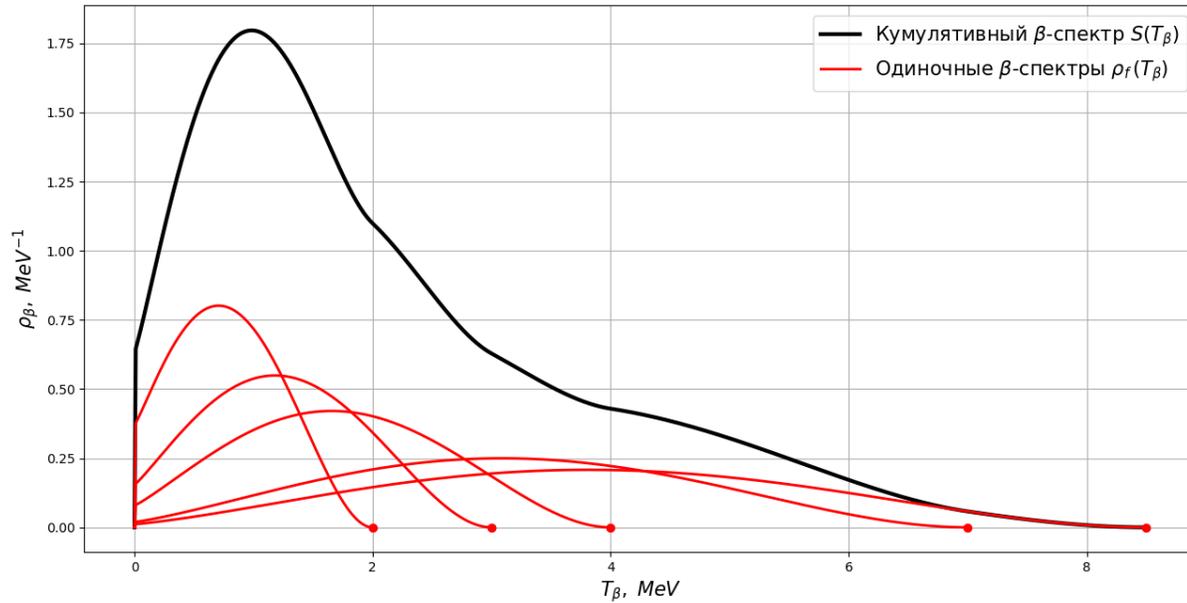
Мотивация

- Знание спектров реакторных антинейтрино представляет большой интерес как для фундаментальной науки (осцилляционные реакторные эксперименты), так и для прикладных задач (нейтринный метод мониторинга работы ядерного реактора);
- **Проблема реакторной антинейтринной аномалии (RAA);** последние экспериментальные данные НИЦ КИ свидетельствуют о том, что существующие на данный момент конверсионные спектры реакторных антинейтрино рассчитаны неточно – **решение RAA;**

Цели работы

- Разработать алгоритм преобразования кумулятивных бета-спектров в спектры реакторных антинейтрино (модель конверсии КИ);
- Пересчитать спектры ^{235}U и ^{238}U с учетом поправки НИЦ КИ;
- **Провести анализ и расчет неопределенностей метода конверсии;**
- **Провести анализ устойчивости процедуры преобразования – в частности, доказать устойчивость отношения выходов обратного бета-распада $\sigma^{235}/\sigma^{239}$;**

Реакторные спектры и регистрация $\bar{\nu}_e$



Методы расчета:

- Прямое суммирование (ab initio);
- Конверсия кумулятивных бета-спектров [получены группой ILL в 80-ых годах];

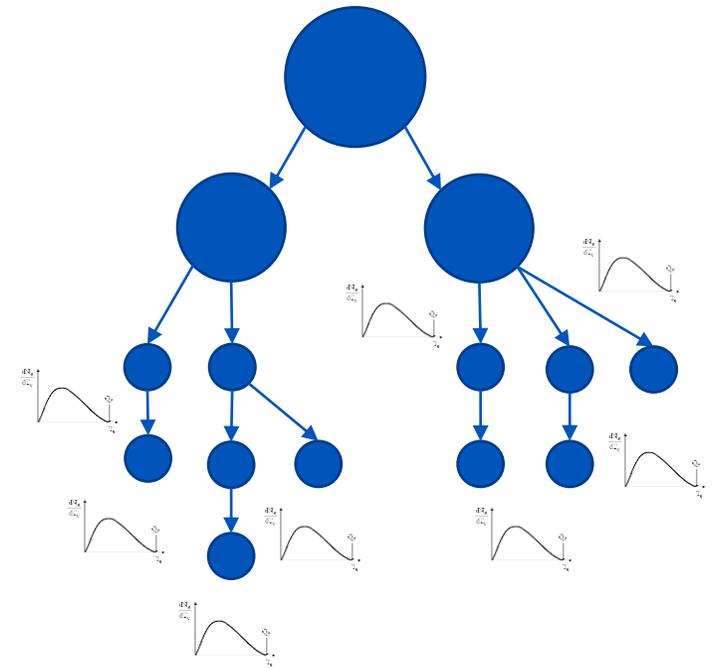
Регистрация: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ – ОБР (IBD)

$$\rho_e(E_e) = \int_{E_{thr}}^{8 \text{ МэВ}} \rho_\nu(E_\nu) \frac{d\sigma_{IBD}(E_\nu, E_e)}{dE_e} dE_\nu$$

Спектр позитронов ОБР

$$\sigma = \int_{E_{thr}}^{8 \text{ МэВ}} \rho_\nu(E_\nu) \sigma_{IBD}(E_\nu) dE_\nu$$

Выход ОБР
(сечение на акт деления)

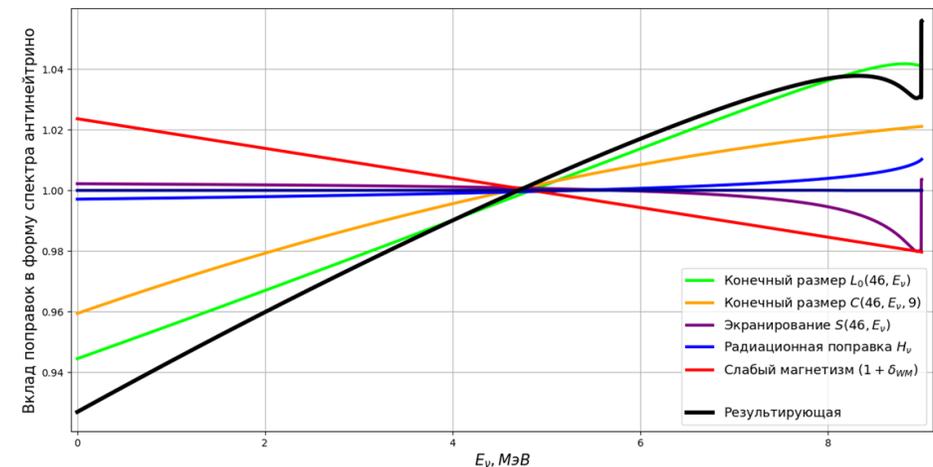
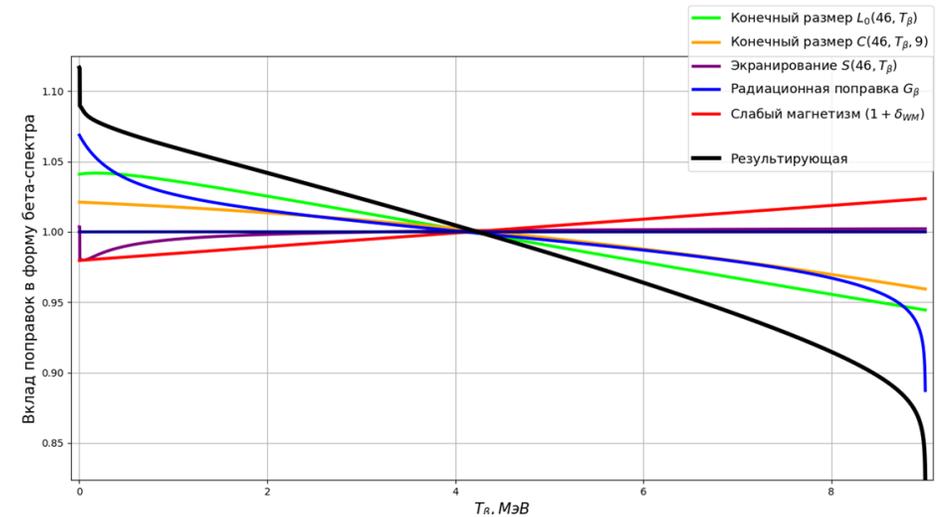


Метод конверсии КИ

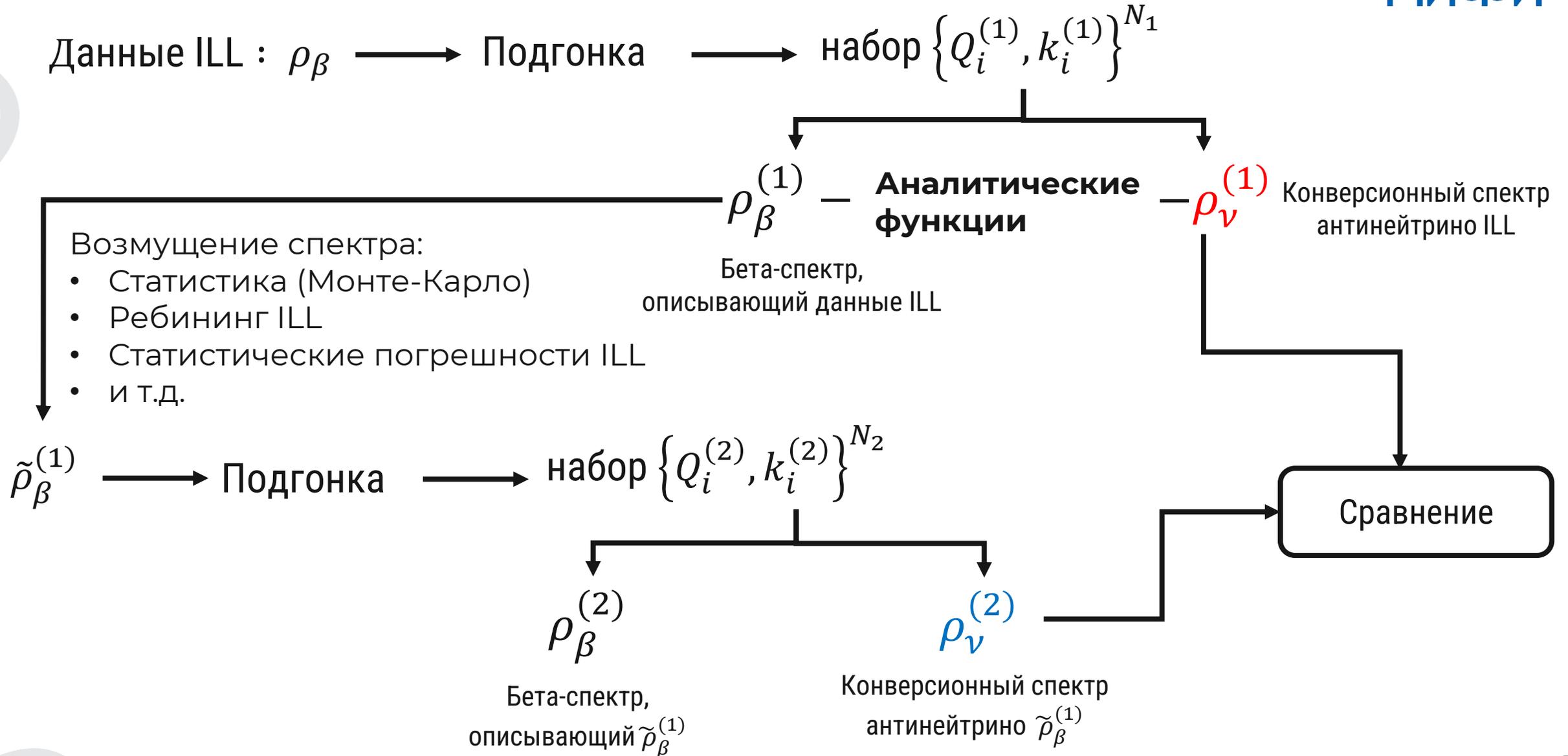
$$\rho_{\beta}(T_{\beta}, Q) = k \cdot p_{\beta} E_{\beta} \cdot (Q - T_{\beta})^2 \cdot F(Z, E_{\beta}) \cdot \{L_0(Z, E_{\beta}) C(Z, E_{\beta}, Q) S(Z, E_{\beta}) G_{\beta}(E_{\beta}, Q) (1 + \delta_{WM})\}$$

$$\rho_{\nu}(E_{\nu}, Q) = \rho_{\beta}(Q - T_{\beta}) \cdot \frac{H_{\nu}(Q - T_{\beta}, Q)}{G_{\beta}(Q - T_{\beta}, Q)}$$

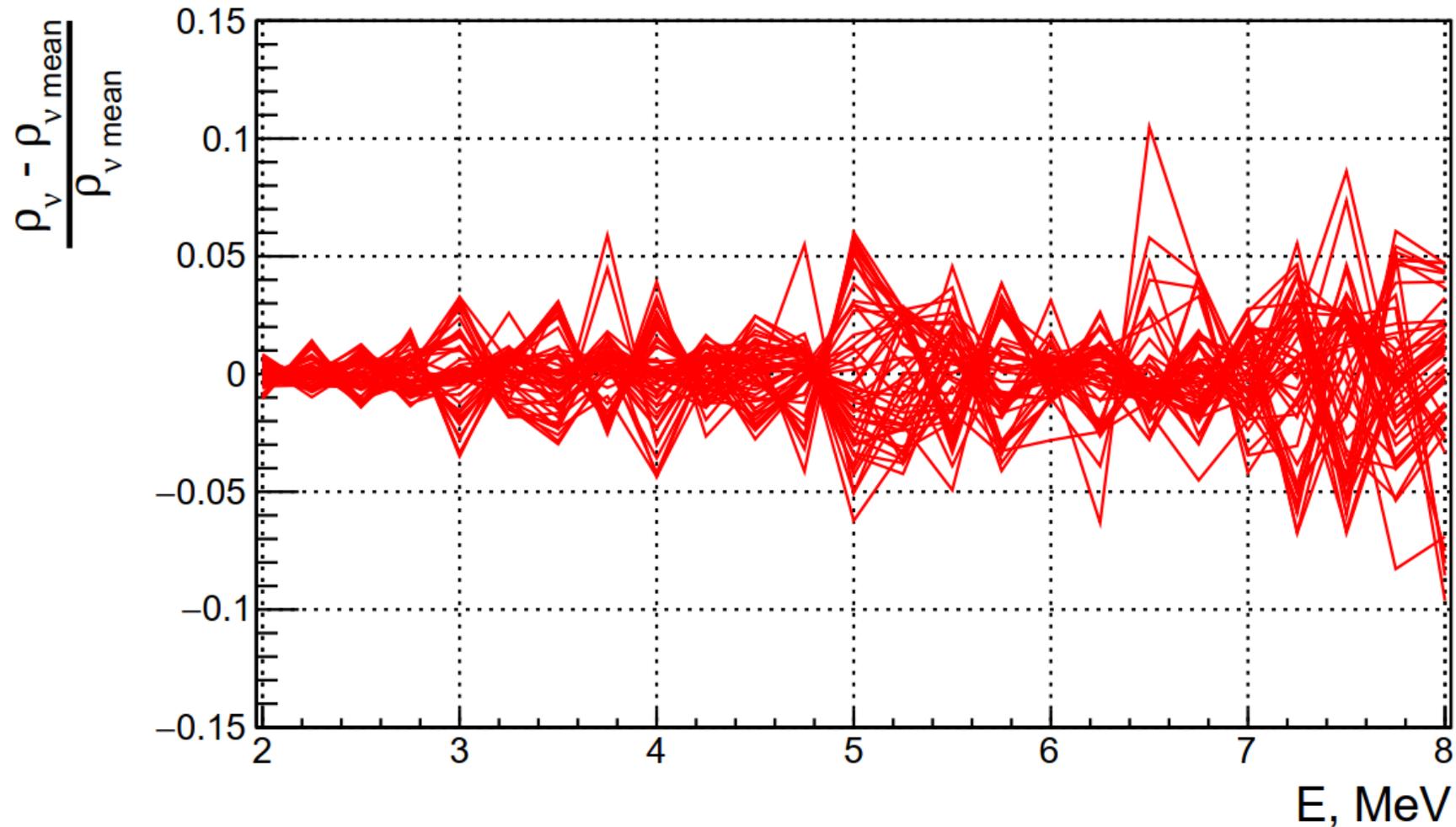
- 1) «Первое приближение»: 10-15 одиночных бета-ветвей (в зависимости от изотопа) аппроксимируют спектр ILL по частям, начиная с жесткой области;
- 2) «Второе приближение»: к исходному, фиксированному, набору ветвей добавляются дополнительные, с заведомо меньшими весами. Их параметры определяются путем аппроксимации всего исходного спектра целиком;
- 3) Регуляризация – сглаживание полученного спектра путем свертки с прямоугольным окном, аппроксимация логарифма спектра полиномом 5-ой степени;



Концепция повторной конверсии



Трансляция статистической погрешности ILL



50 итераций повторной конверсии для $\rho_\beta + \delta\rho_\beta \cdot r, r \in [-1; 1] - \text{RNG}$,
 $\delta\rho_\beta$ – статистическая погрешность ILL

Линейность вклада поправок в выход ОБР

Δ	$\sigma(\Delta)$	$\frac{\sigma(A) - \sigma(\Delta)}{\sigma(A)}$	$\frac{\sigma(\Delta) - \sigma(1)}{\sigma(\Delta)}$	$\frac{\sigma(A) - \sigma(A - \Delta)}{\sigma(A)}$
1	6.38	3.33%	-	-
(L ₀ C) – конечный размер	6.62	-0.30 %	3.63 %	3.64 %
S – экранирование	6.35	3.79 %	-0.47 %	-0.45 %
Rad – радиац. поправка	6.46	2.12 %	1.24 %	1.36 %
WM – слабый магнетизм	6.32	4.24 %	-0.95 %	-1.06 %
(L ₀ C) S	6.59	0.15 %	3.19 %	3.18 %
(L ₀ C) Rad	6.71	-1.67 %	4.92 %	4.85 %
(L ₀ C) WM	6.55	0.76 %	2.60 %	2.58 %
S Rad	6.43	2.58 %	0.78 %	0.76 %
S WM	6.28	4.85 %	-1.59 %	-1.67%
Rad WM	6.39	3.18 %	0.16 %	0.15 %
(L ₀ C) S Rad	6.67	-1.06 %	4.35 %	4.24 %
(L ₀ C) S WM	6.51	1.36 %	2.00 %	2.12 %
(L ₀ C) Rad WM	6.63	-0.45 %	3.77 %	3.79 %
Rad S WM	6.36	3.64 %	-0.31%	-0.30 %
A – все поправки	6.60	-	3.33%	-

$$h(\Delta) = \frac{\sigma(\Delta) - \sigma(1)}{\sigma(\Delta)}$$

- 1) $h(\Delta)$ – “линейный» функционал
 $h(\Delta_1 \Delta_2) = h(\Delta_1) + h(\Delta_2)$
 (с точностью до долей %)
- 2) $h(\Delta)$ не зависит от изотопа (т.е. от входных данных)
- 3) $\sigma(\Delta_1 \Delta_2 \dots \Delta_n) \approx \sigma(1) (1 + h(\Delta_1) + h(\Delta_2) + \dots + h(\Delta_n))$

Расчет выхода ОБР ^{235}U для разных поправок и их комбинаций; Выходы ОБР в единицах $10^{-43} \text{ см}^2 \text{ дел}^{-1}$; Относительные погрешности выходов ОБР составляют порядка 2-3 %

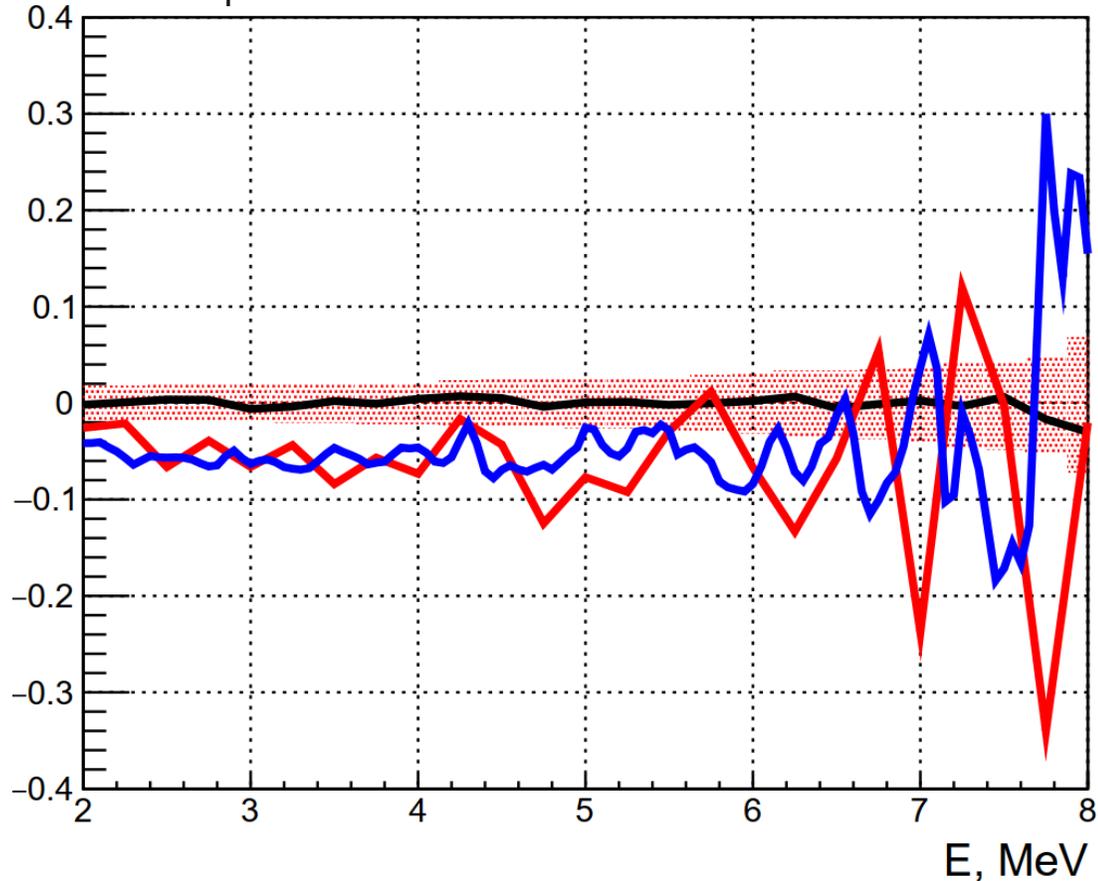
Устойчивость отношения выходов ОБР

Δ	σ^{235}	σ^{239}	σ^{241}	$\sigma^{235}/\sigma^{239}$	$\sigma^{235}/\sigma^{241}$
1	6.38	4.19	5.82	1.522	1.096
(L ₀ C) – конечный размер	6.62	4.34	6.04	1.525	1.096
S – экранирование	6.35	4.17	5.78	1.522	1.098
Rad – радиац. поправка	6.46	4.24	5.88	1.524	1.098
WM – слабый магнетизм	6.32	4.15	5.75	1.522	1.099
(L ₀ C) S	6.59	4.32	6.00	1.525	1.098
(L ₀ C)Rad	6.71	4.41	6.11	1.522	1.098
(L ₀ C)WM	6.55	4.30	5.97	1.523	1.097
S Rad	6.43	4.21	5.85	1.527	1.099
S WM	6.28	4.12	5.72	1.524	1.097
Rad WM	6.39	4.20	5.82	1.521	1.098
(L ₀ C) S Rad	6.67	4.37	6.08	1.526	1.097
(L ₀ C) S WM	6.51	4.27	5.94	1.525	1.096
(L ₀ C) Rad WM	6.63	4.35	6.05	1.524	1.096
Rad S WM	6.36	4.17	5.79	1.525	1.098
A – все поправки	6.60	4.33	6.01	1.524	1.098

Выходы ОБР в единицах 10^{-43} см² дел⁻¹; Относительные погрешности выходов ОБР составляют порядка 2-3 %; Абсолютная погрешность отношений во всех случаях ± 0.05

Спектральная поправка КИ

В предположении, что переоценен спектр ^{235}U



$$R(E) = (\rho_{\beta, KI}^{235} / \rho_{\beta, KI}^{239}) / (\rho_{\beta, ILL}^{235} / \rho_{\beta, ILL}^{239})$$

Черная кривая – сравнение конверсии КИ и Huber данных ILL без учета спектральной поправки КИ

Синяя кривая – спектральная поправка КИ $R(E) - 1$

Красная кривая – сравнение конверсии КИ и Huber данных ILL с учетом спектральной поправки КИ

Красный фон – полоса погрешностей процедуры конверсии

$$\sigma_{KI}^{235} = (6.26 \pm 0.12) \cdot 10^{-43} \text{ см}^2 \text{ дел}^{-1}$$

$$\sigma_{KI-ILL}^{235} = (6.60 \pm 0.14) \cdot 10^{-43} \text{ см}^2 \text{ дел}^{-1}$$

$$\sigma_{KI}^{239} = (4.55 \pm 0.12) \cdot 10^{-43} \text{ см}^2 \text{ дел}^{-1}$$

$$\sigma_{KI-ILL}^{239} = (4.33 \pm 0.12) \cdot 10^{-43} \text{ см}^2 \text{ дел}^{-1}$$

$$\left(\frac{\sigma_{KI}^{235}}{\sigma_{KI-ILL}^{239}} \right) = \left(\frac{\sigma_{KI-ILL}^{235}}{\sigma_{KI}^{239}} \right) = 1.45 \pm 0.05$$

Заключение

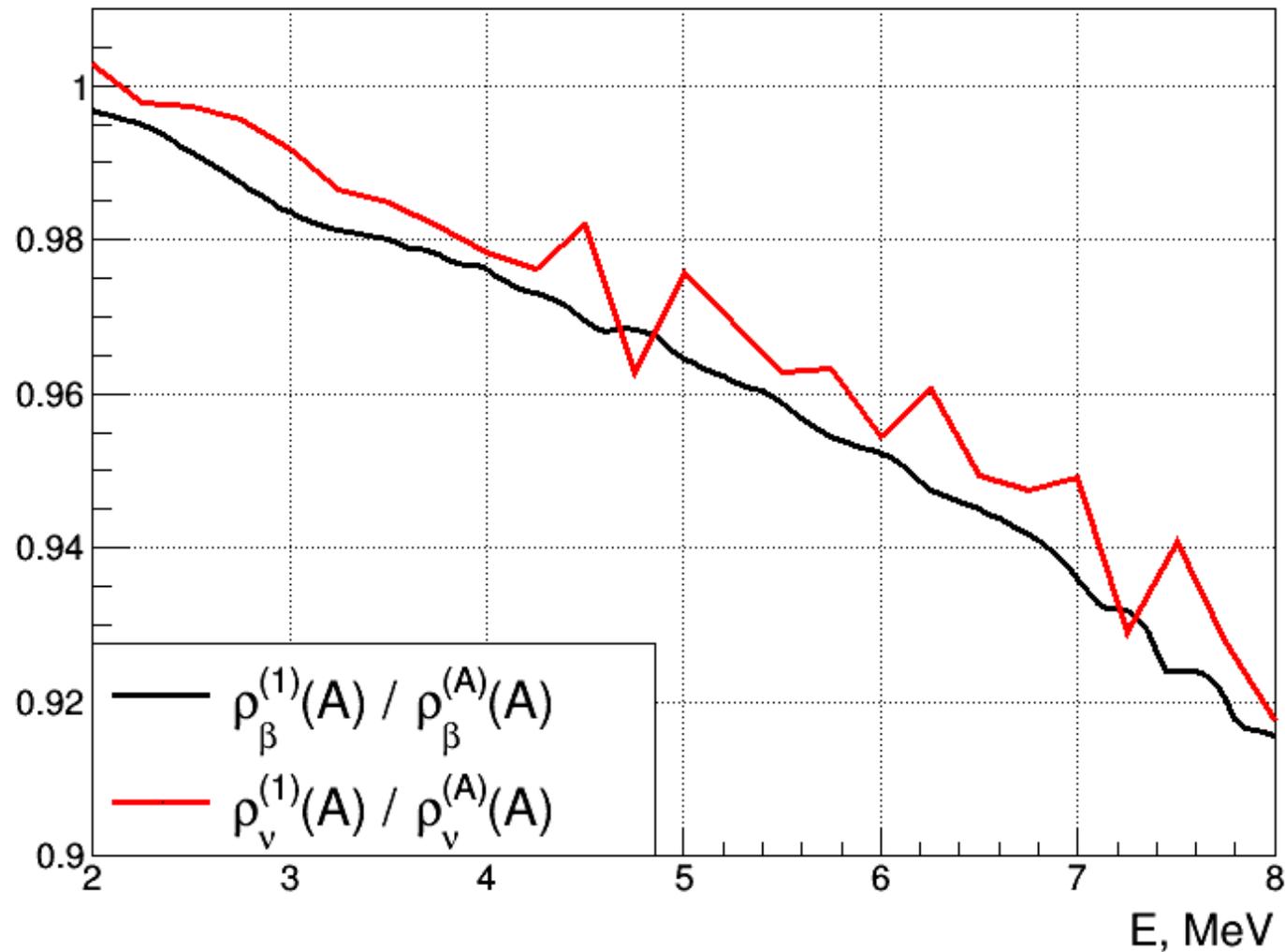
- Предложена и описана модель конверсии КИ для расчета спектров реакторных антинейтрино. Реализующее представленную модель программное обеспечение зарегистрировано в качестве РИД;
- Предложен метод повторной конверсии для анализа неопределенностей процедуры преобразования и входных данных;
- Рассчитаны погрешности процедуры конверсии модели КИ, которые сходятся с соответствующими погрешностями в других моделях;
- Показано, что вклады от различных поправок линейным (независимым) образом влияют на величину сечения ОБР на акт деления;
- Доказана устойчивость отношения выходов ОБР к процедуре конверсии и зависимость этого отношения только от отношения исходных кумулятивных бета-спектров;
- С учетом спектральной поправки КИ, рассчитаны спектры реакторных антинейтрино от ^{235}U и отношение выходов $\sigma^{235}/\sigma^{239}$, которое согласуется с экспериментальными данными – решение проблемы реакторной антинейтринной аномалии.

Спасибо за внимание!



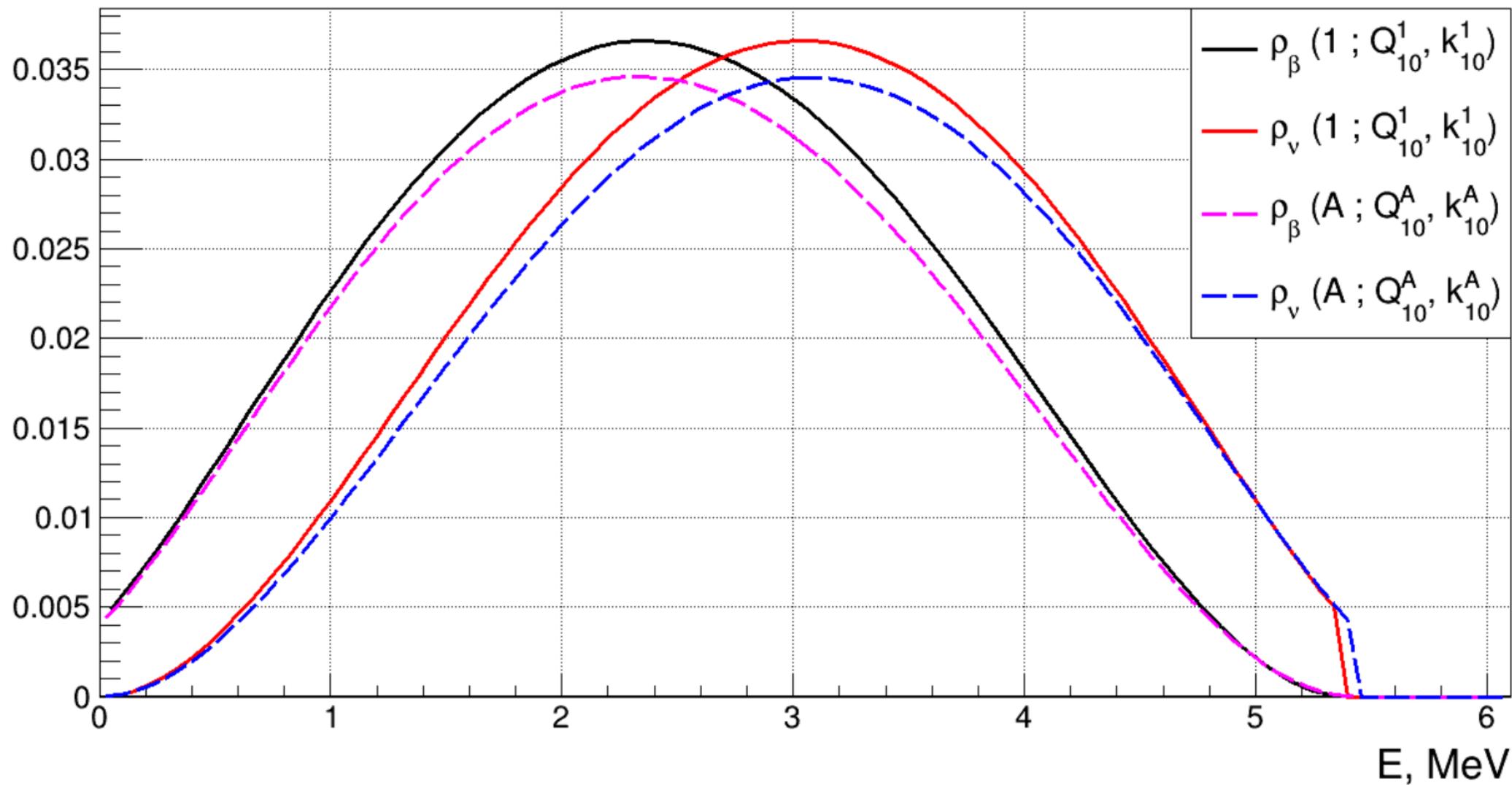
Backup

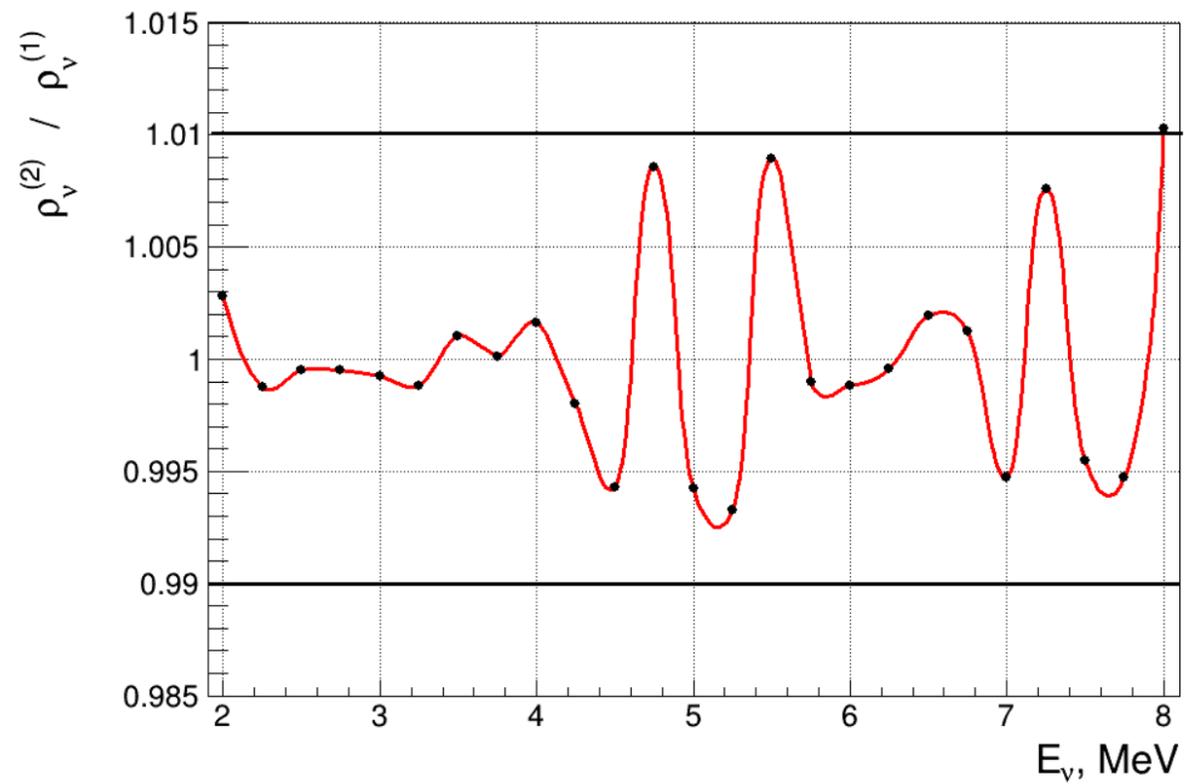
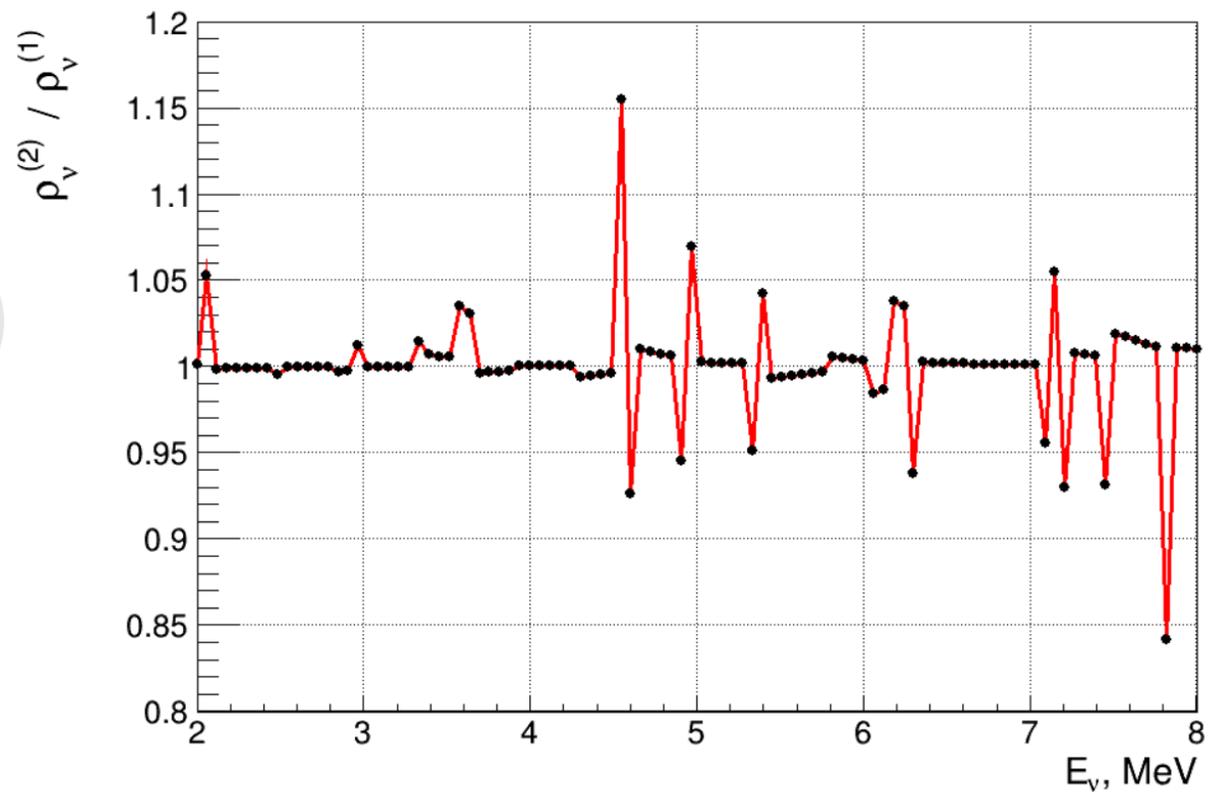




- 1) Проводим конверсию бета-спектра ILL без учета поправок, получаем набор $\{Q_i, k_i\}$
- 2) Строим кумулятивные бета-спектры и спектры антинейтрино с учетом всех поправок по набору $\{Q_i, k_i\}$ с учетом их перенормировки

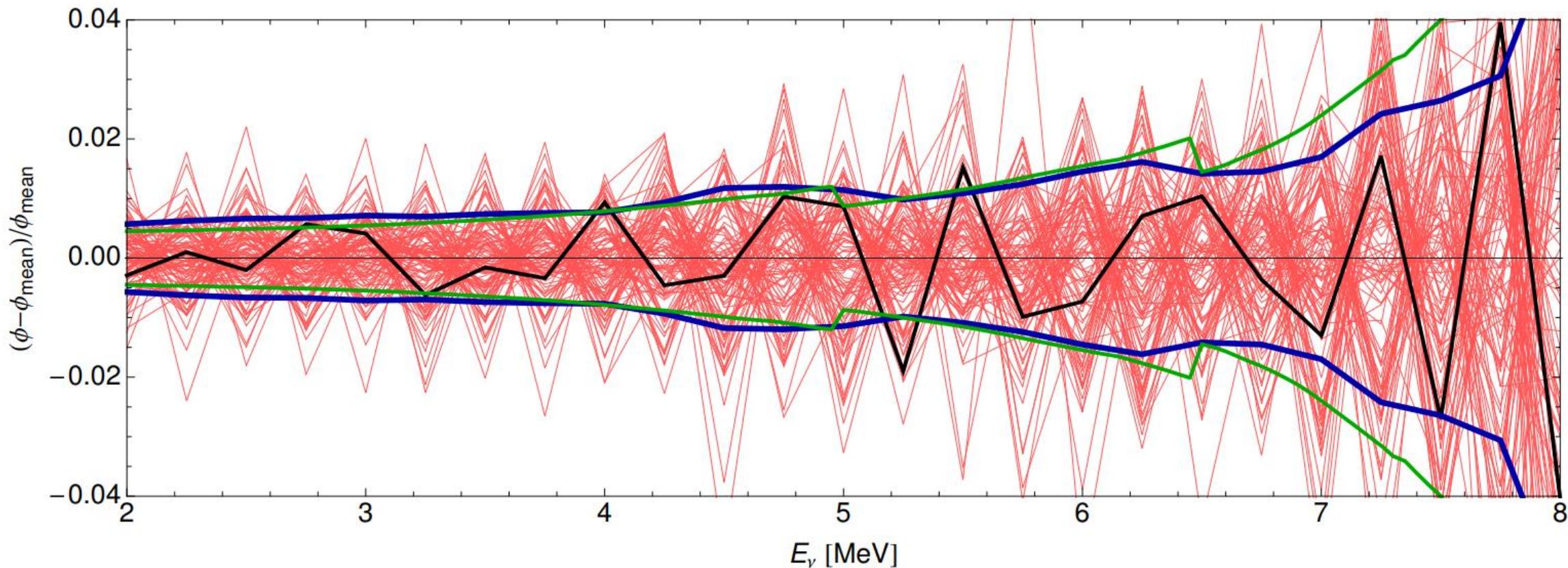
A – все поправки, 1 – без поправок





Huber P. «Determination of antineutrino spectra from nuclear reactors»

Phys. Rev. — 2011. — авг. — т. 84, №2 — arXiv:1106.0687 [hep-ph]



Красные линии – 100 случайных реализаций синтетического β -спектра для ^{235}U относительно среднего результата;

Черная линия – одна из реализаций;

Синяя линия – стандартное отклонение (для антинейтрино);

Зеленая линия – стандартное отклонение (для β -спектра), увеличенное в 7 раз;