

# 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 нейtronами), находящимися в активной зоне ядерного реактора

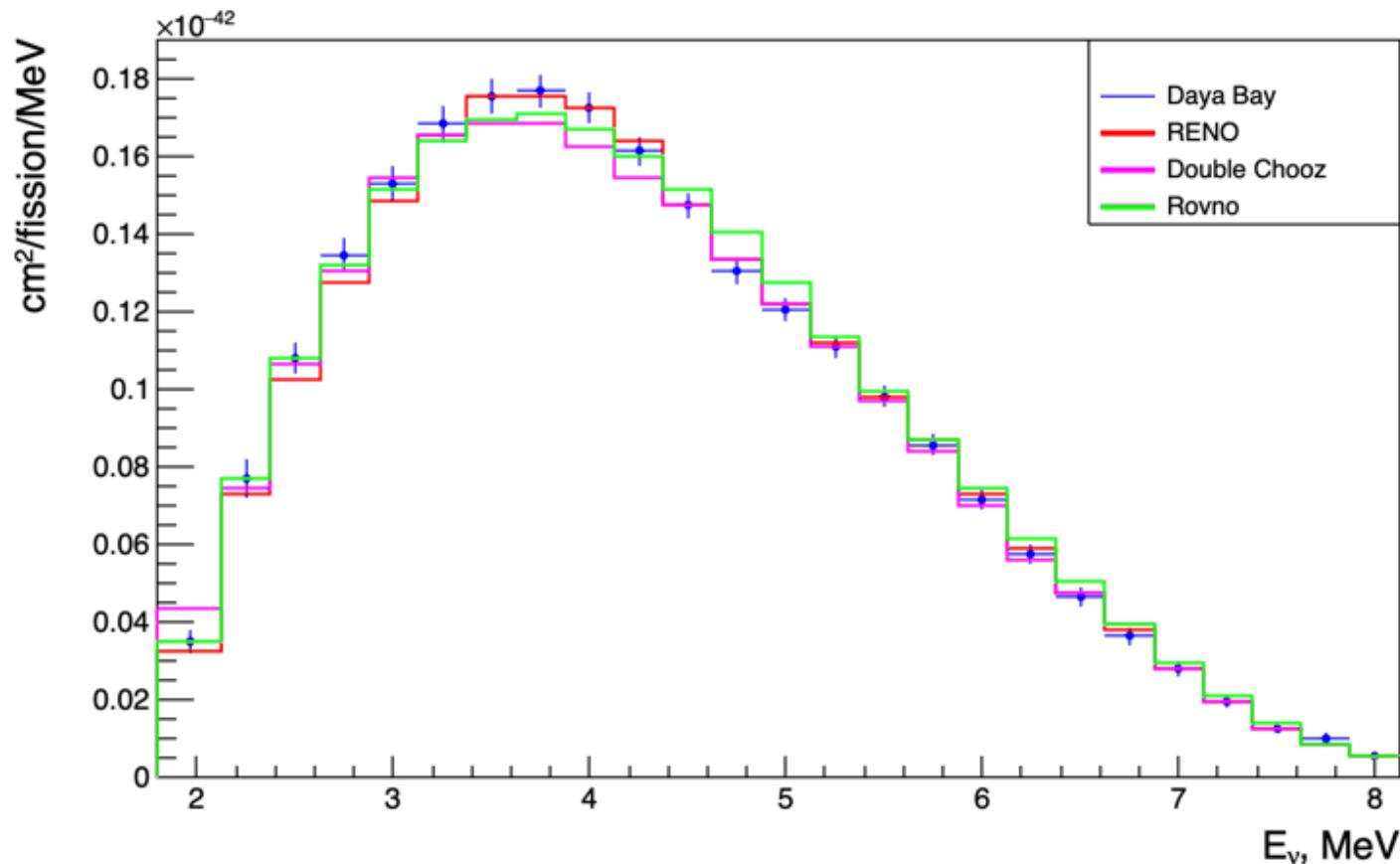
**Спектр антинейтрино делящегося изотопа ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ )** – сумма спектров антинейтрино, испускаемых осколками деления только от **данного изотопа**

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

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

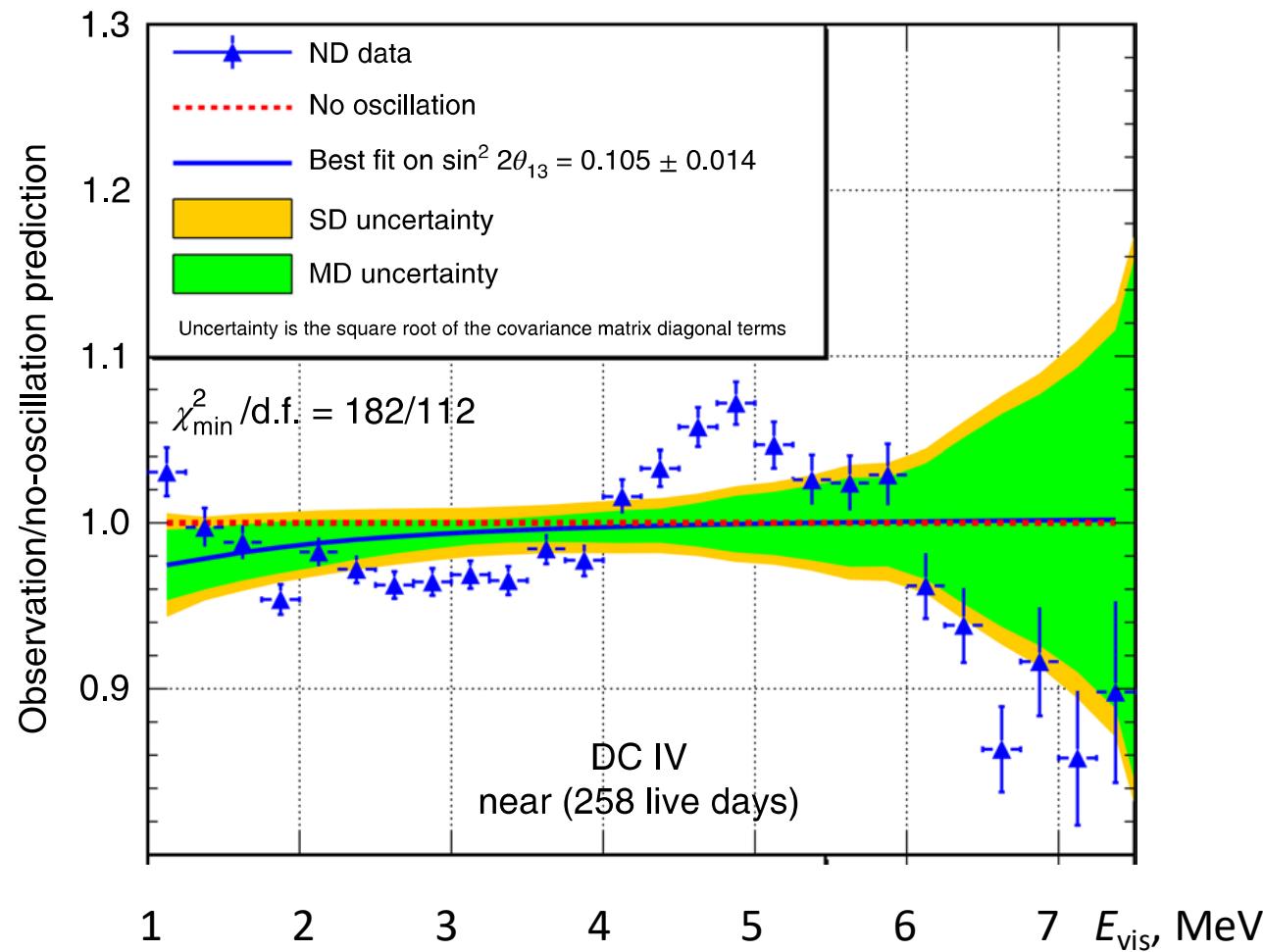
Предложен метод расчета спектров антинейтрино, основанный на вариации схем бета-распада неизвестных и оцененных ядер. Этот метод позволяет находить схемы распада ядер, которые невозможно получить другим путем из-за очень коротких времен периодов полураспада.

# 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

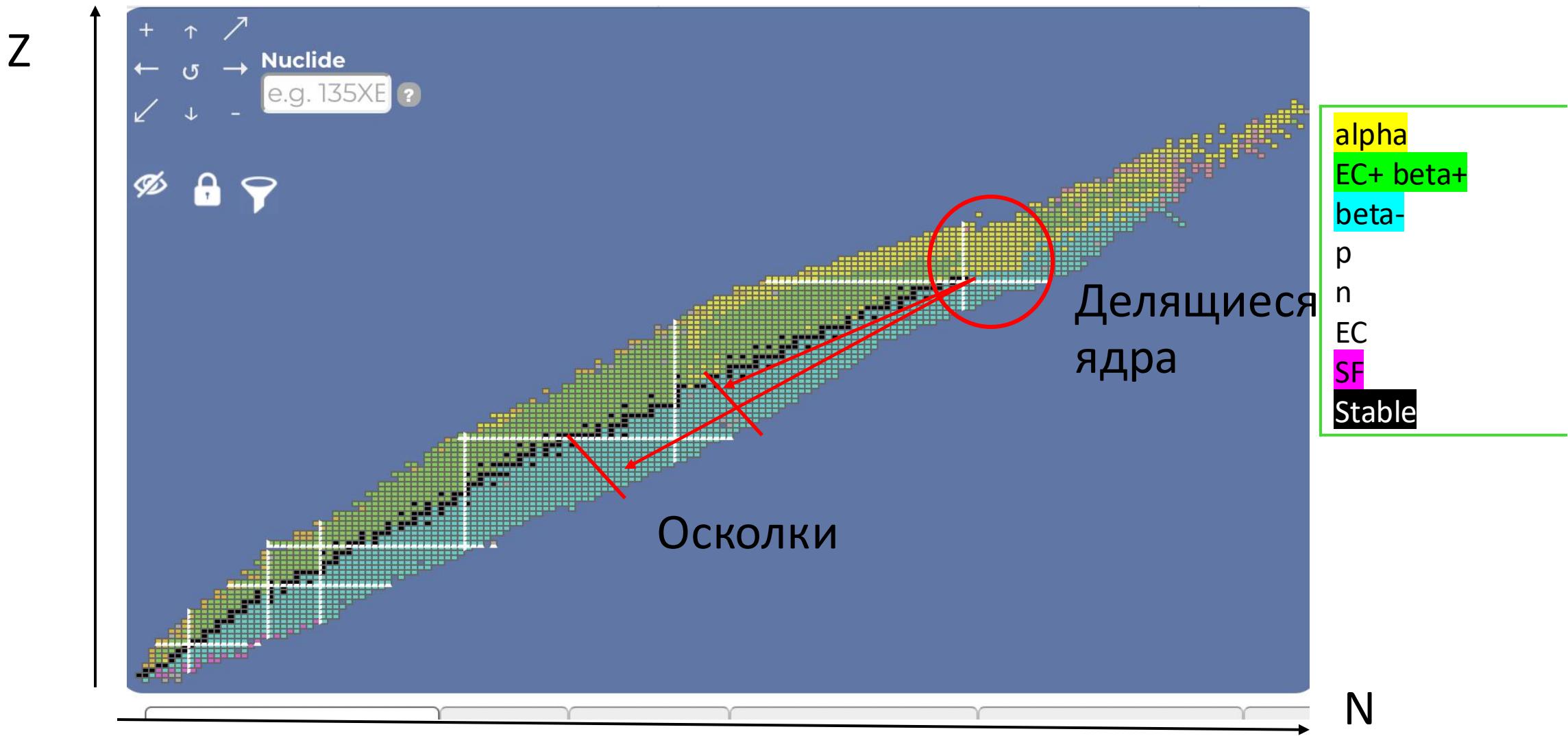


Расчет опирается на базы данных осколков деления, содержащие данные по вероятностям их бета-распада.

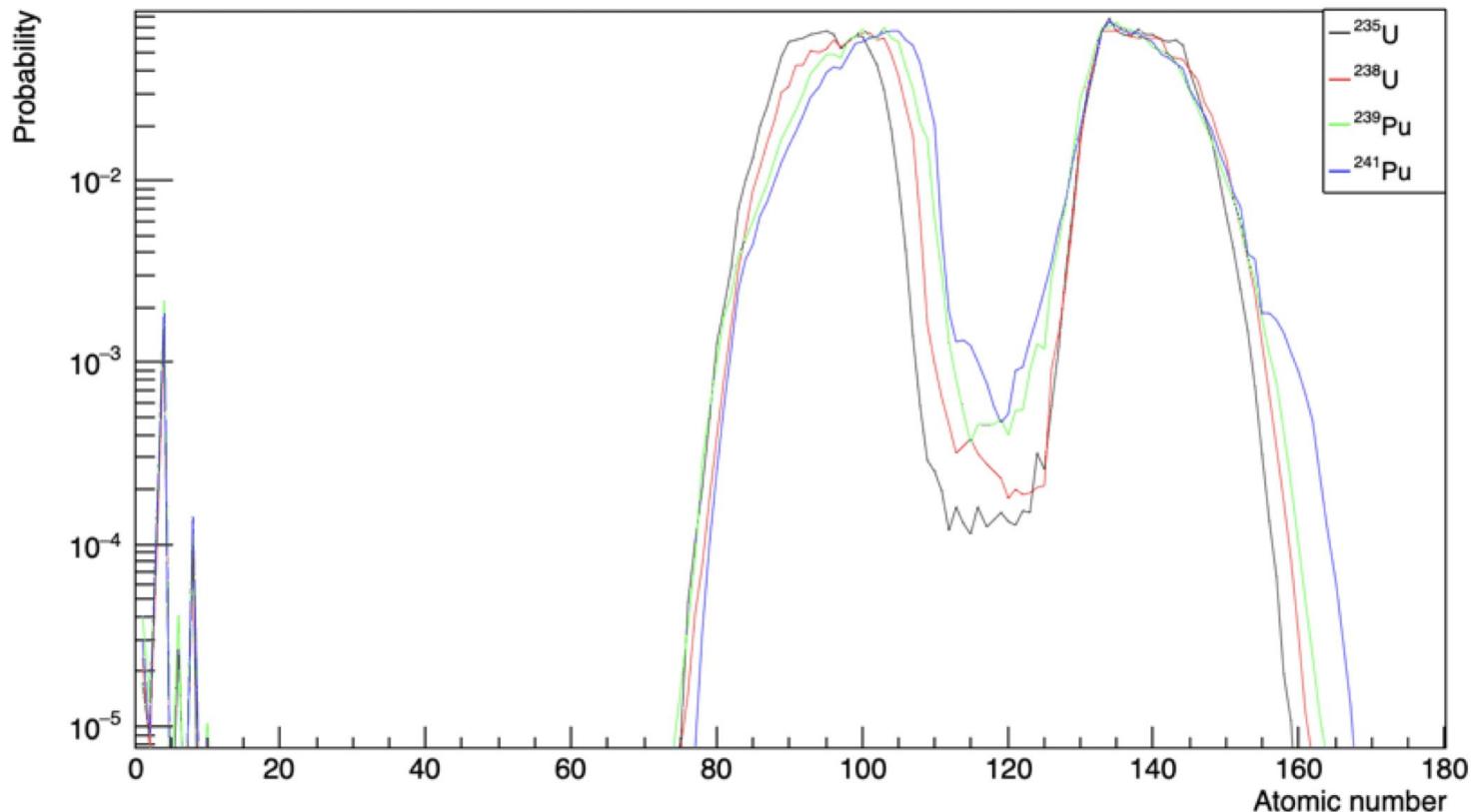
Расчет опирается на базы данных осколков деления, содержащие данные по вероятностям их бета-распада.

Насколько точны эти данные?

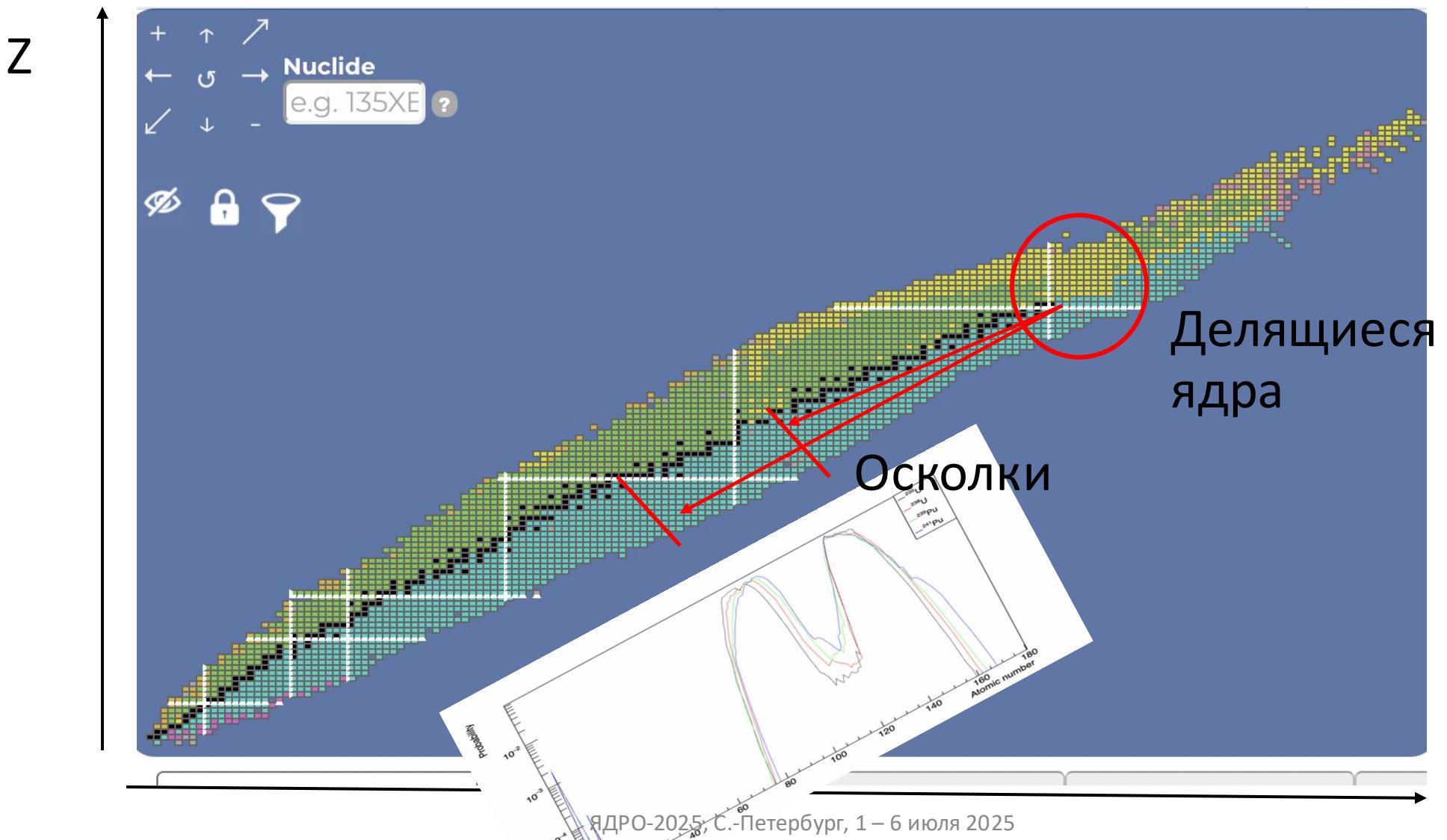
# Деление тяжелых ядер происходит на два осколка неравной массы



## Массовое распределение осколков деления



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



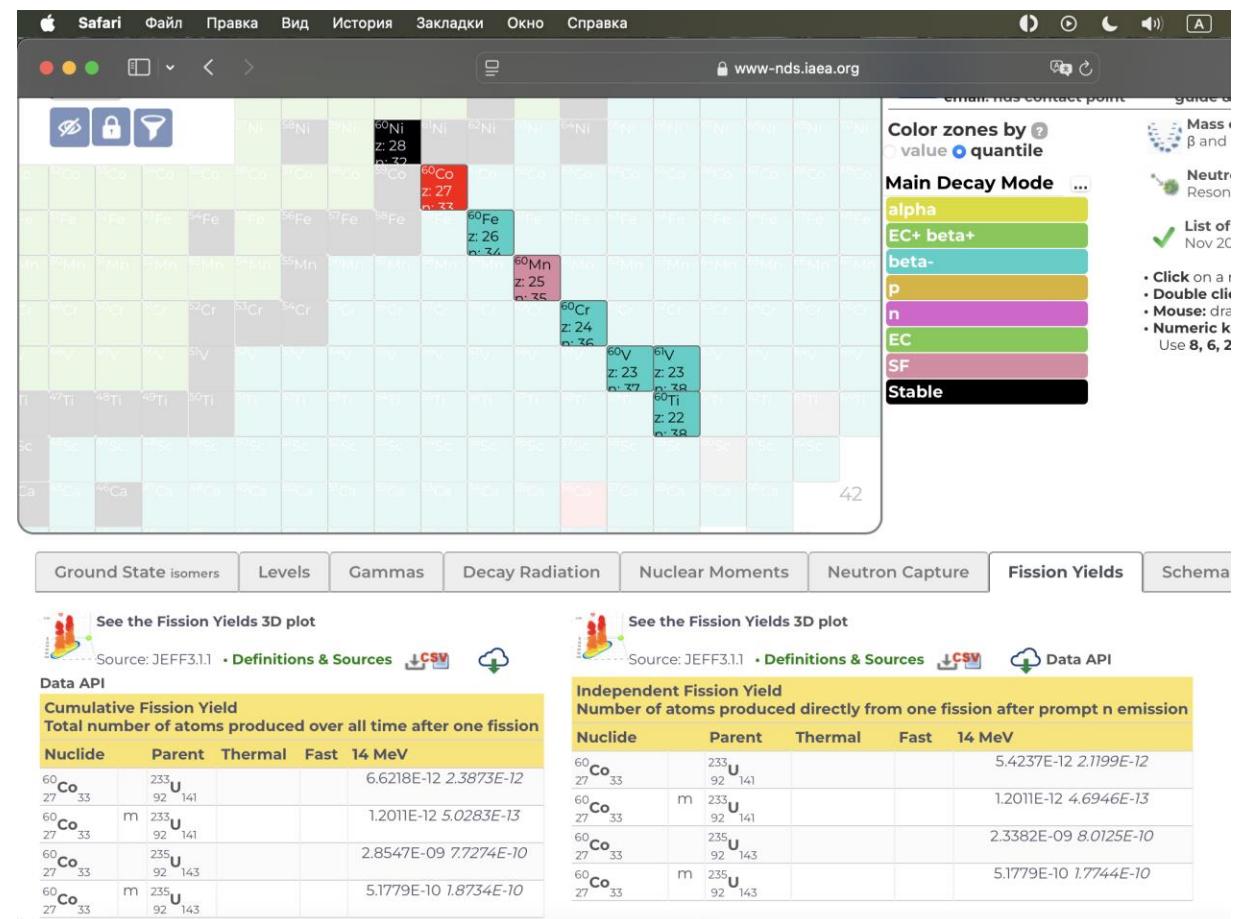
Анализ показал, что в базах данных только треть всех осколков имеет полностью известные схемы распада. Одна треть является полностью неизвестной, и еще одна треть имеет схемы распада, основанные на расчете по известным моделям ядра.

```

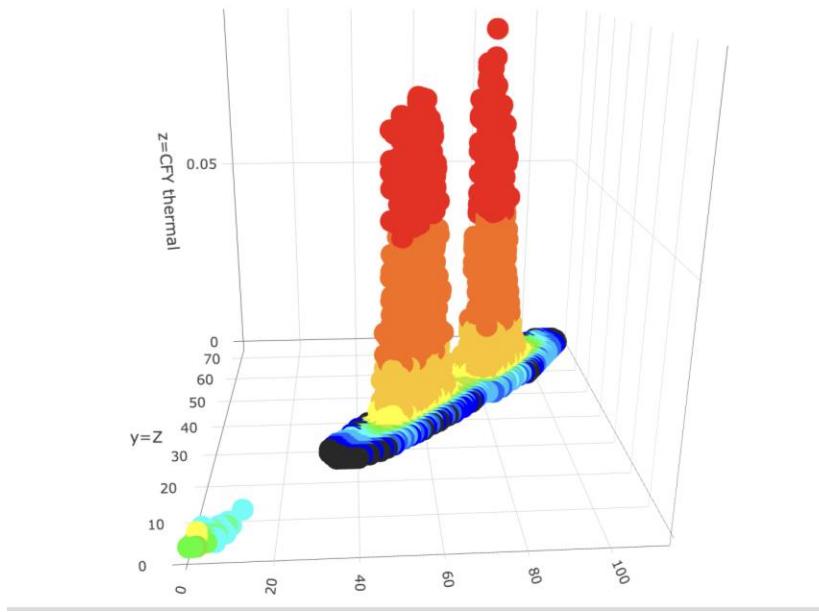
Cr 60 24 0.49 s 0 0 2.6138e-12 1.0211e-11 3 1 2
5701 0.102
6059 0.886
6111 0.012
Mn 60 25 1.77 s 0 0 2.7318e-12 5.2985e-12 8 0.885 1
5217 0.00503
5229 0.0302
5362 0.00591
5522 0.02391
5643 0.03523
5923 0.81792
6416 0.05537
6601 0.02643
Mn 60 25 0.28 s 0 0 3.0759e-13 5.9658e-13 4 1 1
6088 0.02994
6470 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 0 1

```

## The example of charge chain with mass A = 60



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

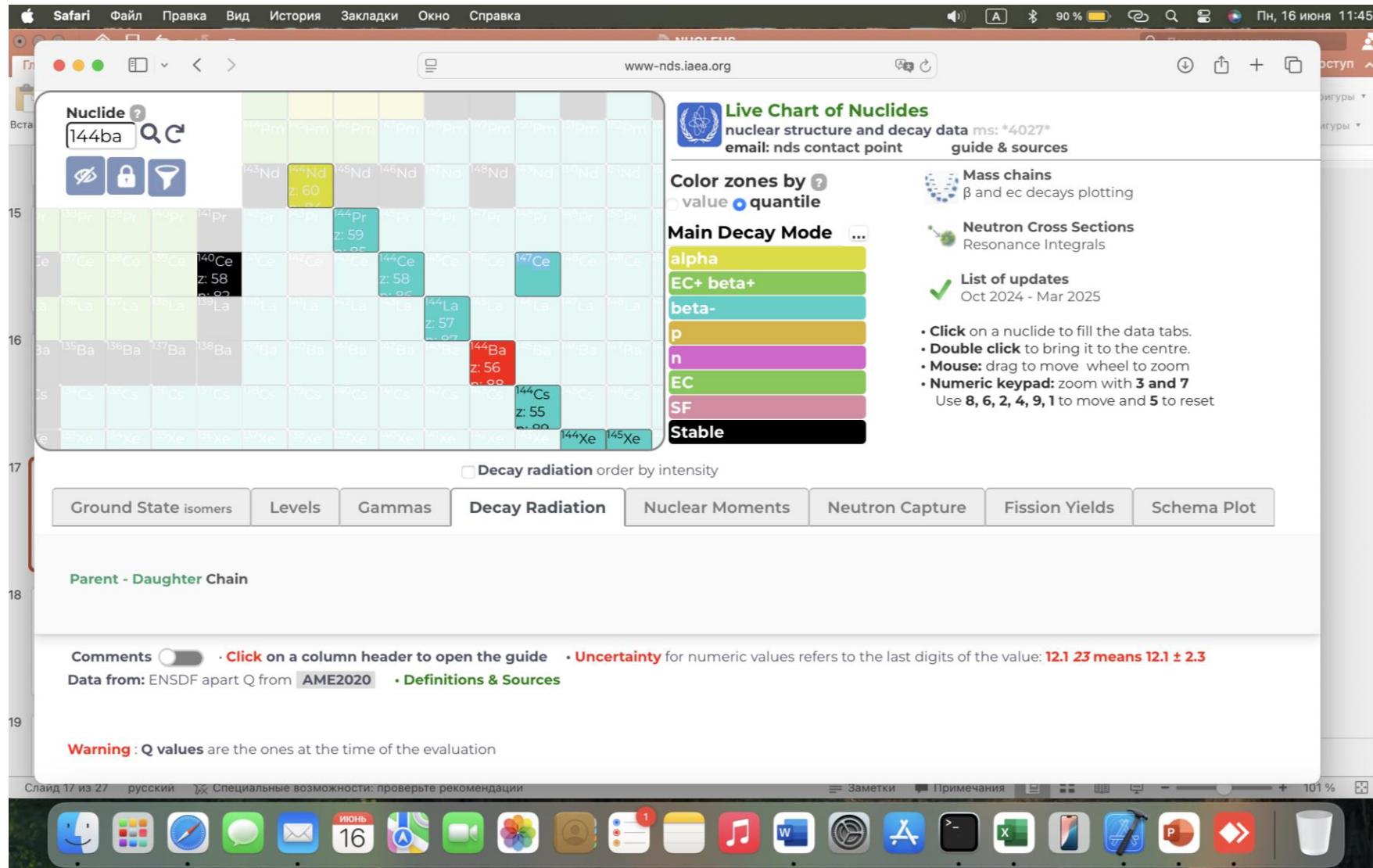


Трехмерная картинка кумулятивных  
выходов ядер – осколков при делении  
тяжелых ядер, содержащиеся в базе Live  
Chart of Nuclides.

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

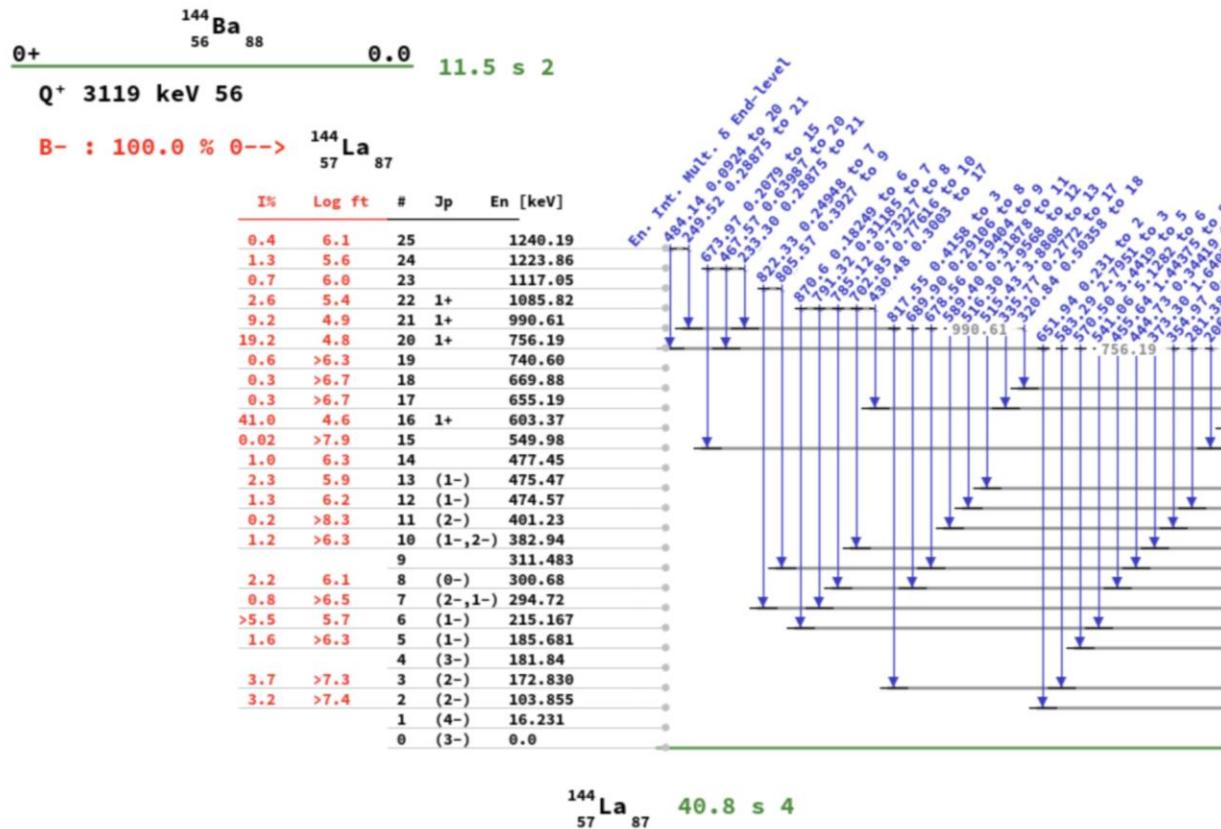
Варьируются вероятности у осколков с неизвестными схемами распада.

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



# Пример варьирования вероятностей распада для $^{144}\text{Ba}$

#	$\langle E_{\beta^-} \rangle$ [keV]	$I_{\beta^-}(\text{abs})$ [%]	Daughter level [keV]	$J^\pi$	$E_{\beta^-, \text{max}}$ [keV]	$\log ft$	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	<b>41.0</b>	603.37 3	1+	(2516)	4.6	allowed	
11	1032.26	< 0.02	549.98 9		(2569)	> 7.9	1 <sup>st</sup> 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 <sup>st</sup> non-unique	
14	1066.26	1.3	474.57 3	(1-)	(2644)	6.2	1 <sup>st</sup> non-unique	
15	1088.26	< 0.2	401.23 4	(2-)	(2718)	> 8.3	1 <sup>st</sup> 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 <sup>st</sup> 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 <sup>st</sup> non-unique	
20	1191.26	< 3.7	172.830 7	(2-)	(2946)	> 7.3	1 <sup>st</sup> unique	
21	1199.26	< 1.6	185.681 6	(1-)	(2933)	> 6.3	1 <sup>st</sup> non-unique	
22	1223.26	< 3.2	103.855 6	(2-)	(3015)	> 7.4	1 <sup>st</sup> unique	



## ENDF Radioactive decay data /MF8.MT457/

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

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

Select /  unselect data for plotting.  Plot data in %:  using normalization:

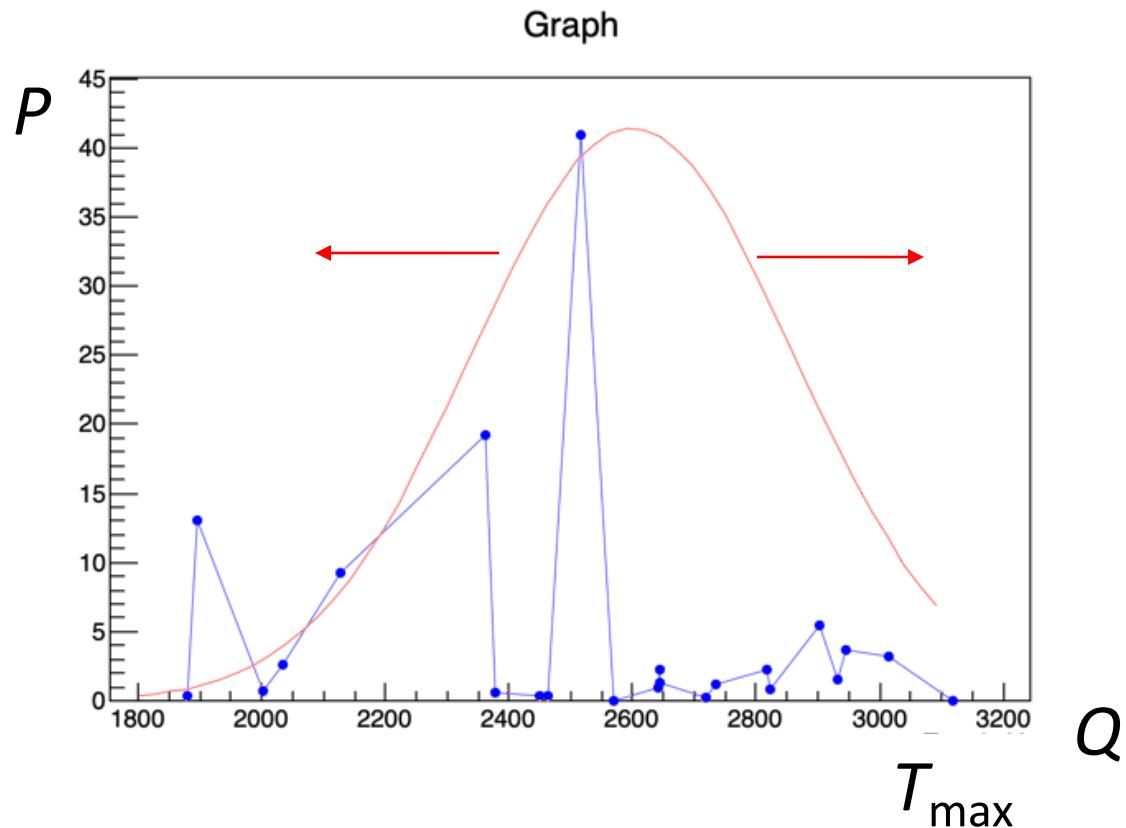
#1. ENDF/B-VIII.0  #2. JEFF-3.3  #3. JENDL-5  #4. ENSDF-2024

#1. ENDF/B-VIII.0	Ba-144	#2. JEFF-3.3	Ba-144	#3. JENDL-5	Ba-144	#4. ENSDF-2024	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: LIS=0 Level number: LIS=0 Spin & Parity: 0+ Ebata: $902.2703 \pm 47.1652$ (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) <input checked="" type="checkbox"/> AWR: 142.687 Isomer number: LIS=0 Level number: LIS=0 Spin & Parity: 0+ <input checked="" type="checkbox"/> Ebata: $929.8 \pm 9.298$ (keV) <input checked="" type="checkbox"/> 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) <input checked="" type="checkbox"/> AWR: 142.6866 Isomer number: LIS=0 Level number: LIS=0 Spin & Parity: 0+ Ebata: $929.8 \pm 34.4609$ (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 [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 $\beta^-$ Decay Q=3066.408 $\pm 19.357$ keV	#M1. Decay mode: RTYP=1 $\beta^-$ <input checked="" type="checkbox"/> Decay Q=3121 $\pm 0$ keV	#M1. Decay mode: RTYP=1 $\beta^-$ <input checked="" type="checkbox"/> Decay Q=3119 $\pm 56$ keV	#M1. Decay mode: RTYP=1 $\beta^-$ <input checked="" type="checkbox"/> Decay Q=3083 keV				
#R1. Radiation type: STYP=0 $\gamma$ AveDecayEne=586.72 $\pm 0$ keV <input checked="" type="checkbox"/> ContinuousSpectrum:307 <input type="checkbox"/> plot	-no-	#R1. Radiation type: STYP=0 $\gamma$ 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 $\gamma$ AveDecayEne: ? <input checked="" type="checkbox"/> DiscreteSpectrum: <input checked="" type="checkbox"/> 100 lines <input type="checkbox"/> plot				
#R2. Radiation type: STYP=1 $\beta^-$ AveDecayEne=993.65 $\pm 0$ keV <input checked="" type="checkbox"/> ContinuousSpectrum:307 <input type="checkbox"/> plot	-no-	#R2. Radiation type: STYP=1 $\beta^-$ 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 ( ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}^{241}\text{Pu}$ ),

$j$  – runs through experimental spectrum bins

$k$  – runs through A charge chains

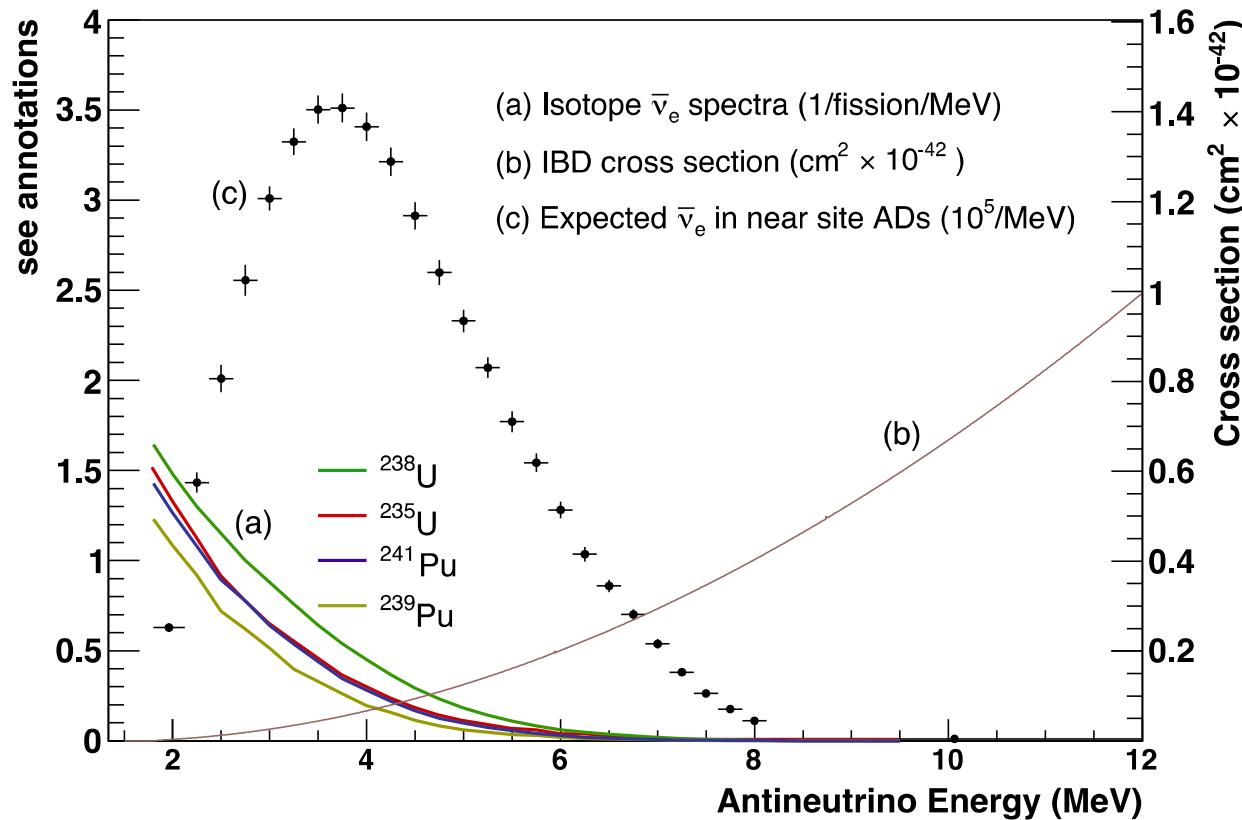
## Функционал для минимизирования

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

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

В результате удалось согласовать экспериментальный и расчетный спектры антинейтрино. Новые спектры антинейтрино ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) хорошо описывают измеренные с наилучшей точностью сечения реакции обратного бета-распада из высокостатистических 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

	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$	DC
<b>This work</b>	<b>5.794</b>	<b>10.64</b>	<b>4.139</b>	<b>6.262</b>	<b>5.820</b>
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

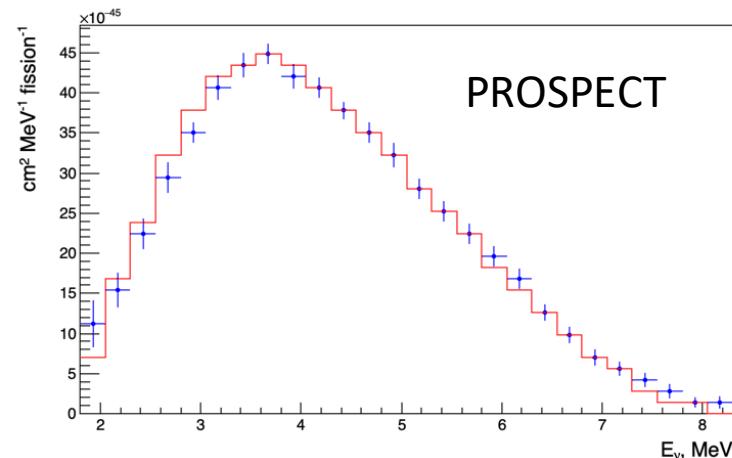
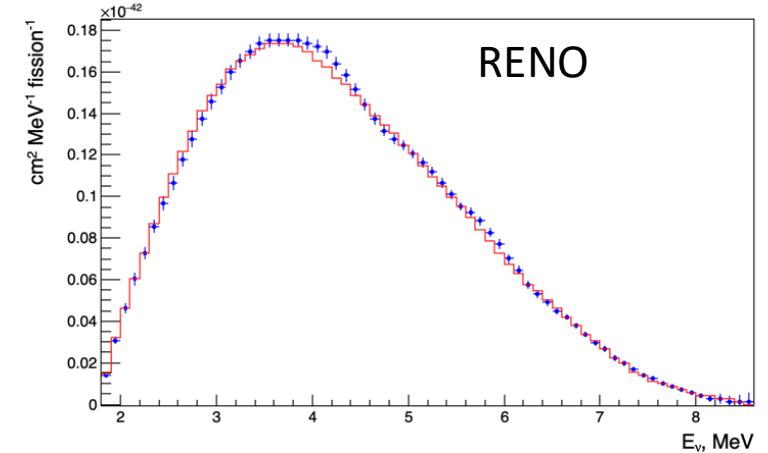
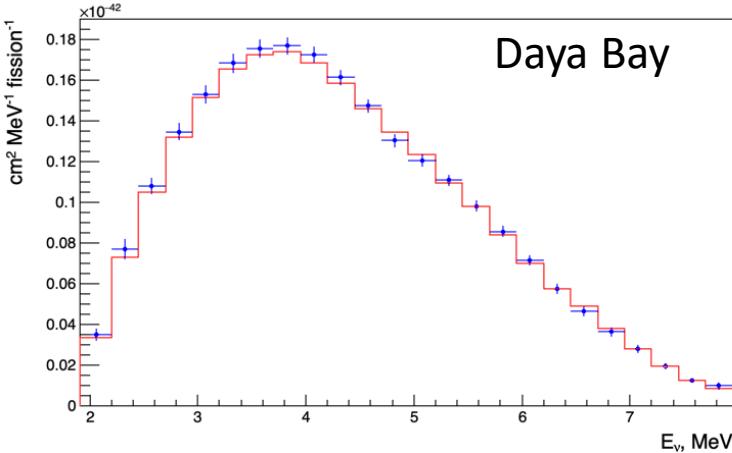
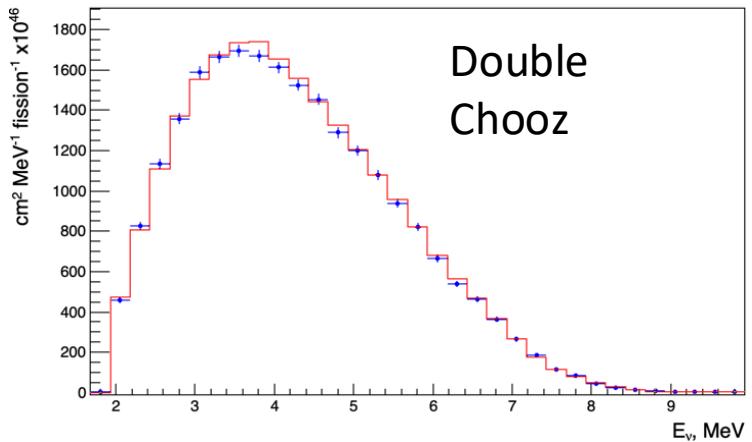
Experimental Double Chooz  $\sigma_f = (5.71 \pm 0.06) \cdot 10^{-43} \text{ cm}^2/\text{fission}$

Интеграл от порога ОБР до 9 МэВ

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

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

# 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 ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) открывает возможности для измерения состава активной зоны ядерного реактора прямо во время его работы.

# Спасибо за внимание!