

# Расчет кумулятивных спектров бета-частиц и антинейтрино 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 продуктов деления изотопов имеют расхождения с экспериментально полученными значениями. Более того, до сих пор ни одной научной группой не были объяснены расхождения модельных и экспериментальных позитронных спектров («*vi*tr»-эффект), которые напрямую связаны со спектрами антинейтрино.

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

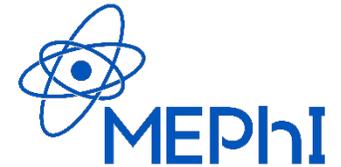
## Цель:

Развитие теоретической модели, по которой можно построить кумулятивные спектры бета-частиц и антинейтрино изотопов продуктов бета-распада.

## Задачи:

- Получить в первом приближении кумулятивные спектры бета-частиц и антинейтрино от основных изотопов, используемых как топливо для ядерных реакторов ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ );
- Сравнить кумулятивные спектры, рассчитанные в простейшем приближении, с экспериментальными спектрами и другими существующими моделями;
- Проанализировать возможные причины несоответствия модельных спектров с экспериментальными.

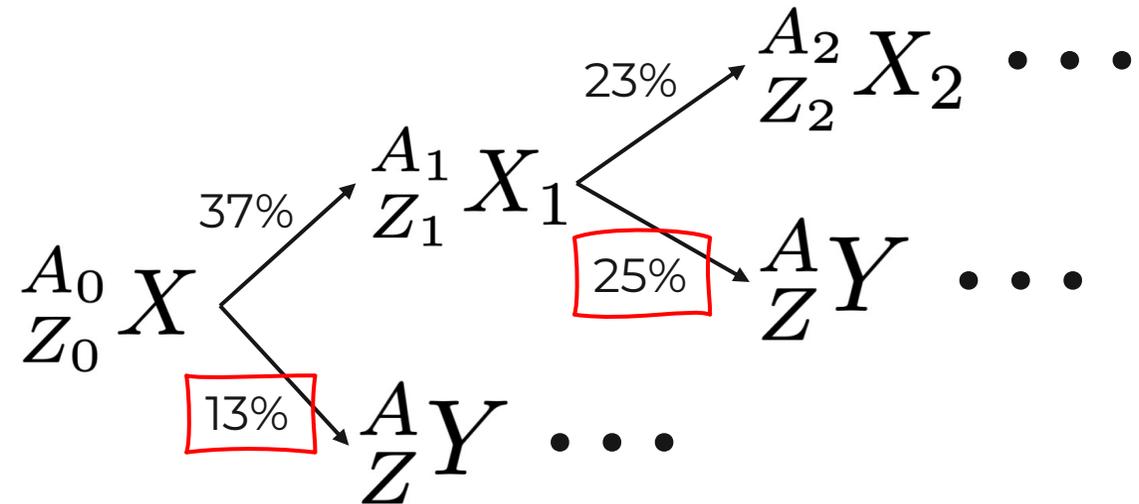
# Построение кумулятивного спектра



**Общая формула:**  $S_e^{tot} = \sum^n CY(Z, A) S_{ek}^{iso}$ ,  $S_{\bar{\nu}}^{tot} = \sum^n CY(Z, A) S_{\bar{\nu}k}^{iso}$

## Кумулятивный выход:

$CY(Z, A)$  - суммарная вероятность того, что нужное дочернее ядро с зарядовым числом  $Z$  и массовым числом  $A$  получится либо в результате непосредственно деления материнского ядра, либо как продукт деления одного из его осколков.



$$CY(Z, A) = 13\% + 37\% * 25\% + \dots$$

# Сравнение спектров с экспериментом

Сравнение спектров бета-частиц проводилось с экспериментами ILL/FRM II и моделью BESTIOLE.

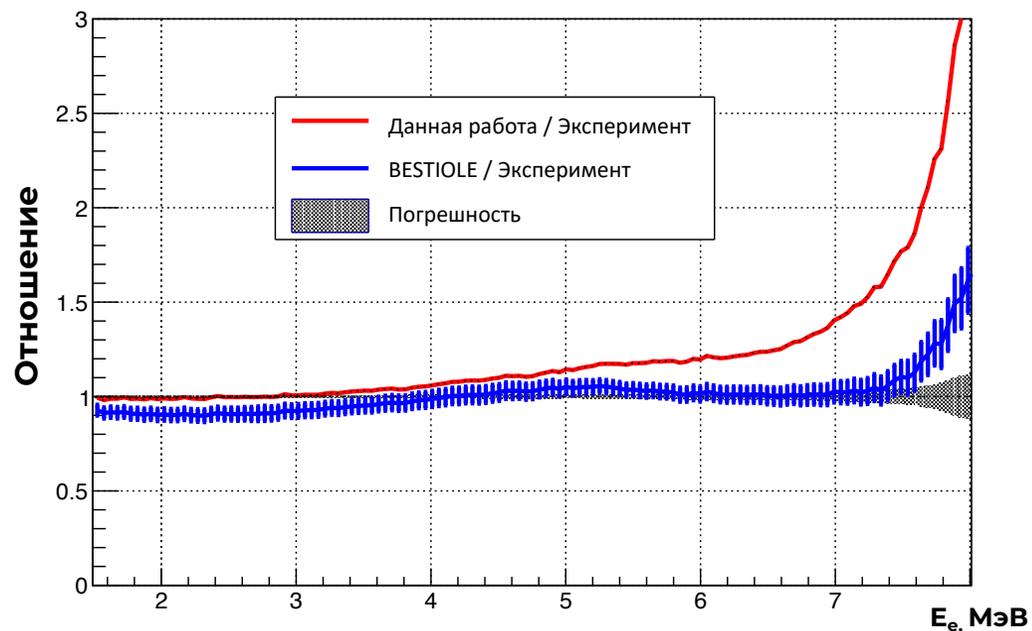


Рис. 1 – Отношение модельных спектров бета-частиц от  $\beta$ -распада  $^{235}\text{U}$  к экспериментальному спектру.

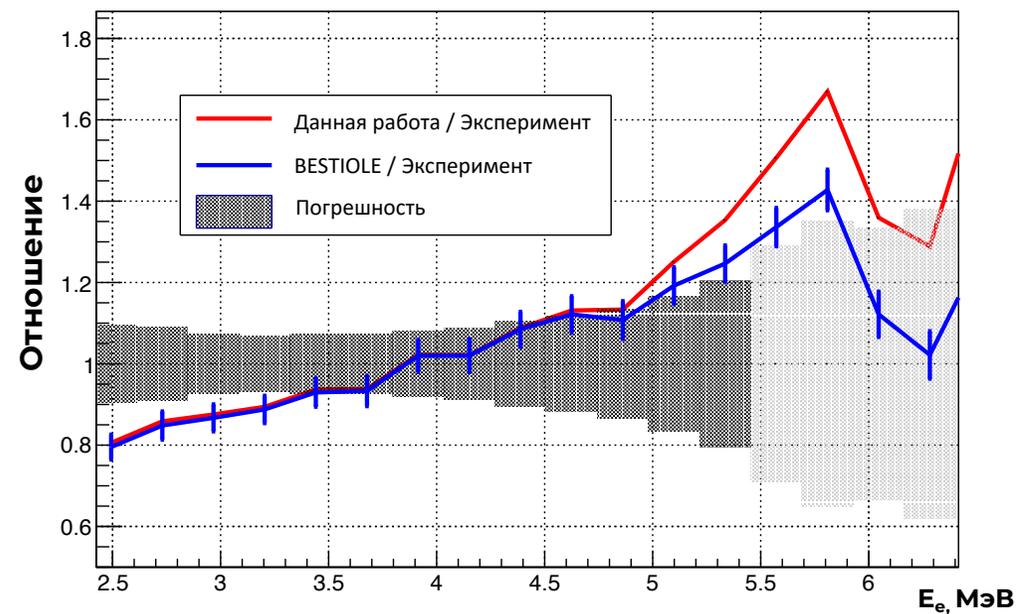


Рис. 2 – Отношение модельных спектров бета-частиц от  $\beta$ -распада  $^{238}\text{U}$  к экспериментальному спектру.

# Сравнение спектров с экспериментом

Сравнение спектров бета-частиц проводилось с экспериментами ILL/FRM II и моделью BESTIOLE.

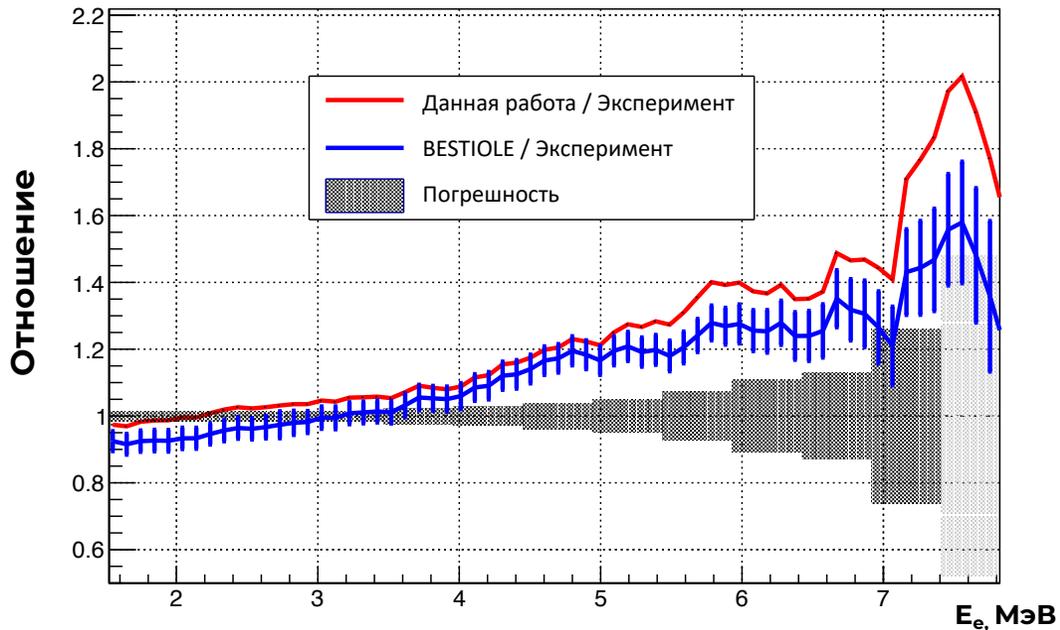


Рис. 3 – Отношение модельных спектров бета-частиц от  $\beta$ -распада  $^{239}\text{Pu}$  к экспериментальному спектру.

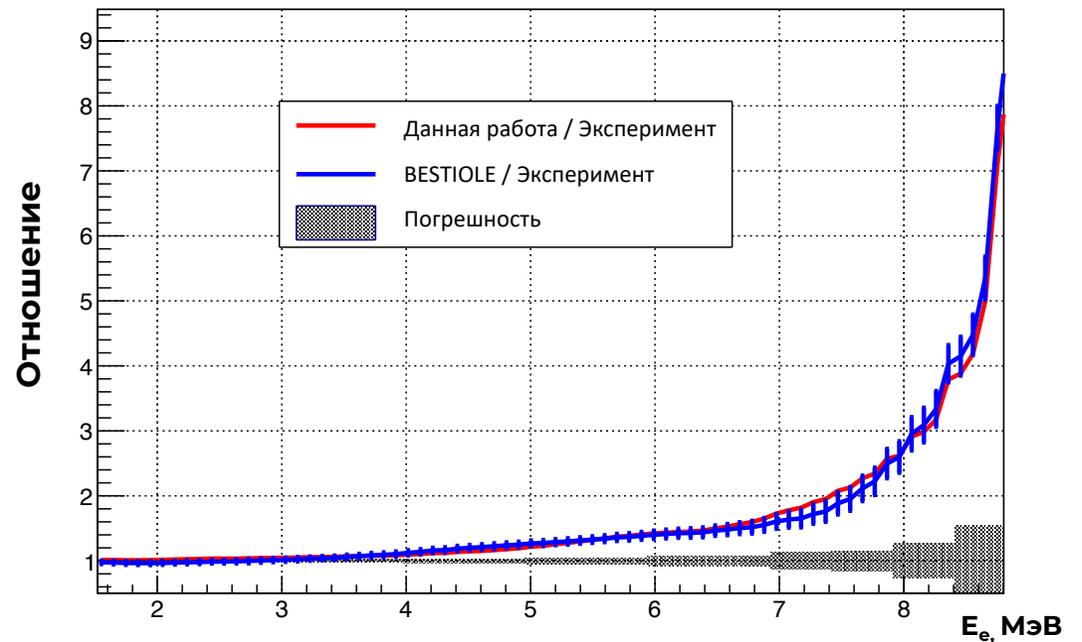
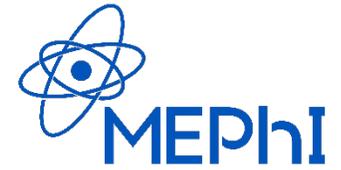


Рис. 4 – Отношение модельных спектров бета-частиц от  $\beta$ -распада  $^{241}\text{Pu}$  к экспериментальному спектру.

# Реконструирование позитронного спектра



Реакция обратного бета-распада (ОБР):  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

**Общий вид реконструированного позитронного спектра:**

$$\frac{dN_{e^+}}{dE_{e^+}}(E_{e^+}) = \epsilon N_p \int_{E_{\bar{\nu}} \min}^{E_{\bar{\nu}} \max} \Phi_{\bar{\nu}}(E_{\bar{\nu}}) \cdot \frac{d\sigma_{IBD}}{dE_{e^+}}(E_{e^+}, \bar{\nu}) dE_{\bar{\nu}}$$

$$\Phi_{\bar{\nu}}(E_{\bar{\nu}}) = \frac{P_{th} S_{\bar{\nu}}^{tot}(E_{\bar{\nu}})}{4\pi L^2 \epsilon}$$

**Универсальная форма спектра, не зависящая от характеристик экспериментальной установки:**

$$S_{e^+}(E_{e^+}) = \int_{E_{\bar{\nu}} \min}^{E_{\bar{\nu}} \max} S_{\bar{\nu}}^{tot}(E_{\bar{\nu}}) \cdot \frac{d\sigma_{IBD}}{dE_{e^+}}(E_{e^+}, E_{\bar{\nu}}) dE_{\bar{\nu}}$$

$\epsilon$  — эффективность регистрации;  
 $N_p$  — число протонов мишени;  
 $\Phi_{\bar{\nu}}$  — поток реакторных антинейтрино;  
 $P_{th}$  — тепловая мощность реактора;  
 $L$  — расстояние от детектора до реактора;  
 $\epsilon$  — тепловая энергия, выделяемая при делении.

# Реконструирование позитронного спектра

Сравнение позитронных спектров проводилось с экспериментами DayaBay/PROSPECT и моделью BESTIOLE.

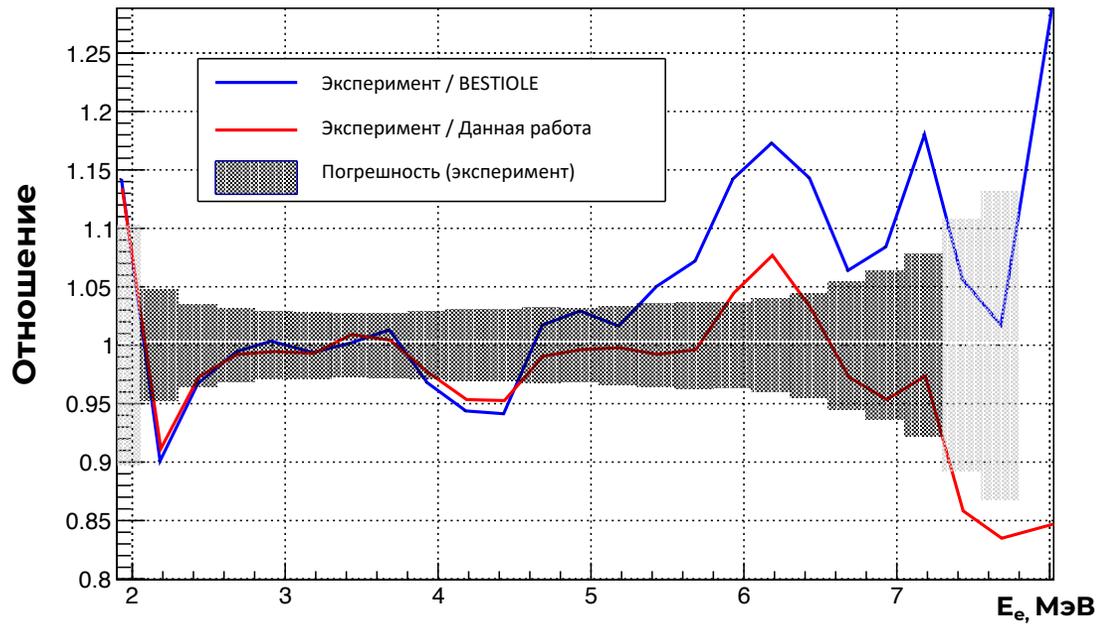


Рис. 5 – Отношение экспериментального позитронного спектра от деления  $^{235}\text{U}$  к модельным позитронным спектрам.

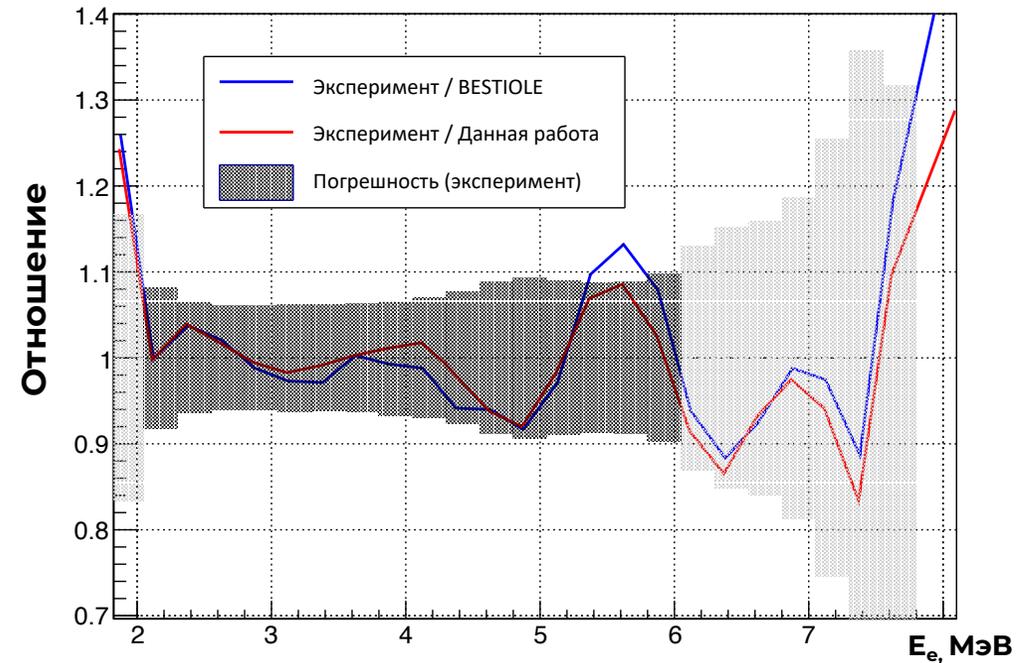


Рис. 6 – Отношение экспериментального позитронного спектра от деления  $^{239}\text{Pu}$  к модельным позитронным спектрам.

- Анализ возможных причин несоответствия теоретических и экспериментальных спектров и поиск возможных значений варьируемых параметров для устранения расхождения.



# Дальнейшие задачи

- Анализ возможных причин несоответствия теоретических и экспериментальных спектров и поиск возможных значений варьируемых параметров для устранения расхождения.

$$S_e^{ILL}$$

Изменение схемы распадов  
Пересчет кумулятивных выходов  
Учет метастабильных изотопов  
Поправки  
Учет запрещенности переходов

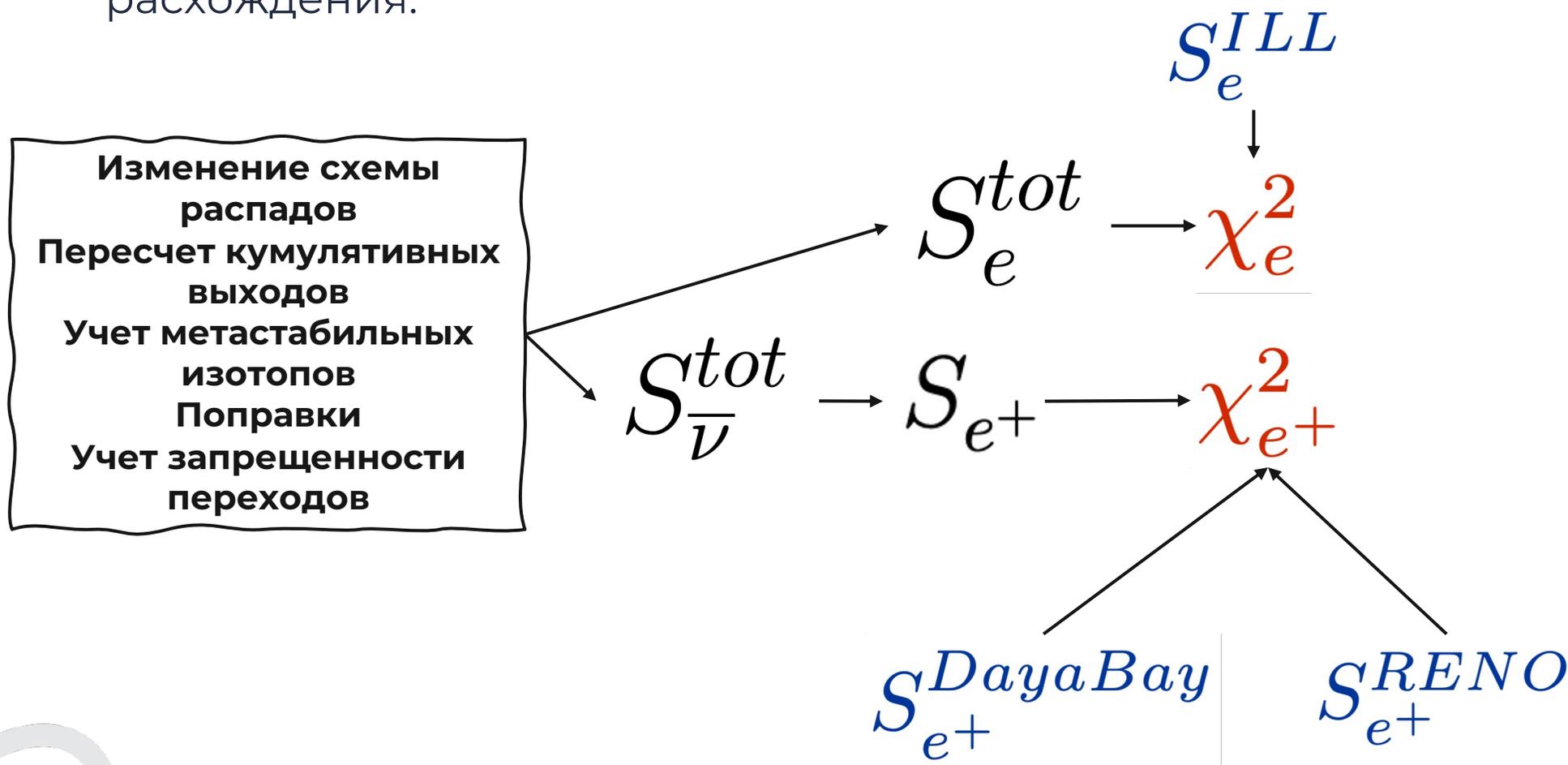
$$S_e^{tot} \leftarrow S_{\bar{\nu}}$$

$$S_{e^+}^{DayaBay}$$

$$S_{e^+}^{RENO}$$

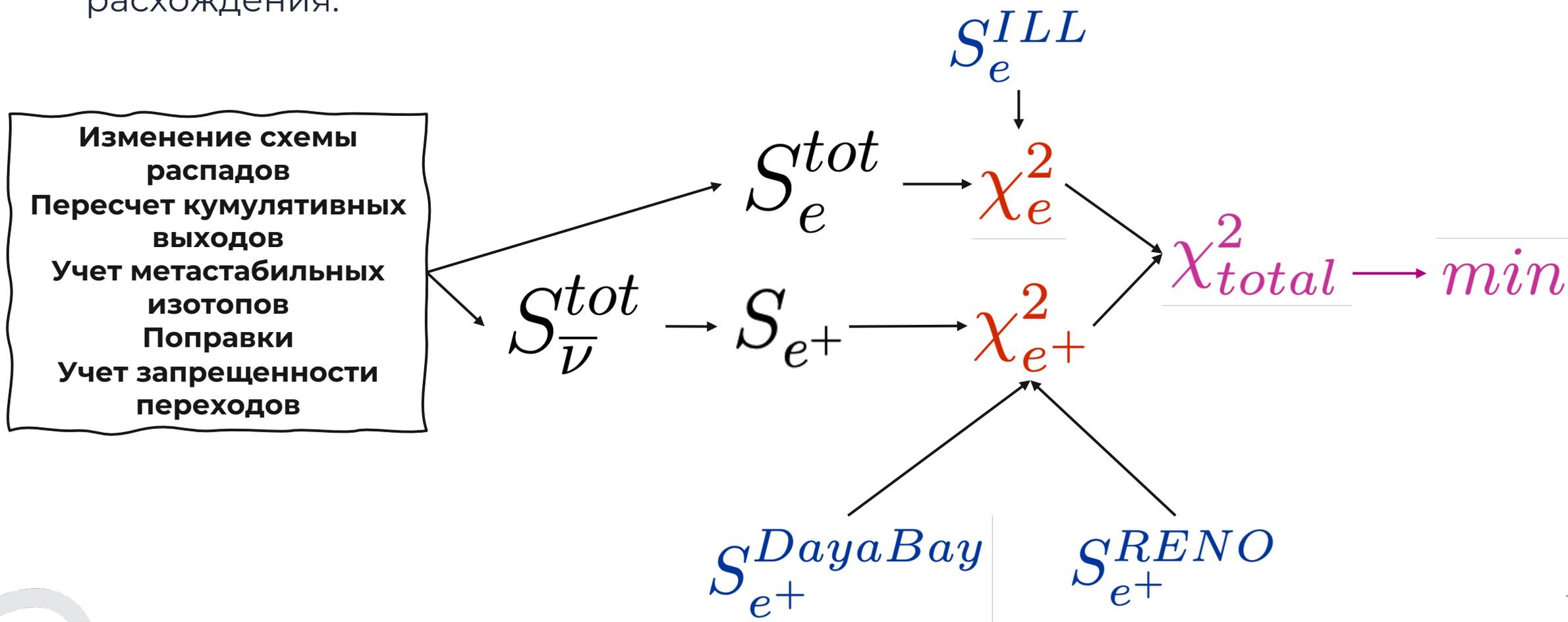
# Дальнейшие задачи

- Анализ возможных причин несоответствия теоретических и экспериментальных спектров и поиск возможных значений варьируемых параметров для устранения расхождения.

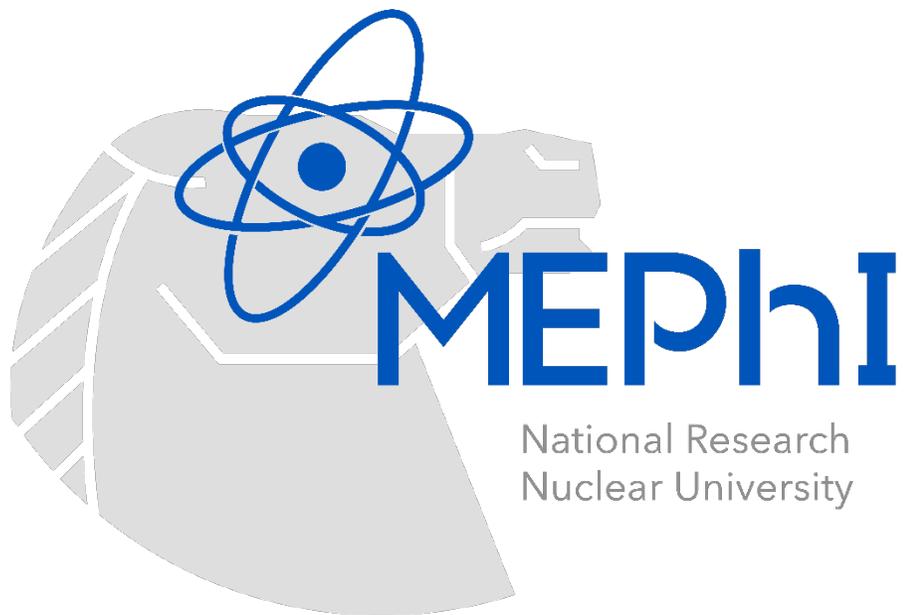


# Дальнейшие задачи

- Анализ возможных причин несоответствия теоретических и экспериментальных спектров и поиск возможных значений варьируемых параметров для устранения расхождения.



- Были реконструированы кумулятивные спектры бета-частиц и антинейтрино, а также позитронные спектры основных радионуклидов, используемых в качестве топлива для ядерных реакторов;
- Из отношений спектров бета-частиц (Рис. 1-4) видно, что настоящая модель имеет значительное сходство с моделью BESTIOLE, особенно для изотопа  $^{241}\text{Pu}$ . Однако настоящая модель имеет лучшее соответствие с экспериментом в мягкой области (до 3 МэВ), чем модель BESTIOLE, но имеет большее расхождение в зоне высоких энергий.
- Из отношений позитронных спектров (Рис. 5-6) видно явное превышение экспериментальных значений над теоретическими в зоне 5-6 МэВ.



**Спасибо за  
внимание!**

Москва, 2025

# Дополнительные слайды (1)

Полученные из кумулятивных спектров антинейтрино позитронные спектры:

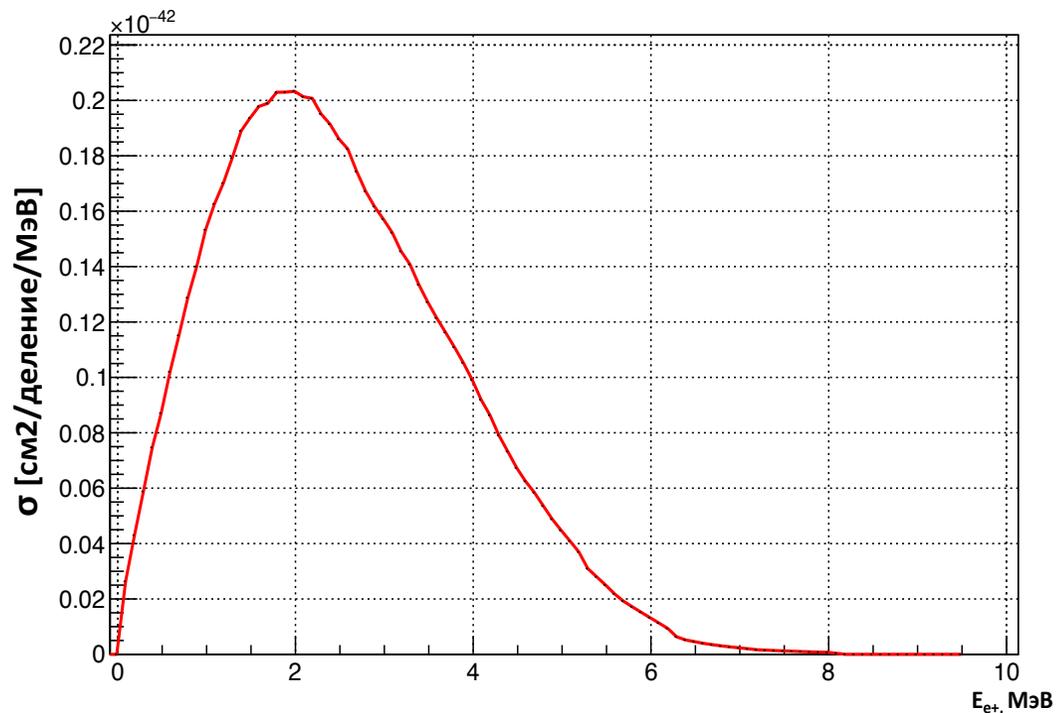


Рис. 5 – Реконструированный позитронный спектр от деления изотопа  $^{235}\text{U}$ .

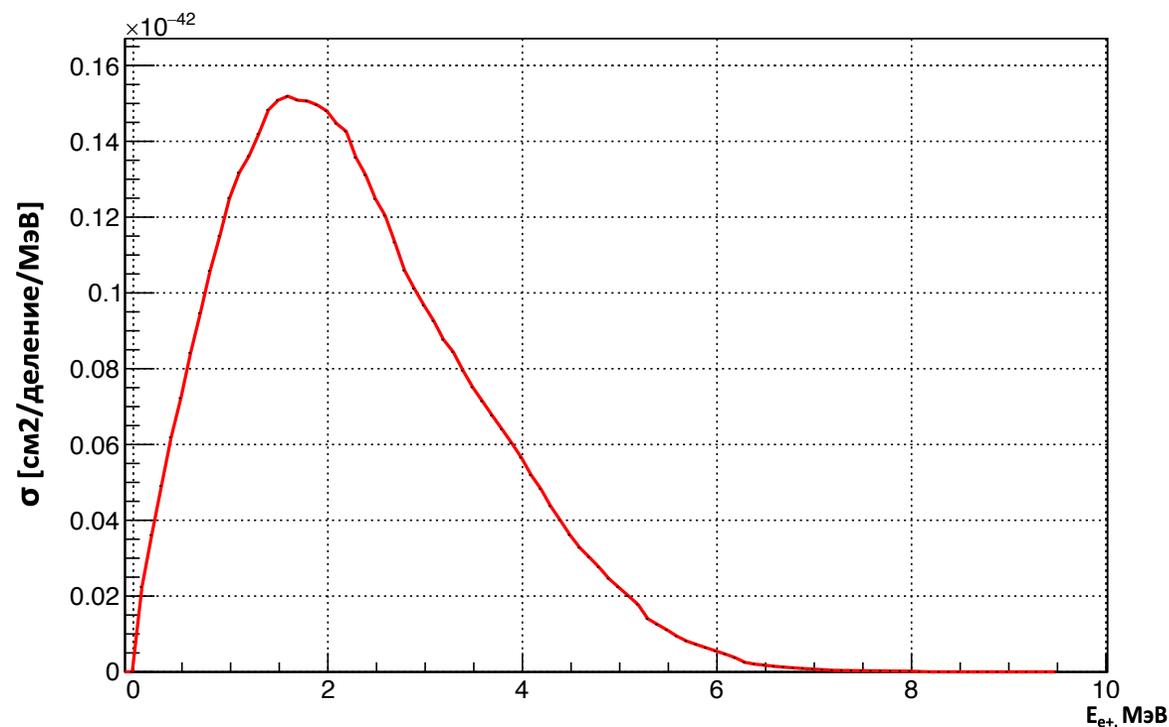
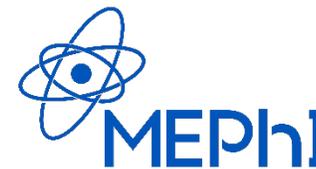


Рис. 6 – Реконструированный позитронный спектр от деления изотопа  $^{239}\text{Pu}$ .

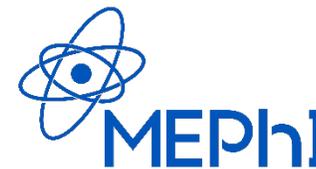
# Дополнительные слайды (2)



## Список использованных источников:

1. Thomas S. A., Abdalla F. B., Lahav O. Upper Bound of 0.28 eV on Neutrino Masses from the Largest Photometric Redshift Survey // Physical Review Letters. — 2010. — July. — Vol. 105, no. 3. — ISSN 1079-7114. — DOI:10.1103/physrevlett.105.031301.
2. Reines F., Cowan C. L. Detection of the Free Neutrino // Physical Review. — 1953. — Nov. — Vol. 92, no. 3. — P. 830–831. — ISSN 0031-899X. — DOI: 10.1103/physrev.92.830.
3. Reines F., Cowan C. L. Free Antineutrino Absorption Cross Section. I. Measurement of the Free Antineutrino Absorption Cross Section by Protons // Physical Review. — 1959. — Jan. — Vol. 113, no. 1. — P. 273–279. — ISSN 0031-899X. — DOI: 10.1103/physrev.113.273.
4. Neutrino oscillations: status and prospects for the determination of neutrino mass ordering and the leptonic CP-violation phase / L. D. Kolupaeva [etal.] // Physics-Uspe. — 2022. — May. — Vol. 66, no. 08. — P. 753–774. — ISSN 1468-4780. — DOI: 10.3367/ufne.2022.05.039191.
5. Б. С. Дзеляпов Л. Н. З. Влияние электрического поля атома на Бета-распад // АН СССР. — 1956.
6. В. Г. Алексанкин С. В. Родичев П. М. Р. и д. Бета- и антинейтринное излучение радиоактивных ядер : Справочник // Энергоатомиздат. — 1989.
7. Hayes A. C., Vogel P. Reactor Neutrino Spectra // Annual Review of Nuclear and Particle Science. — 2016. — Oct. — Vol. 66, no. 1. — P. 219–244. — ISSN 1545-4134. — DOI: 10.1146/annurev-nucl-102115-044826.
8. Mougeot X., B´e M.-M., Bisch C. Calculation of beta spectral shapes // Radioprotection. — 2014. — Сент. — Т. 49, № 4. — С. 269–273. — ISSN 1769-700X. — DOI: 10.1051/radiopro/2014017.
9. Lanczos C. A Precision Approximation of the Gamma Function // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics Series B Numerical Analysis. — 1964. — Jan. — Vol. 1, no. 1. — P. 86–96. — ISSN 0887-459X. — DOI: 10.1137/0701008.13
10. Strumia A., Vissani F. Precise quasielastic neutrino/nucleon cross-section // Physics Letters B. — 2003. — Июль. — Т. 564, № 1/2. — С. 42–54. — ISSN 0370-2693. — DOI: 10.1016/s0370-2693(03)00616-6.

# Дополнительные слайды (3)



## Список использованных источников:

11. Measurement of reactor antineutrino flux and spectrum at RENO / S. G. Yoon [и др.] // Physical Review D. — 2021. — Дек. — Т. 104, № 11. — ISSN 2470-0029. — DOI: 10.1103/physrevd.104.1111301.
12. Joint Determination of Reactor Antineutrino Spectra from  $^{235}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$  Fission by Daya Bay and PROSPECT / F. P. An [и др.] // Physical Review Letters. — 2022. — Февр. — Т. 128, № 8. — ISSN 1079-7114. — DOI: 10.1103/physrevlett.128.081801.
13. Determination of the antineutrino spectrum from  $^{235}\text{U}$  thermal neutron fission products up to 9.5 MeV / K. Schreckenbach [и др.] // Physics Letters B. — 1985. — Окт. — Т. 160, № 4/5. — С. 325—330. — ISSN 0370-2693. — DOI:10.1016/0370-2693(85)91337-1.
14. Antineutrino spectra from  $^{241}\text{Pu}$  and  $^{239}\text{Pu}$  thermal neutron fission products / A. Hahn [и др.] // Physics Letters B. — 1989. — Февр. — Т. 218, № 3. — С. 365—368. — ISSN 0370-2693. — DOI: 10.1016/0370-2693(89)91598-0.
15. Experimental Determination of the Antineutrino Spectrum of the Fission Products of  $^{238}\text{U}$  / N. Haag [и др.] // Physical Review Letters. — 2014. — Март. — Т. 112, № 12. — ISSN 1079-7114. — DOI: 10.1103/physrevlett.112.122501.
16. A comprehensive revision of the summation method for the prediction of reactor antineutrino fluxes and spectra / L. Periss´e [и др.]. — 2023. — DOI:10.48550/ARXIV.2304.14992.