

Расчетные спектры антинейтрино изотопов ядерного топлива, согласованные с экспериментальными

В.В. Синев, П.И. Альжев, С.В. Ингерман, П.Ю. Наумов, А.П. Власенко

ЯДРО-2025, С.-Петербург, 1 – 6 июля 2025

Определения:

Спектр антинейтрино ядерного реактора – сумма энергетических спектров антинейтрино, испускаемых всеми осколками деления (ядрами, перегруженными нейтронами), находящимися в активной зоне ядерного реактора

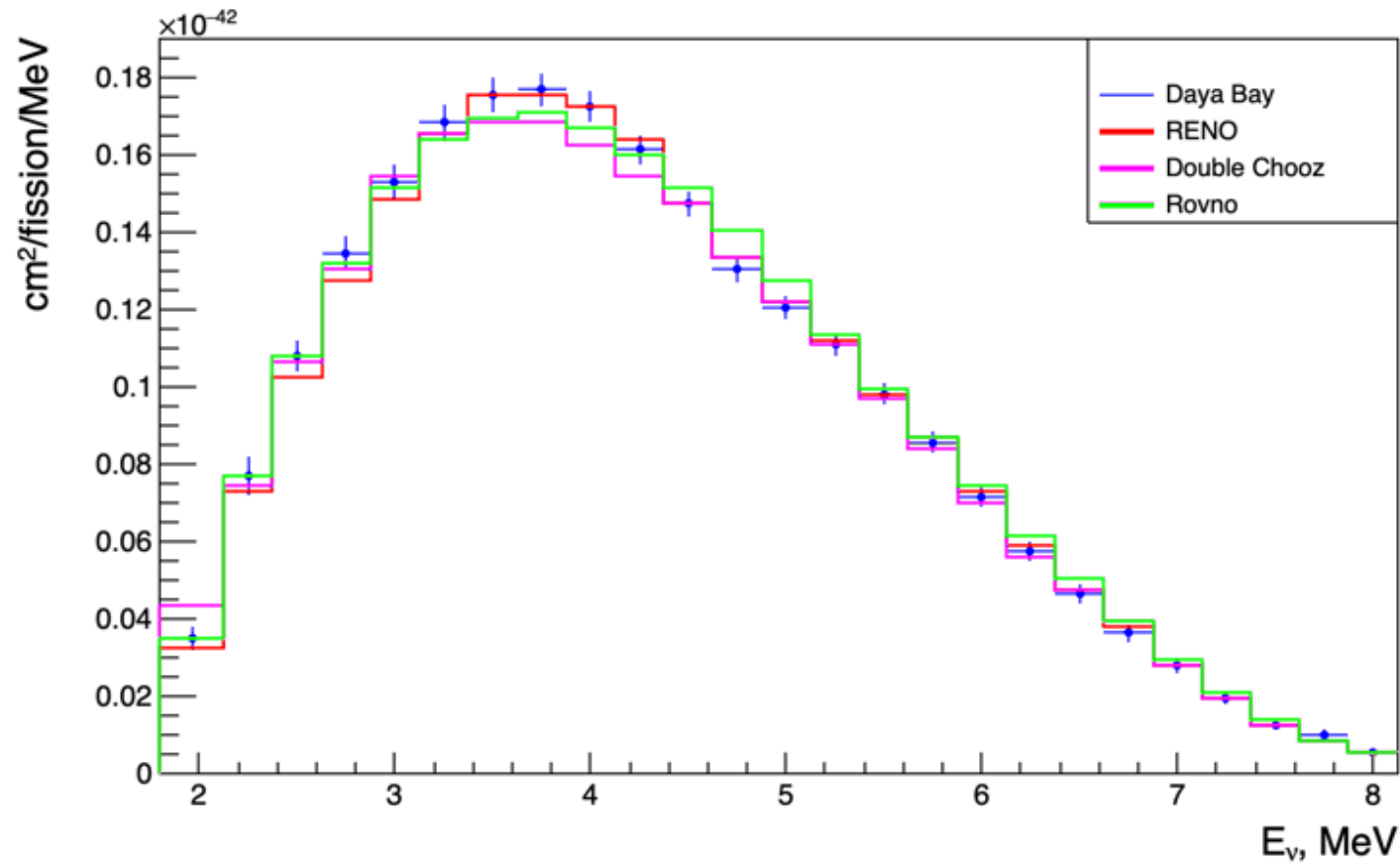
Спектр антинейтрино делящегося изотопа (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) – сумма спектров антинейтрино, испускаемых осколками деления только от данного изотопа

Прямой выход осколка (ядра) – вероятность возникновения ядра непосредственно при делении

Кумулятивный выход – сумма прямого выхода и выходов предыдущих распадчиков, образующих цепочку бета-распадов

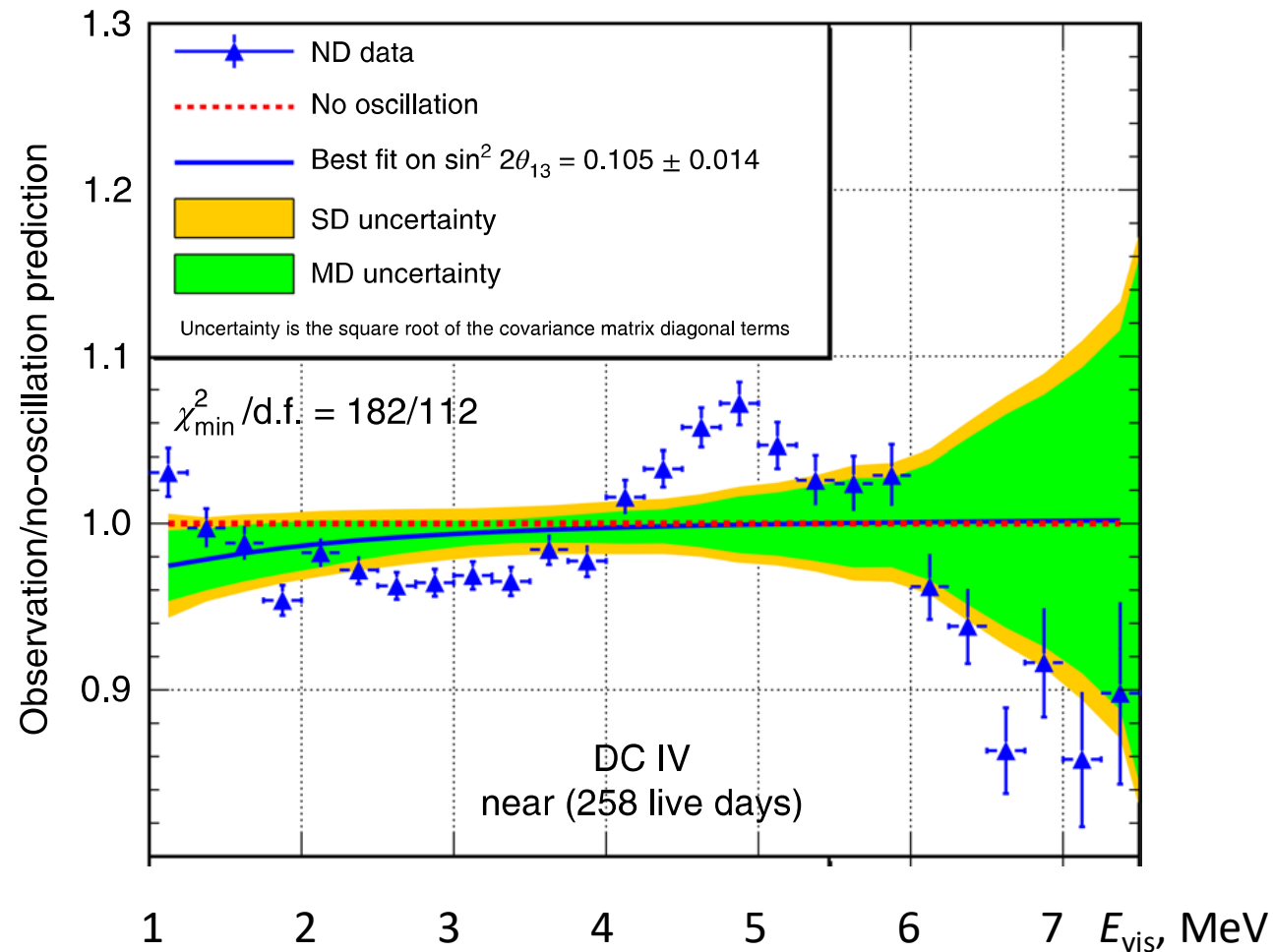
Предложен метод расчета спектров антинейтрино, основанный на вариации схем бета-распада неизвестных и оцененных ядер. Этот метод позволяет находить схемы распада ядер, которые невозможно получить другим путем из-за очень коротких времен периодов полураспада.

Спектры антинейтрино четырех экспериментов, взвешенные с сечением



Метод расчета, основанный на суммировании индивидуальных спектров антинейтрино осколков деления не может описать полученные экспериментально спектры антинейтрино от ядерного реактора

Пример отношения измеренного и расчетного спектров Double Chooz

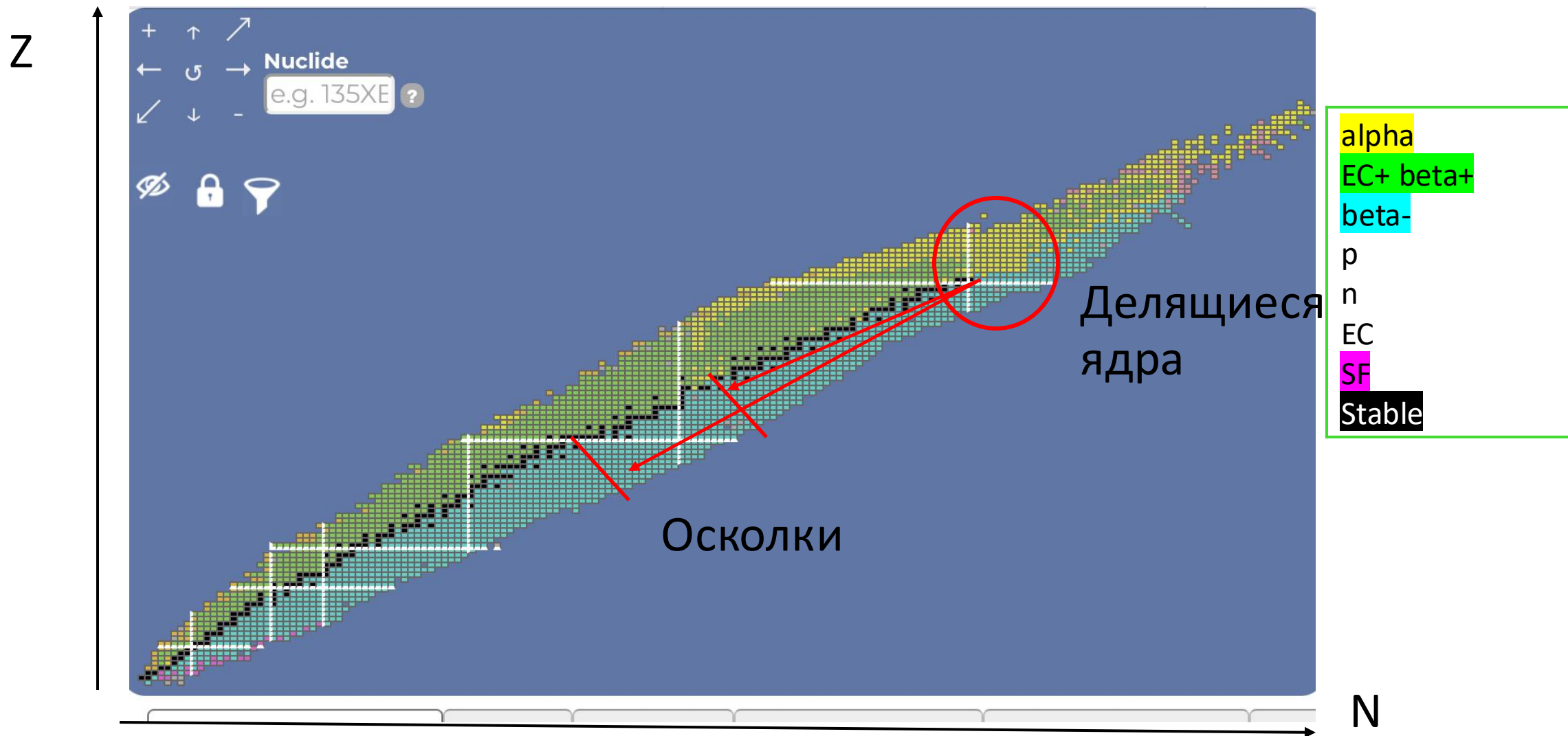


Расчет опирается на базы данных осколков деления, содержащие данные по вероятностям их бета-распада.

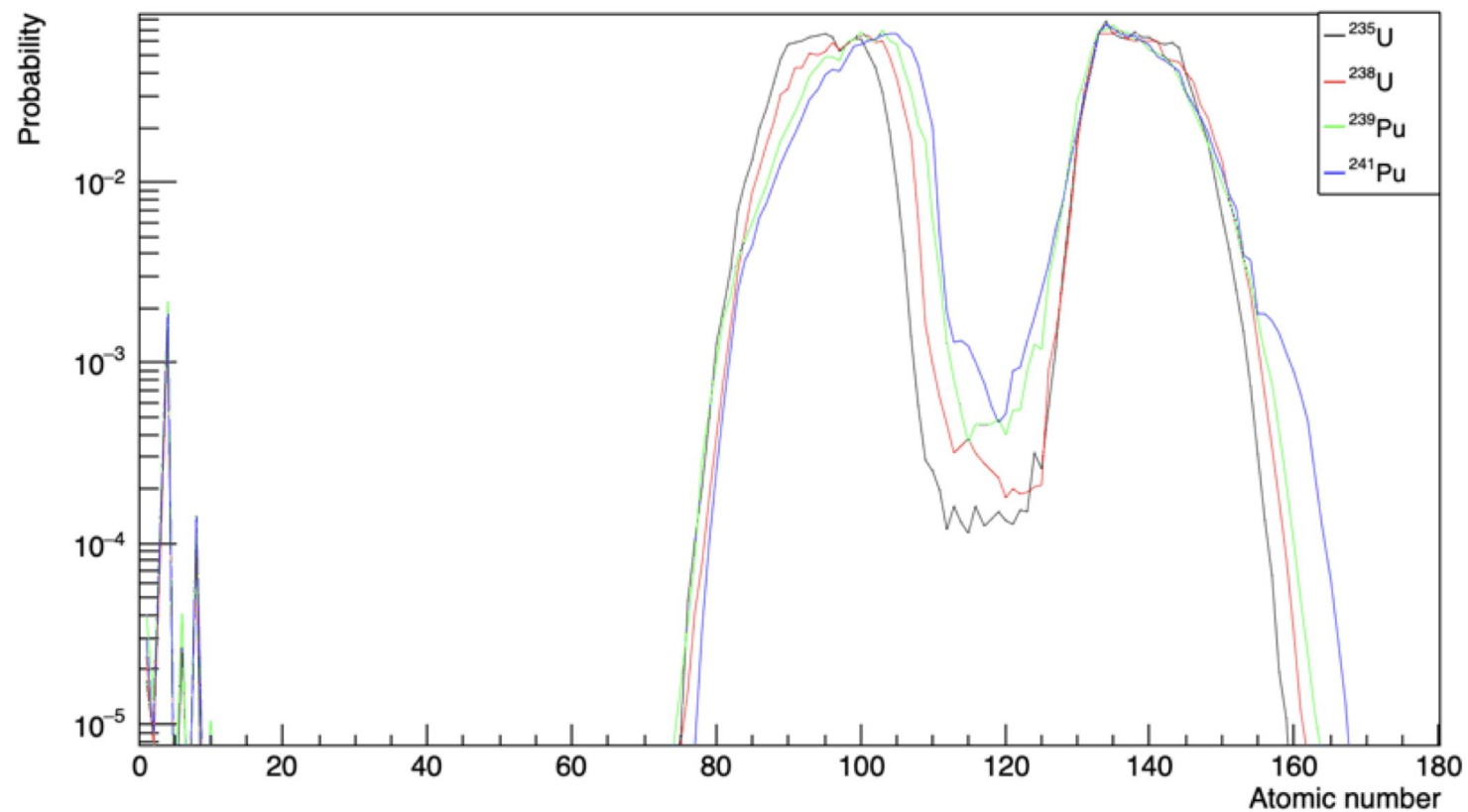
Расчет опирается на базы данных осколков деления, содержащие данные по вероятностям их бета-распада.

Насколько точны эти данные?

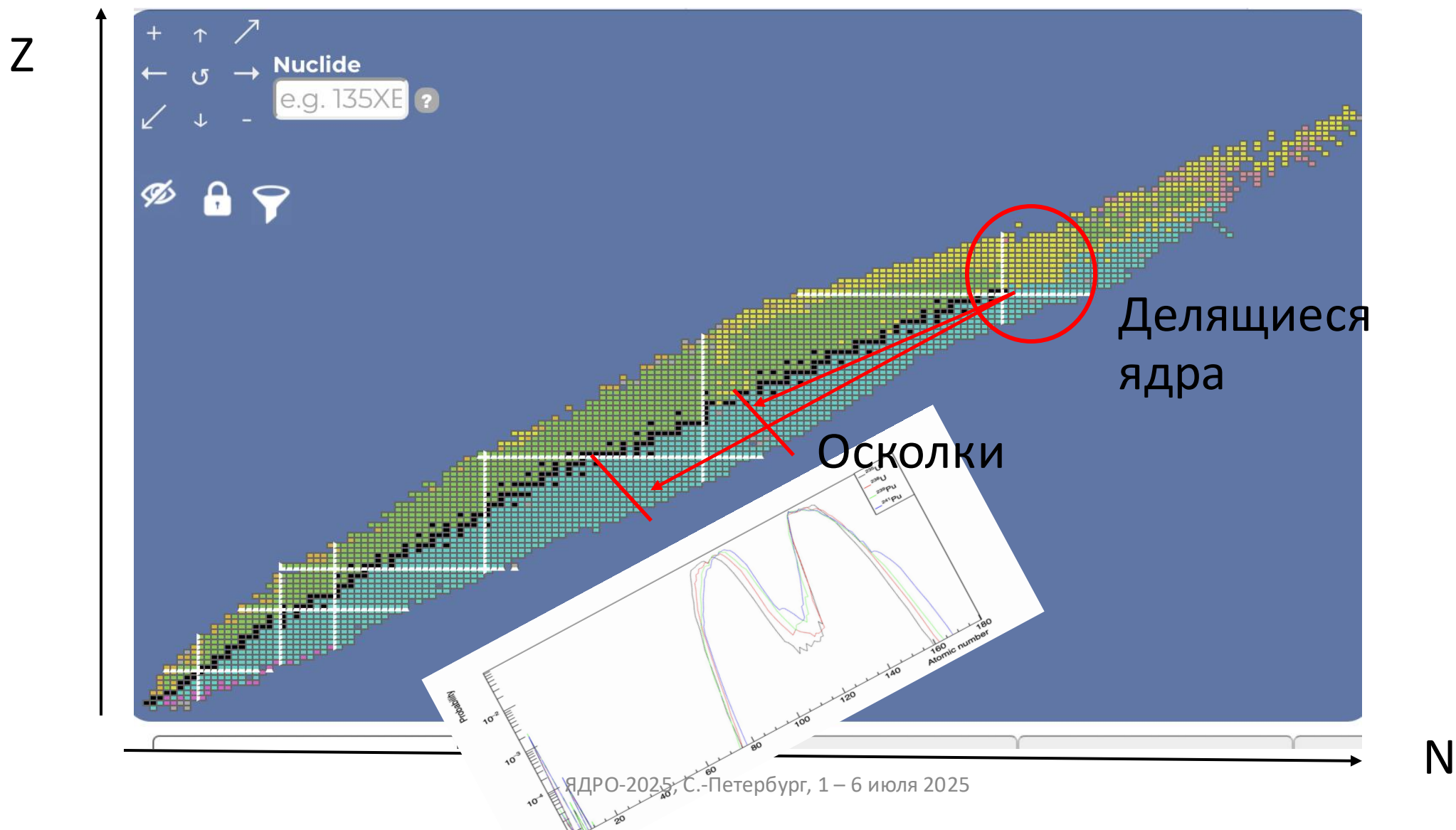
Деление тяжелых ядер происходит на два осколка неравной массы



Массовое распределение осколков деления



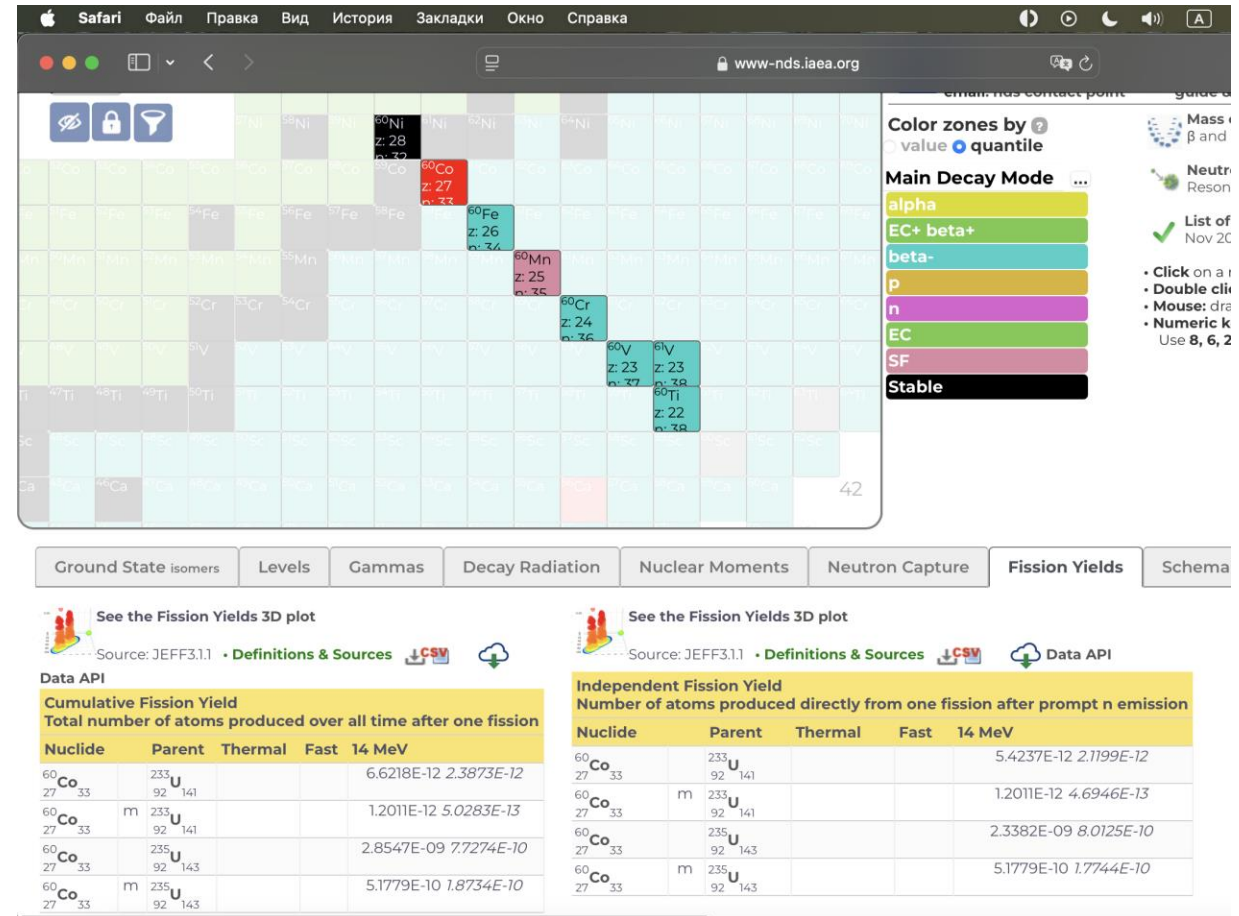
Расчет опирается на базы данных осколков деления, содержащие данные по вероятностям их бета-распада. Насколько точны эти данные?



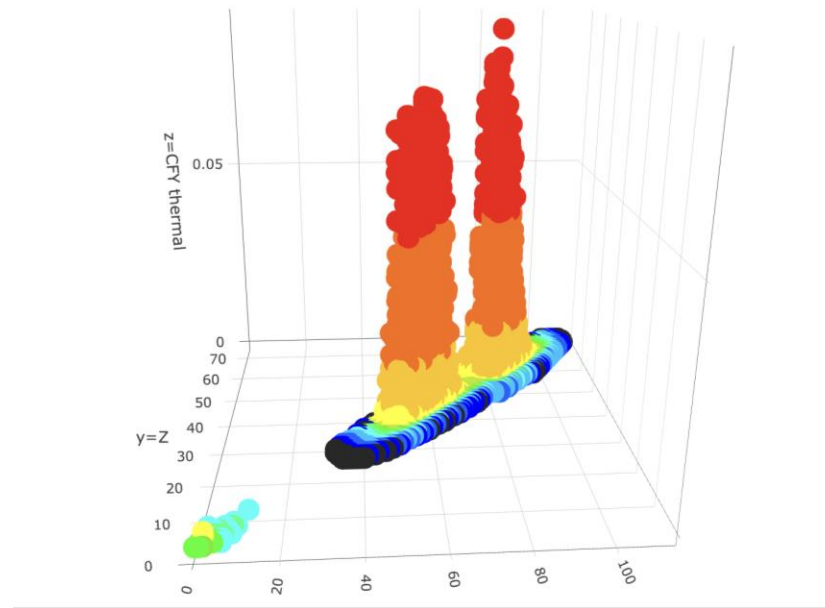
Анализ показал, что в базах данных только треть всех осколков имеет полностью известные схемы распада. Одна треть является полностью неизвестной, и еще одна треть имеет схемы распада, основанные на расчете по известным моделям ядра.

The example of charge chain with mass A = 60

Cr 60 24 0.49 s 0 0 2.6138e-12 1.0211e-11 3 1 2
 5701 0.102
 6059 0.886
 6111 0.012
 Mn 60 25 1.77 s 0 0 2.7318e-12 5.2985e-12 8 0.885 1
 5217 0.00503
 5229 0.0302
 5362 0.00591
 5522 0.02391
 5643 0.03523
 5923 0.81792
 6416 0.05537
 6601 0.02643
 Mn 60 25 0.28 s 0 0 3.0759e-13 5.9658e-13 4 1 1
 6088 0.02994
 6470 0.0499
 7621 0.04192
 8445 0.87824
 Fe 60 26 2.62e+06 y 0 0 0 0 1 1 1
 178 1
 Co 60 27 10.467 m 0 0 0 0 2 0.0025 1
 722.78 0.03459
 1548.88 0.95641
 Co 60 27 1925.28 d 0 0 0 0 2 1 1
 317.88 0.9988
 1492 0.12
 Ni 60 28 1e+30 y 0 0 0 0 0 1



Our data base contains information on beta-decays of nuclei
with masses $A = 58$ до $A = 191$
In total more than 1000 nuclei.
for ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu and ^{241}Pu



Трехмерная картинка кумулятивных
выходов ядер – осколков при делении
тяжелых ядер, содержащиеся в базе Live
Chart of Nuclides.

Предлагаемый метод расчета включает в себя варьирование вероятностей бета-распада при сравнении с экспериментальным спектром.

Варьируются вероятности у осколков с неизвестными схемами распада.

Proposed method vary the probabilities of beta-decay branches to fit experimental antineutrino spectrum

Safari Файл Правка Вид История Закладки Окно Справка

www.nds.iaea.org

Nuclide

Live Chart of Nuclides
nuclear structure and decay data ms: *4027*
email: nds contact point guide & sources

Color zones by
value ☒ quantile

Main Decay Mode

- alpha
- EC+ beta+
- beta-
- p
- n
- EC
- SF
- Stable

Mass chains
β and ec decays plotting

Neutron Cross Sections
Resonance Integrals

List of updates
Oct 2024 - Mar 2025

- Click on a nuclide to fill the data tabs.
- Double click to bring it to the centre.
- Mouse: drag to move wheel to zoom
- Numeric keypad: zoom with **3** and **7**
Use **8, 6, 2, 4, 9, 1** to move and **5** to reset

☐ Decay radiation order by intensity

Ground State isomers Levels Gammas **Decay Radiation** Nuclear Moments Neutron Capture Fission Yields Schema Plot

Parent - Daughter Chain

Comments **Click on a column header to open the guide** **Uncertainty** for numeric values refers to the last digits of the value: **12.1 23 means 12.1 ± 2.3**

Data from: ENSDF apart Q from **AME2020** **Definitions & Sources**

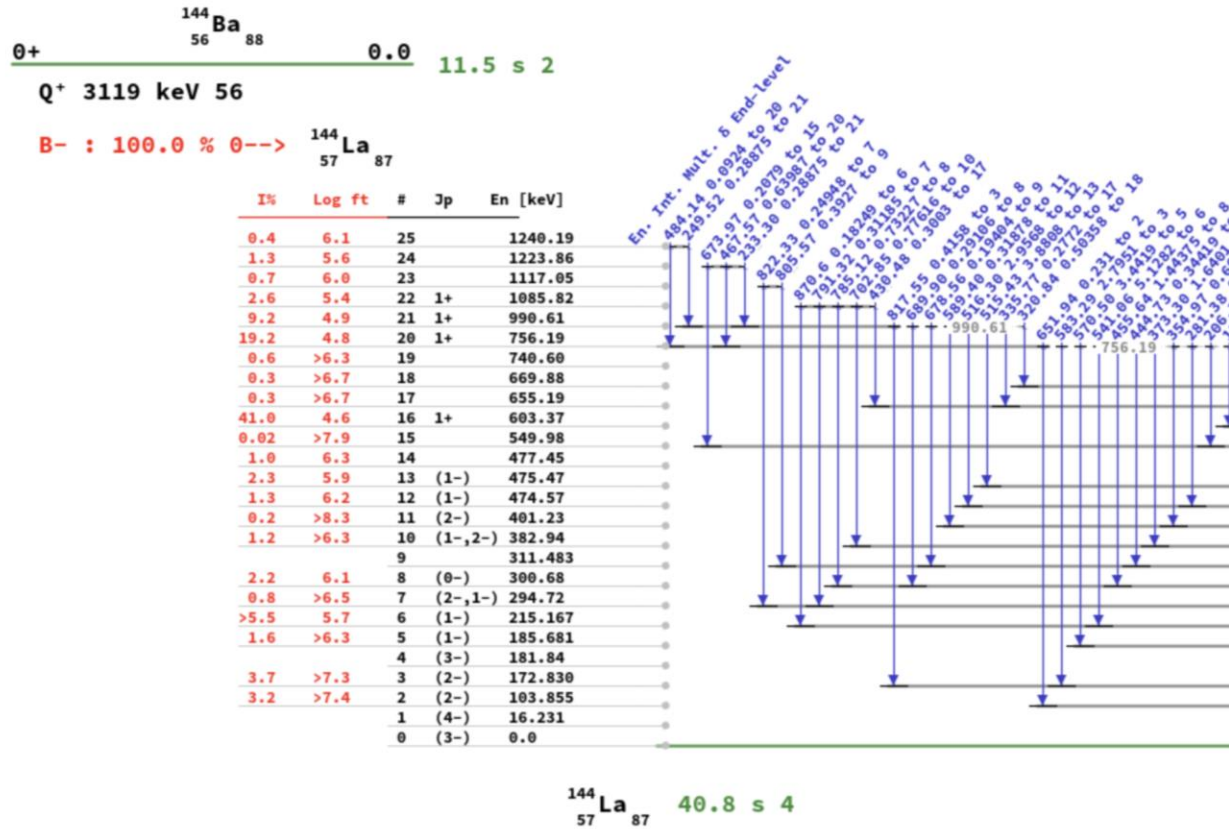
Warning: Q values are the ones at the time of the evaluation

Слайд 17 из 27 русский Специальные возможности: проверьте рекомендации

Заметки Примечания 101%

Пример варьирования вероятностей распада для ^{144}Ba

#	<E _β > [keV]	I _β -(abs) [%]	Daughter level [keV]	J ^π	E _β -, max [keV]	logft	Transition type	Comments
1	720.25	0.4	1240.19 10		(1879)	6.1		
2	727.25	1.3	1223.86 8		(1895)	5.6		
3	775.26	0.7	1117.05 9		(2002)	6.0		
4	789.26	2.6	1085.82 7	1+	(2033)	5.4	allowed	
5	832.26	9.2	990.61 5	1+	(2128)	4.9	allowed	
6	938.26	19.2	756.19 4	1+	(2363)	4.8	allowed	
7	945.26	< 0.6	740.60 6		(2378)	> 6.3		
8	977.26	< 0.3	669.88 5		(2449)	> 6.7		
9	984.26	< 0.3	655.19 5		(2464)	> 6.7		
10	1007.26	41.0	603.37 3	1+	(2516)	4.6	allowed	
11	1032.26	< 0.02	549.98 9		(2569)	> 7.9	1 st unique	
12	1065.26	1.0	477.45 6		(2642)	6.3		
13	1066.26	2.3	475.47 4	(1-)	(2644)	5.9	1 st non-unique	
14	1066.26	1.3	474.57 3	(1-)	(2644)	6.2	1 st non-unique	
15	1088.26	< 0.2	401.23 4	(2-)	(2718)	> 8.3	1 st unique	
16	1108.26	< 1.2	382.94 4	(1-,2-)	(2736)	> 6.3		
17	1146.26	2.2	300.68 4	(0-)	(2818)	6.1	1 st non-unique	
18	1149.26	< 0.8	294.72 4	(2-,1-)	(2824)	> 6.5		
19	1186.26	> 5.5	215.167 6	(1-)	(2904)	< 5.7	1 st non-unique	
20	1191.26	< 3.7	172.830 7	(2-)	(2946)	> 7.3	1 st unique	
21	1199.26	< 1.6	185.681 6	(1-)	(2933)	> 6.3	1 st non-unique	
22	1223.26	< 3.2	103.855 6	(2-)	(3015)	> 7.4	1 st unique	



ENDF Radioactive decay data /MF8.MT457/

by V.Zerkin, IAEA-NDS, 2020-2022, ver.2022-08-29

☒ Show all spectra. low-intensity lines ($\leq 1\%$).

data for plotting. data in %: ☒ using normalization: ☒

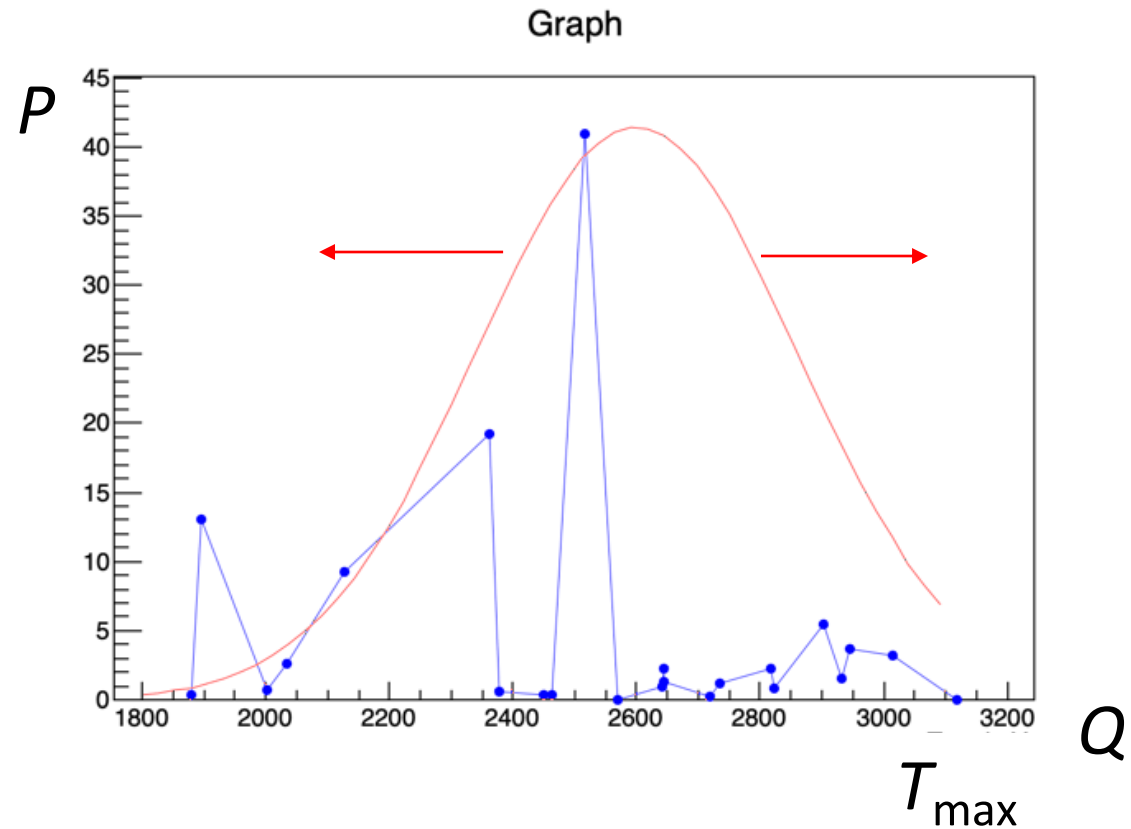
☒ #1.ENDF/B-VIII.0 ☒ #2.JEFF-3.3 ☒ #3.JENDL-5 ☒ #4.ENSDF-2024

#1. <input type="button" value="ENDF/B-VIII.0"/> <input type="button" value="Ba-144"/>	#2. <input type="button" value="JEFF-3.3"/> <input type="button" value="Ba-144"/>	#3. <input type="button" value="JENDL-5"/> <input type="button" value="Ba-144"/>	#4. <input type="button" value="ENSDF-2024"/> <input type="button" value="Ba-144"/>
Nucleus: Ba-144 ZA=56144 Library: ENDF/B-VIII.0, MAT=1855 AUTH: Conv. from CGM EDATE: EVAL-AUG11 Half life: $11.5 \pm 0.2(s)$ AWR: 142.6866 Isomer number: LISO=0 Level number: LIS=0 Spin & Parity: 0+ Ebeta: $902.2703 \pm 47.1652 (keV)$ Egamma: $785.05 \pm 33.37 (keV)$ Ealpha: $0 \pm 0 (keV)$ Decay modes: 1 Radiation types:2	Nucleus: Ba-144 ZA=56144 Library: JEFF-3.3, MAT=1864 AUTH: G.AUDI, O.BERSILLON, J.BLACHOT + EDATE: EVAL-DEC03 Half life: $11.5 \pm 0.2(s)$ AWR: 142.687 Isomer number: LISO=0 Level number: LIS=0 Spin & Parity: 0+ Ebeta: $929.8 \pm 9.298 (keV)$ Egamma: $784.7 \pm 7.847 (keV)$ Ealpha: $0 \pm 0 (keV)$ Decay modes: 1 Radiation types:0	Nucleus: Ba-144 ZA=56144 Library: JENDL-5, MAT=1971 AUTH: Conversion from ENSDF EDATE: EVAL-NOV21 Half life: $11.5 \pm 0.2(s)$ AWR: 142.6866 Isomer number: LISO=0 Level number: LIS=0 Spin & Parity: 0+ Ebeta: $929.8 \pm 34.4609 (keV)$ Egamma: $784.7 \pm 11.1107 (keV)$ Ealpha: $0 \pm 0 (keV)$ Decay modes: 1 Radiation types:2	Nucleus: Ba-144 ZA=56144 Library: ENSDF-2024 Half life: $11.5 \pm 0.2(s)$ Spin & Parity: 0+ Library ; ENSDF 202410 by livechart20241016 <input type="button" value="LARA"/> Nuclide ; Ba-144 Element ; Barium Z ; 56 Daughter(s) ; (B-) ; La-144 ; 100 Q- ; 3083 Possible parent(s) ; Jp ; 0+ Half-life (s) ; 11.5 ; 0.2 Half-life (s) ; 1.15E1 ; 2E-1 Decay constant (1/s) ; 6.03E-2 ; 1E-3 Specific activity (Bq/g) ; 2.523E20 ; 4.184E18 Reference ; ENSDF 200108 / Author(s) A.A. Sonzogni Emissions (128 lines) sorted by increasing energy Decay modes: 1 Radiation types: 2
#M1. Decay mode: RTYP=1 β^- Decay Q= $3066.408 \pm 19.357 keV$	#M1. Decay mode: RTYP=1 β^- Decay Q= $3121 \pm 0 keV$	#M1. Decay mode: RTYP=1 β^- Decay Q= $3119 \pm 56 keV$	#M1. Decay mode: RTYP=1 β^- Decay Q= $3083 keV$
#R1. Radiation type: STYP=0 γ AveDecayEne= $586.72 \pm 0 keV$ <input checked="" type="checkbox"/> ContinuousSpectrum:307 <input type="checkbox"/> plot	-no-	#R1. Radiation type: STYP=0 γ AveDecayEne= $784.7 \pm 11.111 keV$ <input checked="" type="checkbox"/> DiscreteSpectrum: 88 lines <input type="checkbox"/> plot <input checked="" type="checkbox"/> ContinuousSpectrum:428 <input type="checkbox"/> plot	#R1. Radiation type: STYP=0 γ AveDecayEne: ? <input checked="" type="checkbox"/> DiscreteSpectrum: 100 lines <input type="checkbox"/> plot
#R2. Radiation type: STYP=1 β^- AveDecayEne= $993.65 \pm 0 keV$ <input checked="" type="checkbox"/> ContinuousSpectrum:307 <input type="checkbox"/> plot	-no-	#R2. Radiation type: STYP=1 β^- AveDecayEne= $929.8 \pm 1.4837 keV$ <input checked="" type="checkbox"/> DiscreteSpectrum: 22 end-points <input type="checkbox"/> plot <input checked="" type="checkbox"/> ContinuousSpectrum:349 <input type="checkbox"/> plot	-no-
-no-	-no-	-no-	#R2. Radiation type: STYP=9 X-rays AveDecayEne: ? <input checked="" type="checkbox"/> DiscreteSpectrum: 6 lines <input type="checkbox"/> plot

Legend

left value	right value	ratio of values	display
Value1	Value2	Value1==Value2	Value2

We change Q the array of T_{\max} for beta-decays



Методика расчета спектра антинейтрино с варьированием спектров неизвестных осколков

$$\chi_k^2 = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{26} \frac{(y_{exp,j} - y_{calc,j})^2}{\sigma_j^2}$$

$$|\chi_k^2 - \chi_{k-1}^2| < \varepsilon$$

i – runs through antineutrino spectra (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu),

j – runs through experimental spectrum bins

k – runs through A charge chains

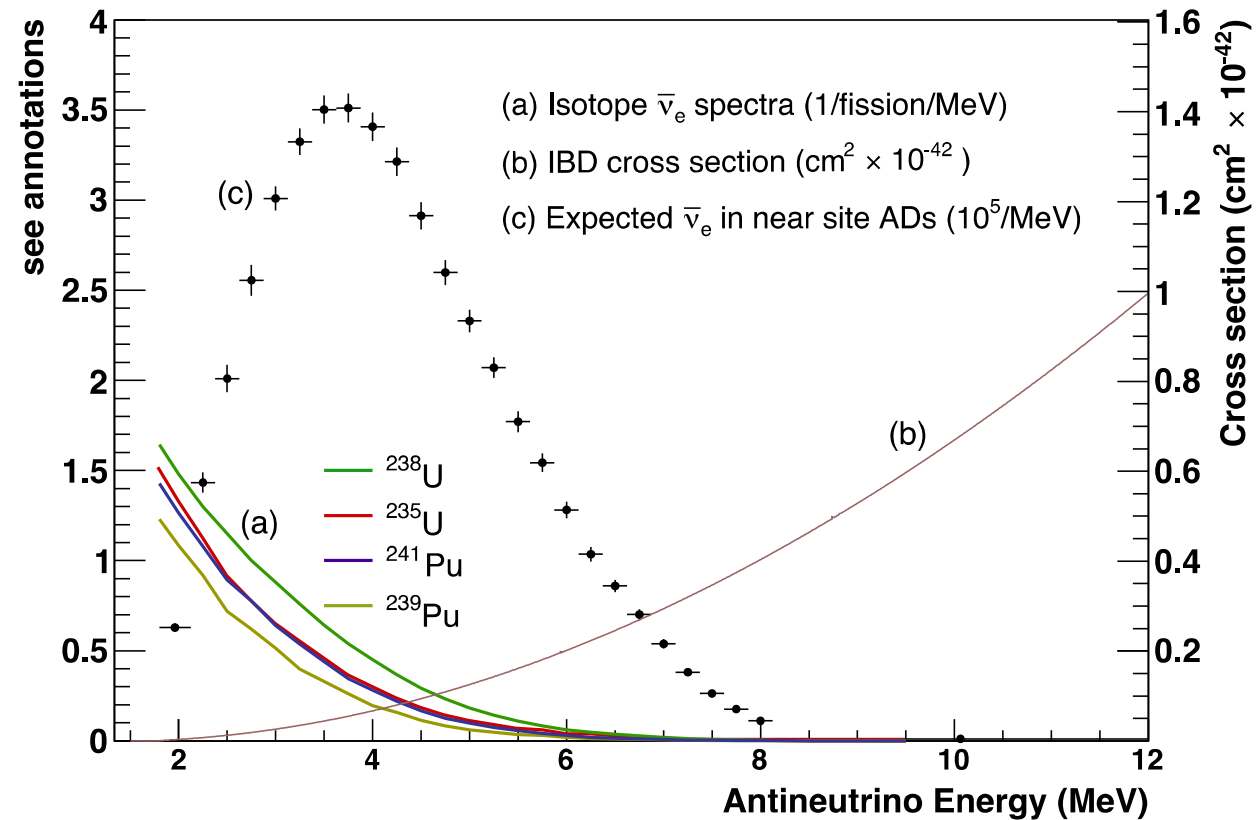
Функционал для минимизирования

$$\begin{aligned}\chi_k^2 = & \sum_{i \text{ DC}} \frac{(y_{exp,i} - y_{calc,i})^2}{\sigma_i^2} + \sum_{j \text{ DB}} \frac{(y_{exp,j} - y_{calc,j})^2}{\sigma_j^2} + \sum_{l \text{ RENO}} \frac{(y_{exp,l} - y_{calc,l})^2}{\sigma_l^2} + \\ & + \sum_{j \text{ Rovno}} \frac{(y_{exp,m} - y_{calc,m})^2}{\sigma_m^2} + \frac{(\sigma_{DC} - \sigma_{calc DC})^2}{\Delta\sigma_{DC}^2} + \frac{(\sigma_{DB} - \sigma_{calc DB})^2}{\Delta\sigma_{DB}^2} + \frac{(\sigma_{RENO} - \sigma_{calc RENO})^2}{\Delta\sigma_{RENO}^2} \\ & + \frac{(\sigma_{Bugey} - \sigma_{calc Bugey})^2}{\Delta\sigma_{Bugey}^2}\end{aligned}$$

$$|\chi_k^2 - \chi_{k-1}^2| < \varepsilon$$

В результате удалось согласовать экспериментальный и расчетный спектры антинейтрино. Новые спектры антинейтрино (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) хорошо описывают измеренные с наилучшей точностью сечения реакции обратного бета-распада из высокостатистичных экспериментов Double Chooz, RENO и Daya Bay, а также долгое время бывшее самым точным сечение из эксперимента Bugey-3.

Что такое экспериментальное сечение ОБР?



$$\sigma_f = \int \frac{dn}{dE}(E) \sigma(E) dE$$

Cross sections

	²³⁵ U	²³⁸ U	²³⁹ Pu	²⁴¹ Pu	DC
This work	5.794	10.64	4.139	6.262	5.820
ILL	6.426	8.929	4.204	5.796	5.866
Vogel	6.502	9.109	4.526	6.515	6.072
MEPhI	6.395	9.213	4.388	6.478	5.977
Huber & Mueller	6.681	10.12	4.387	6.081	6.180
Kopeikin et al.	6.308	9.395	4.33*	6.01*	5.900

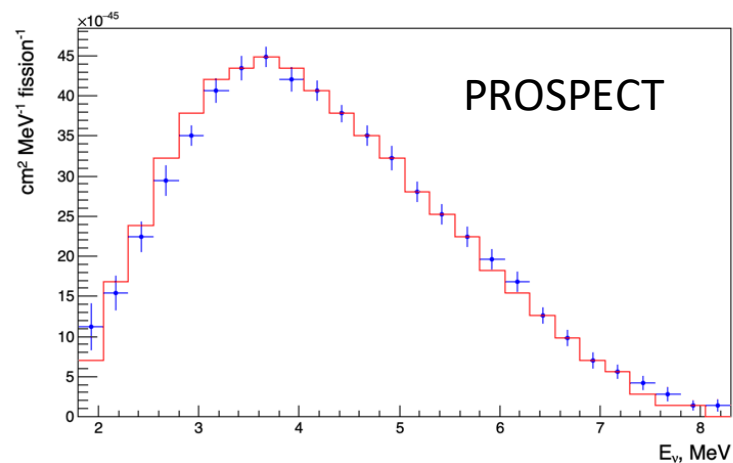
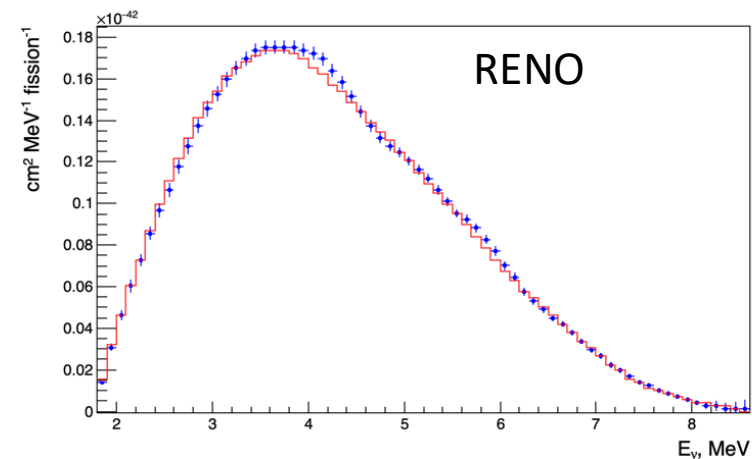
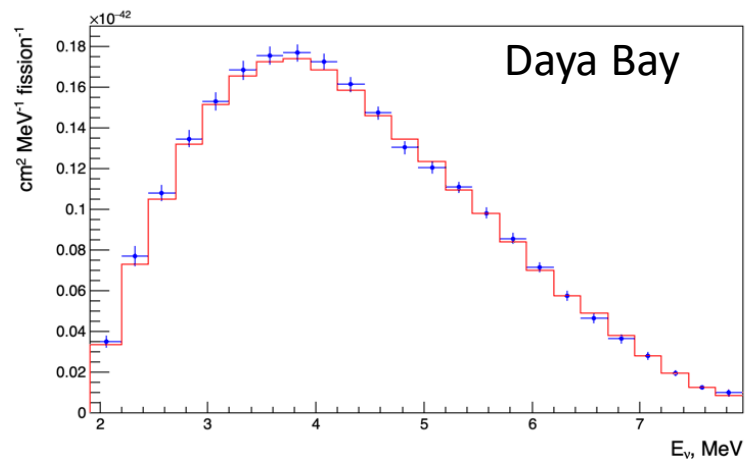
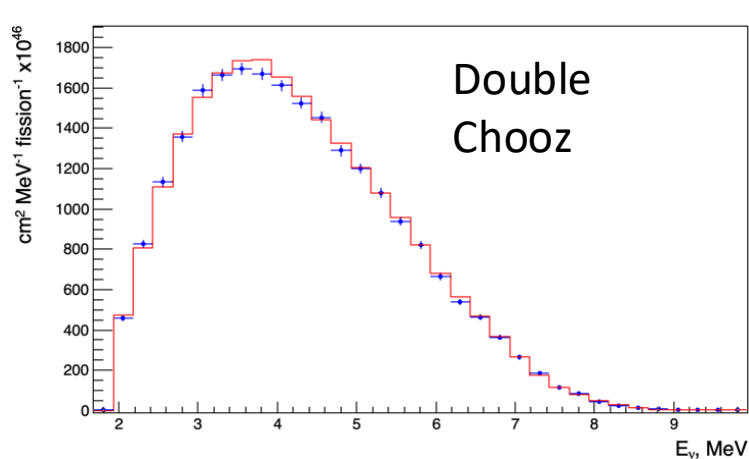
Experimental Double Chooz $\sigma_f = (5.71 \pm 0.06) \cdot 10^{-43} \text{ cm}^2/\text{fission}$

Интеграл от порога ОБР до 9 МэВ

Comparison of experimental and calculated cross sections through our ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu individual spectra

experiment	Core content				$^i\sigma_f \times 10^{43}$	$^{INR}\sigma_f \times 10^{43}$	R_{INR}	H-M	R_{H_M}
	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu	^{241}Pu	[cm ² /fission]	[cm ² /fission]			
Double Chooz	0.520	0.087	0.333	0.060	5.71 ± 0.06	5.82	0.988	6.180	0.924
Bugey-4	0.538	0.078	0.328	0.056	5.752 ± 0.081	5.782	0.995	6.163	0.933
Daya Bay	0.561	0.076	0.307	0.056	5.84 ± 0.07	5.804	1.006	6.204	0.927
RENO	0.571	0.073	0.300	0.056	5.852 ± 0.094	5.801	1.009	6.210	0.926

Измеренные спектры антинейтрино и расчетные



Заключение

Разработан новый метод расчета спектров антинейтрино делящихся изотопов ядерного топлива энергетических реакторов. Метод основан на многократном расчете спектров антинейтрино суммированием индивидуальных спектров отдельных ядер-осколков деления. Строится ряд расчетных спектров, сходящихся к экспериментально измеренному. Метод является рекуррентным, расчет повторяется до совпадения с экспериментом.

В ряде работ был измерен спектр антинейтрино, соответствующий стандартному составу ядерного топлива. Предложенный метод был применен для описания этих спектров. В результате была получена новая база данных по схемам распада неизвестных ядер. Метод дает возможность одновременного определения спектров антинейтрино от наборов осколков отдельных делящихся изотопов и получения знаний о схемах распада неизвестных ядер, далеких от линии бета-стабильности.

Определение точных спектров антинейтрино отдельных делящихся изотопов (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) открывает возможности для измерения состава активной зоны ядерного реактора прямо во время его работы.

Спасибо за внимание!