

Расчетные спектры антинейтрино изотопов  
ядерного топлива, согласованные с  
экспериментальными

Calculated antineutrino spectra from nuclear fuel  
isotopes conformed with experimentally measured  
ones

В.В. Синев, С.В. Ингерман

V.V. Sinev and S.V. Ingerman

Секции ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук "Физика  
фундаментальных взаимодействий", посвященной 70-летию со дня рождения  
Валерия Анатольевича Рубакова

Определения:

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

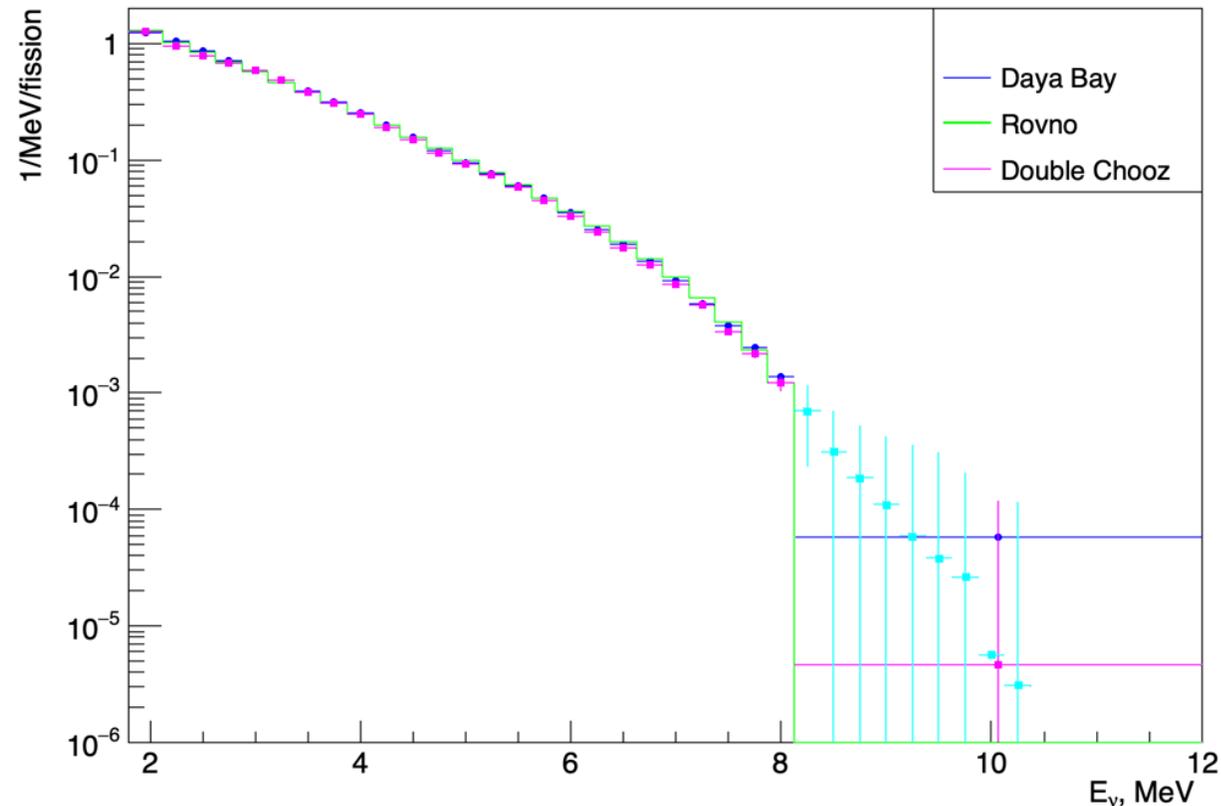
**Спектр антинейтрино делящегося изотопа** ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) – сумма спектров антинейтрино, испускаемых осколками деления только от **данного изотопа**

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

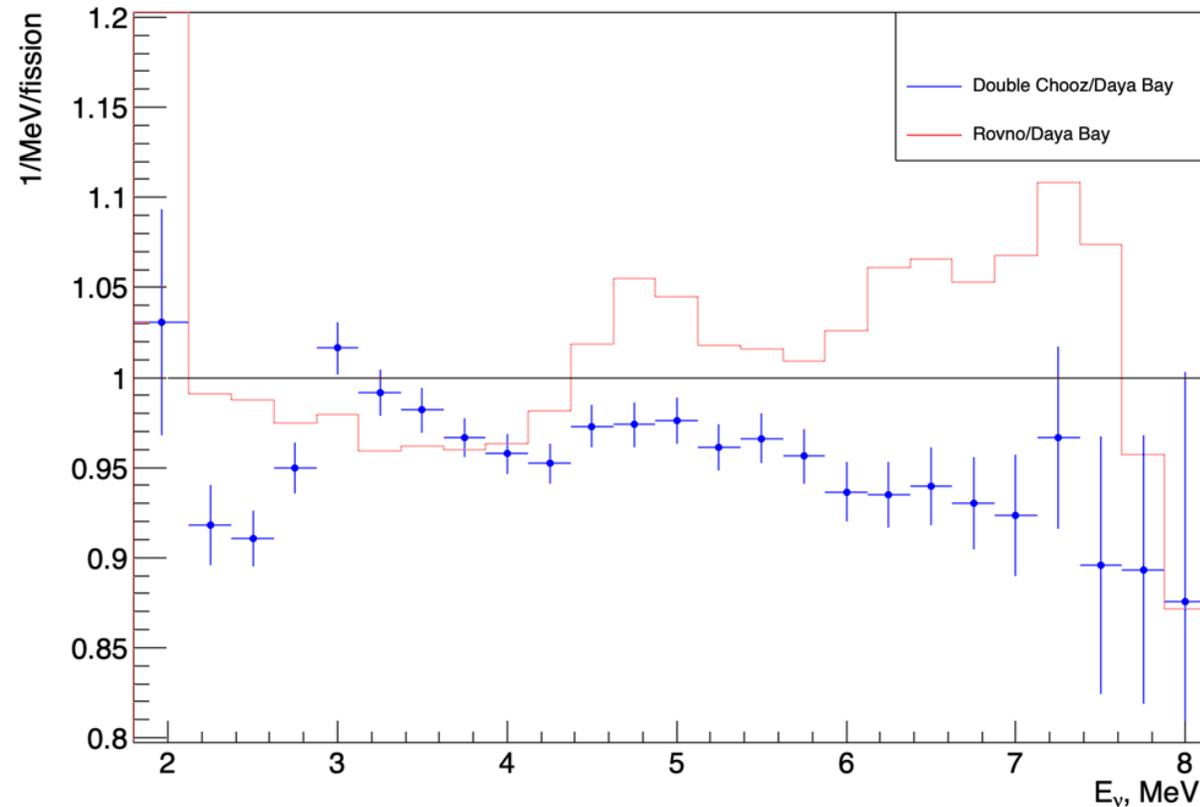
**Кумулятивный выход** – сумма прямого выхода и выходов предыдущих распадчиков, образующих цепочку бета-распадов

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.

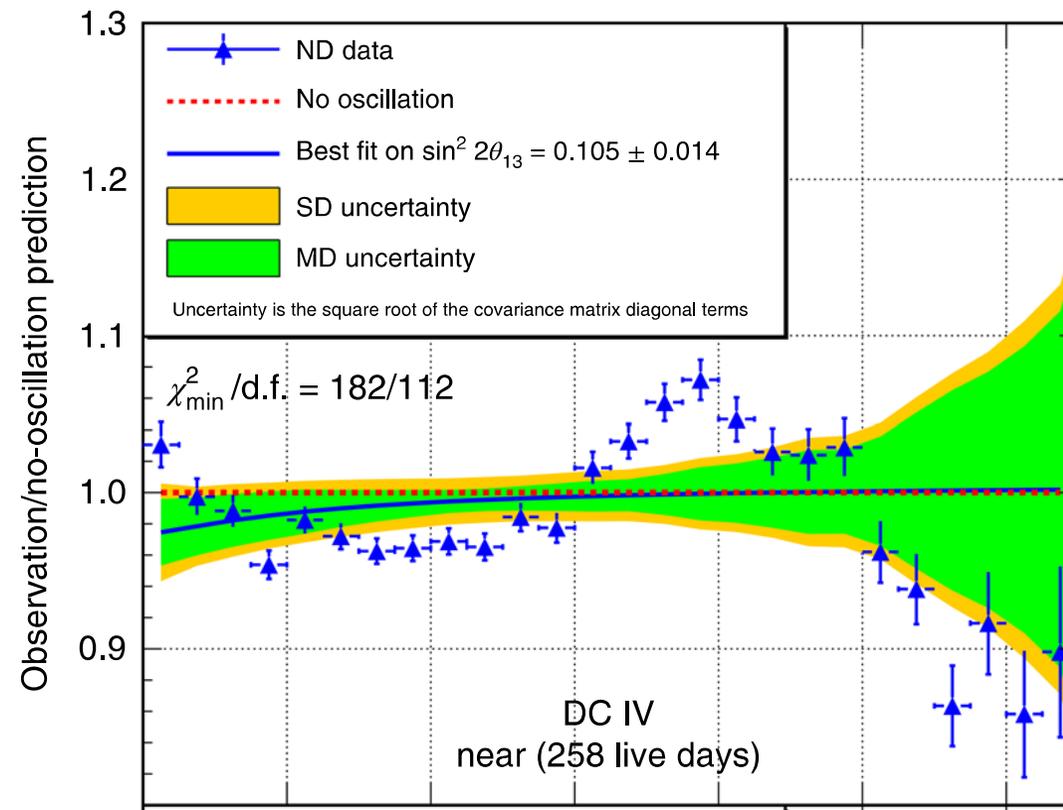
Получены из измерений уже три спектра антинейтрино ядерного реактора (Ровно, Double Chooz и Daya Bay). Они хорошо согласуются между собой.



# Отношения спектров антинейтрино ядерного реактора (Ровно, Double Chooz и Daya Bay).



Метод расчета, основанный на суммировании индивидуальных спектров осколков деления не может описать полученные экспериментально спектры.



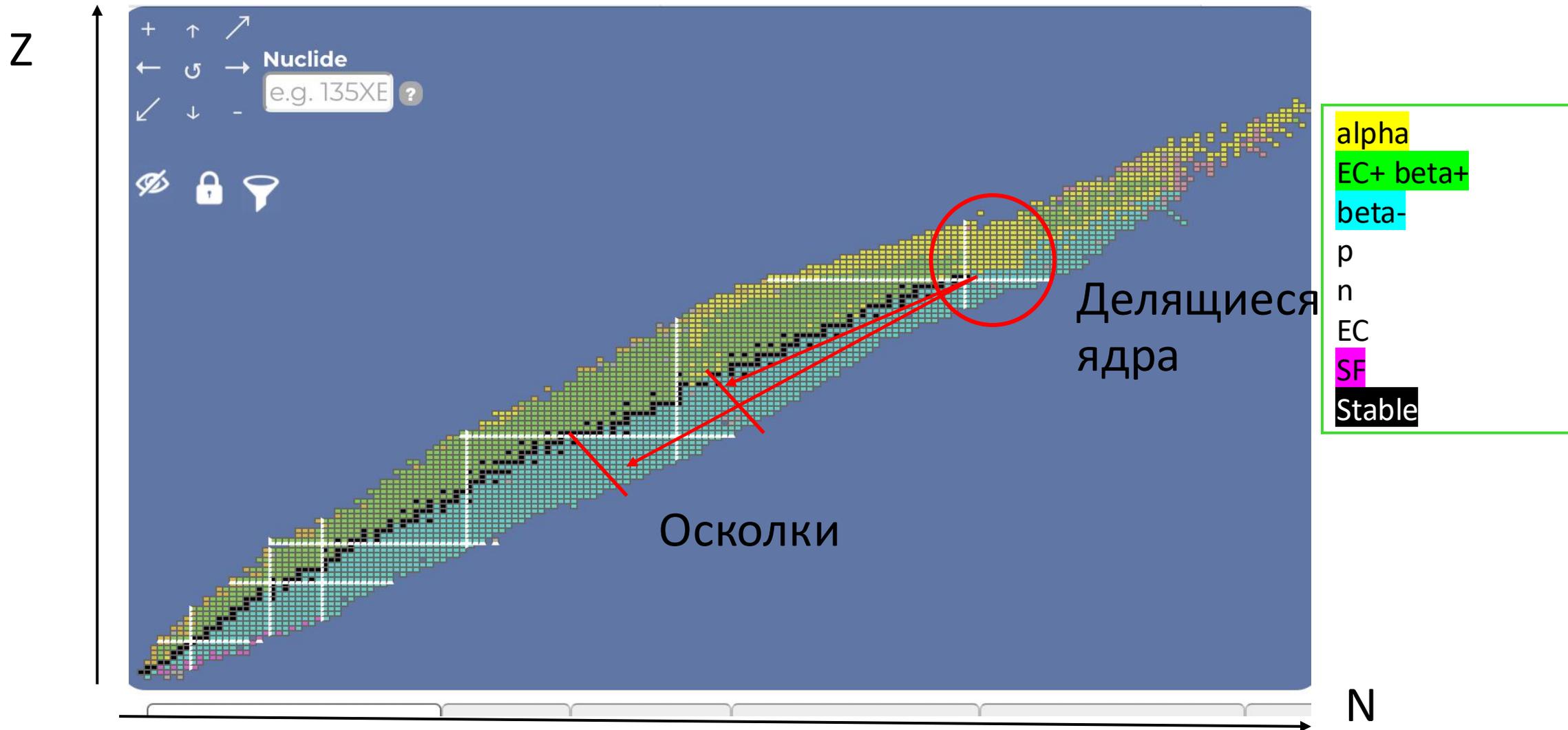
Расчет опирается на базы данных осколков деления, содержащие данные по вероятностям их бета-распада.

Antineutrino spectrum calculation is based on the information about beta-decay schemes of nuclei – fission fragments, probabilities of beta-decay branches

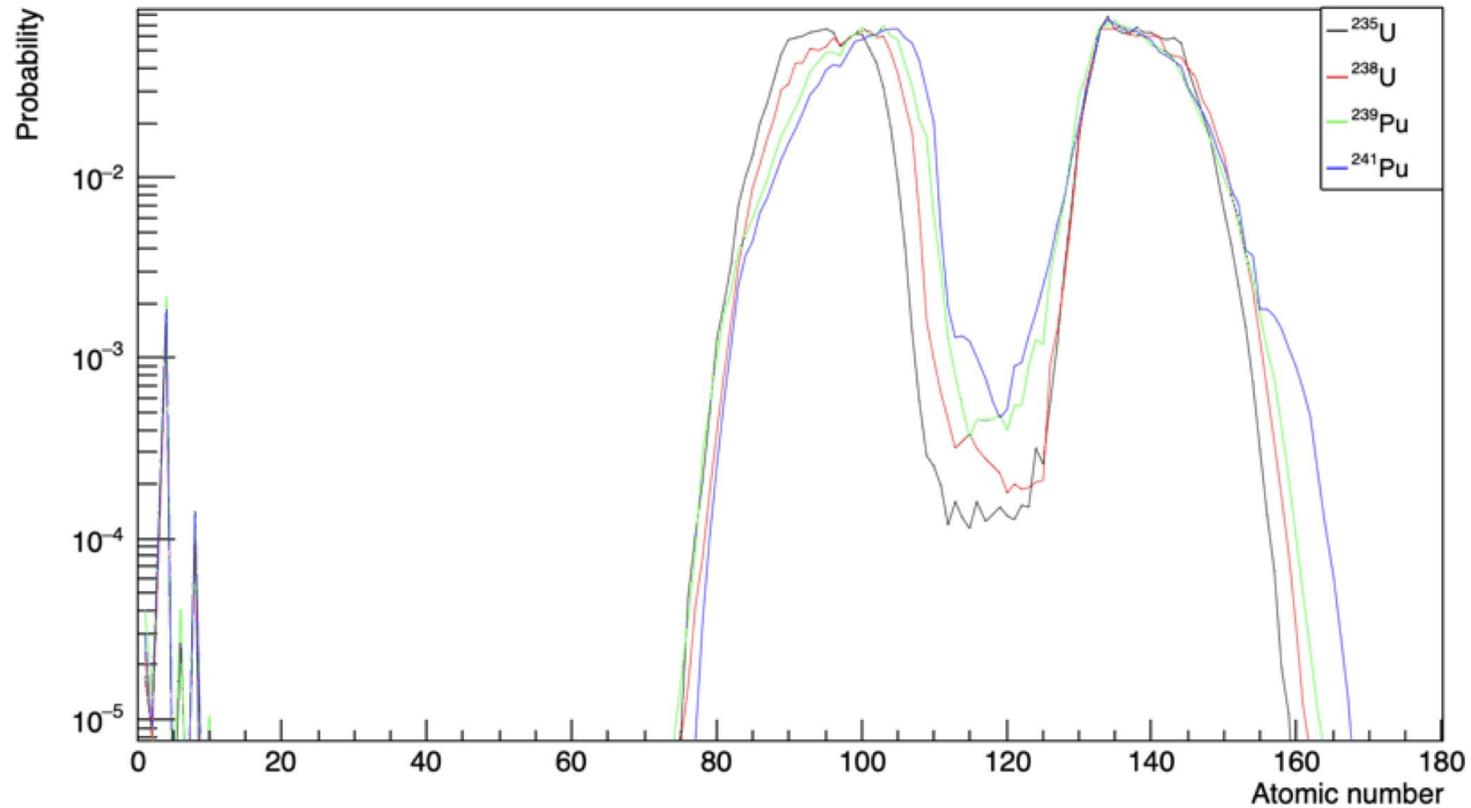
Расчет опирается на базы данных осколков деления, содержащие данные по вероятностям их бета-распада.

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?



Секции ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук "Физика фундаментальных взаимодействий", посвященной 70-летию со дня рождения Валерия Анатольевича Рубакова

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.

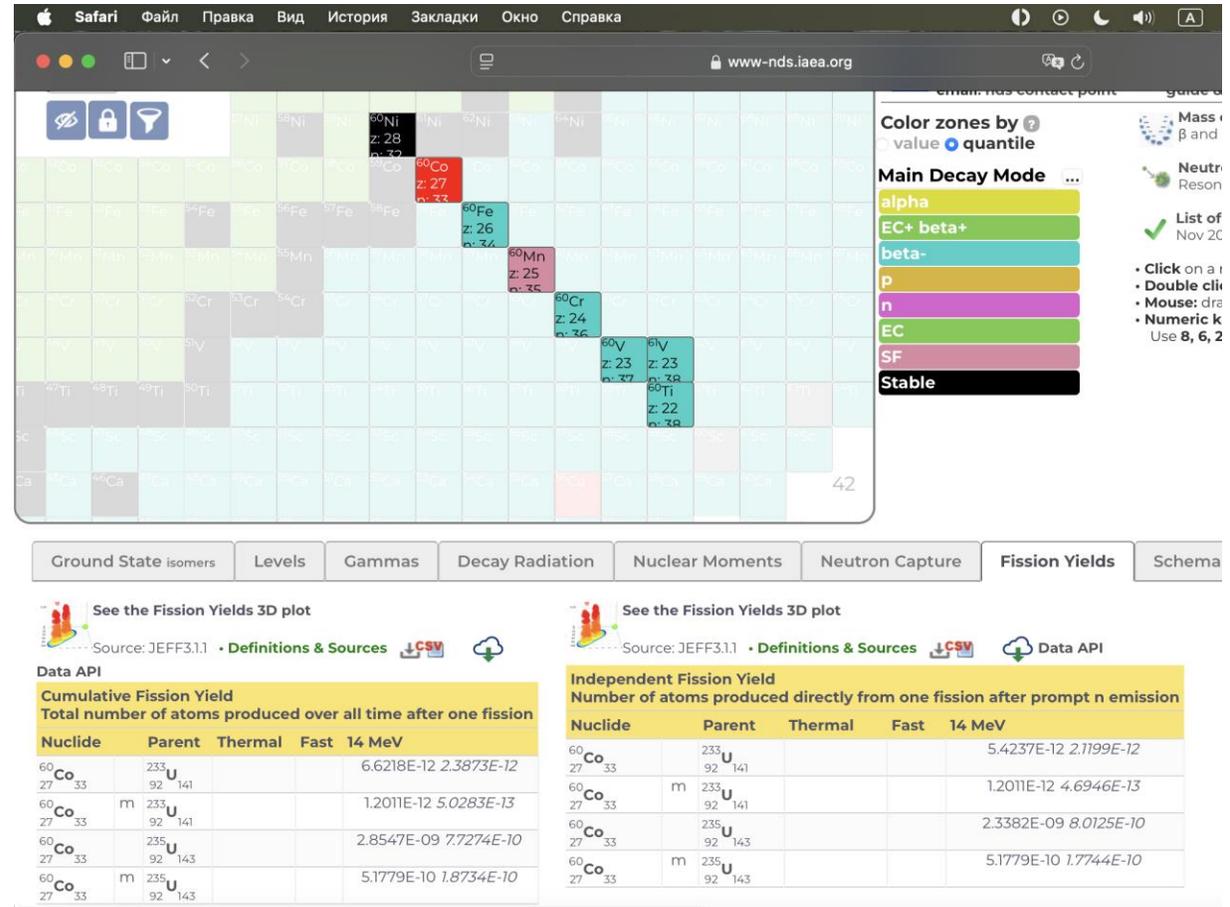
Analysis shows that in existing data bases only one third of nuclei decays are known. The same part is totally unknown and 1/3 is just estimated.

Предлагаемый метод расчета

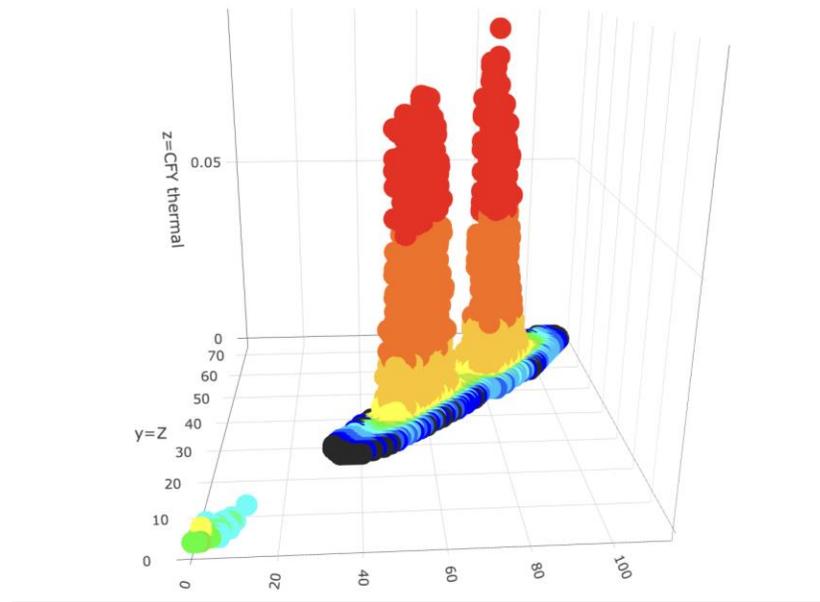
The method of calculation proposed here

# 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  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Pu}$



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

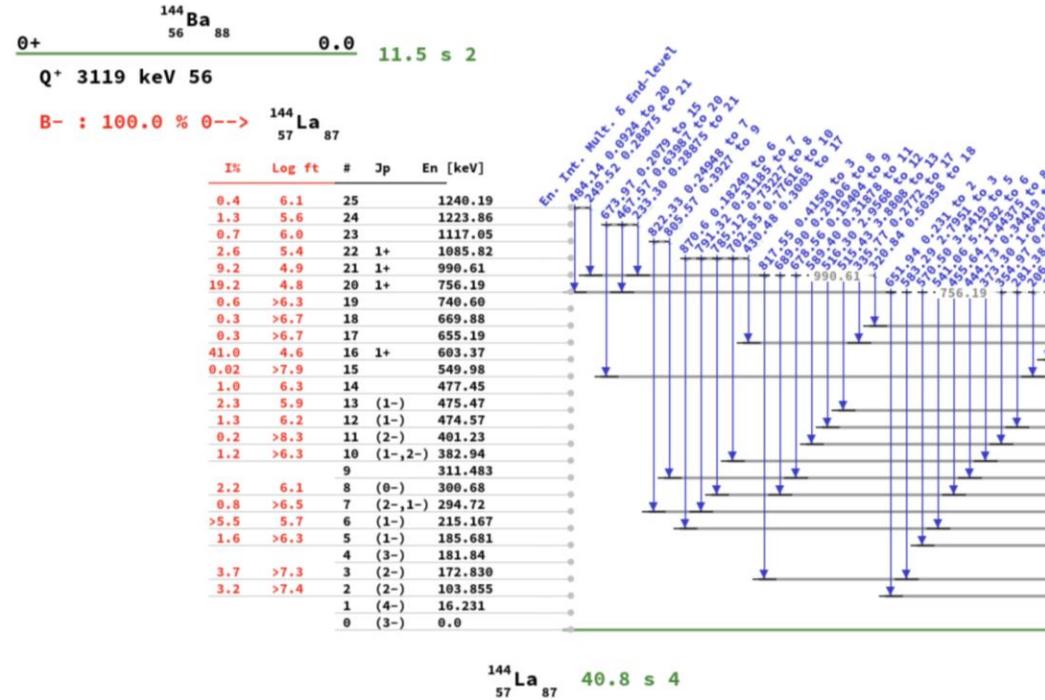
Предлагаемый метод расчета включает в себя варьирование вероятностей бета-распада при сравнении с экспериментальным спектром.

Варьируются вероятности у осколков с неизвестными схемами распада.

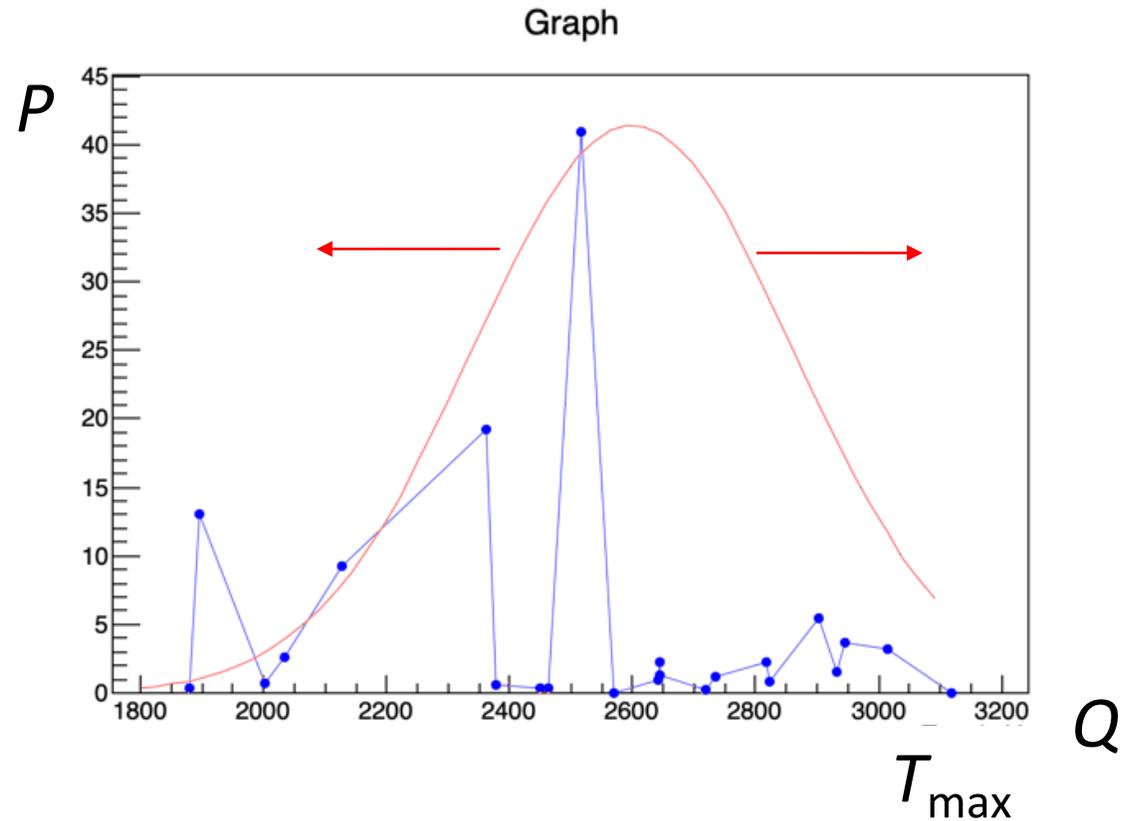
Proposed method vary the probabilities of beta-decay branches to fit experimental antineutrino spectrum

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

#	$\langle E_{\beta} \rangle$ [keV]	$I_{\beta}$ (abs) [%]	Daughter level [keV]	$J^{\pi}$	$E_{\beta, \text{max}}$ [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	<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	



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



## 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
<p>Nucleus: Ba-144 ZA=56144                      Library: ENDF/B-VIII.0, MAT=1855                      AUTH: Conv. from CGM                      EDATE: EVAL-AUG11                      Half life: <math>11.5 \pm 0.2</math>(s)                      AWR: 142.6866                      Isomer number: LISO=0                      Level number: LIS=0                      Spin &amp; Parity: 0+                      Ebeta: <math>902.2703 \pm 47.1652</math> (keV)                      Egamma: <math>785.05 \pm 33.37</math> (keV)                      Ealpha: <math>0 \pm 0</math> (keV)                      Decay modes: 1                      Radiation types:2</p>	<p>Nucleus: Ba-144 ZA=56144                      Library: JEFF-3.3, MAT=1864                      AUTH: G.AUDI, O.BERSILLON, J.BLACHOT +                      EDATE: EVAL-DEC03                      Half life: <math>11.5 \pm 0.2</math>(s)                      AWR: 142.687                      Isomer number: LISO=0                      Level number: LIS=0                      Spin &amp; Parity: 0+                      Ebeta: <math>929.8 \pm 9.298</math> (keV)                      Egamma: <math>784.7 \pm 7.847</math> (keV)                      Ealpha: <math>0 \pm 0</math> (keV)                      Decay modes: 1                      Radiation types:0</p>	<p>Nucleus: Ba-144 ZA=56144                      Library: JENDL-5, MAT=1971                      AUTH: Conversion from ENSDF                      EDATE: EVAL-NOV21                      Half life: <math>11.5 \pm 0.2</math>(s)                      AWR: 142.6866                      Isomer number: LISO=0                      Level number: LIS=0                      Spin &amp; Parity: 0+                      Ebeta: <math>929.8 \pm 34.4609</math> (keV)                      Egamma: <math>784.7 \pm 11.1107</math> (keV)                      Ealpha: <math>0 \pm 0</math> (keV)                      Decay modes: 1                      Radiation types:2</p>	<p>Nucleus: Ba-144 ZA=56144                      Library: ENSDF-2024                      Half life: <math>11.5 \pm 0.2</math>(s)                      Spin &amp; 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</p>
<p>#M1. Decay mode: RTYP=1 <math>\beta^-</math>                      Decay Q=<math>3066.408 \pm 19.357</math> keV</p>	<p>#M1. Decay mode: RTYP=1 <math>\beta^-</math>                      Decay Q=<math>3121 \pm 0</math> keV</p>	<p>#M1. Decay mode: RTYP=1 <math>\beta^-</math>                      Decay Q=<math>3119 \pm 56</math> keV</p>	<p>#M1. Decay mode: RTYP=1 <math>\beta^-</math>                      Decay Q=<math>3083</math> keV</p>
<p>#R1. Radiation type: STYP=0 <math>\gamma</math>                      AveDecayEne=<math>586.72 \pm 0</math> keV  <input type="checkbox"/> ContinuousSpectrum:307 <input type="checkbox"/> plot</p>	-no-	<p>#R1. Radiation type: STYP=0 <math>\gamma</math>                      AveDecayEne=<math>784.7 \pm 11.111</math> keV  <input checked="" type="checkbox"/> DiscreteSpectrum: 88 lines <input type="checkbox"/> plot  <input checked="" type="checkbox"/> ContinuousSpectrum:428 <input type="checkbox"/> plot</p>	<p>#R1. Radiation type: STYP=0 <math>\gamma</math>                      AveDecayEne: ?  <input checked="" type="checkbox"/> DiscreteSpectrum: 100 lines <input type="checkbox"/> plot</p>
<p>#R2. Radiation type: STYP=1 <math>\beta^-</math>                      AveDecayEne=<math>993.65 \pm 0</math> keV  <input checked="" type="checkbox"/> ContinuousSpectrum:307 <input type="checkbox"/> plot</p>	-no-	<p>#R2. Radiation type: STYP=1 <math>\beta^-</math>                      AveDecayEne=<math>929.8 \pm 1.4837</math> keV  <input checked="" type="checkbox"/> DiscreteSpectrum: 22 end-points <input type="checkbox"/> plot  <input checked="" type="checkbox"/> ContinuousSpectrum:349 <input type="checkbox"/> plot</p>	-no-
-no-	-no-	-no-	<p>#R2. Radiation type: STYP=9 X-rays                      AveDecayEne: ?  <input checked="" type="checkbox"/> DiscreteSpectrum: 6 lines <input type="checkbox"/> plot</p>

### Legend

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

# Методика расчета спектра антинейтрино с варьированием спектров неизвестных осколков

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

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

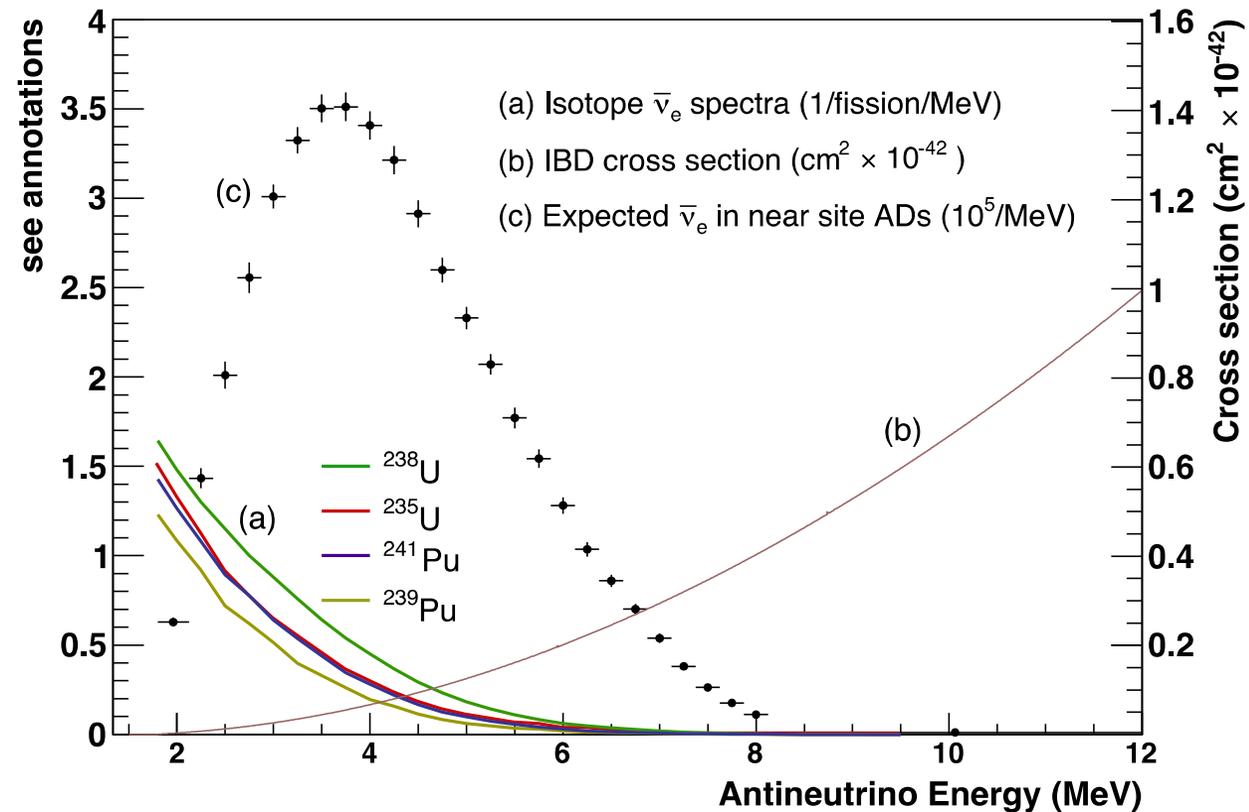
$i$  – runs through antineutrino spectra ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ),

$j$  – runs through experimental spectrum bins

$k$  – runs through A charge chains

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>5.779</b>
<b>ILL</b>	6.426	8.929	4.204	5.796	5.866
<b>Vogel</b>	6.502	9.109	4.526	6.515	6.072
<b>MEPhI</b>	6.395	9.213	4.388	6.478	5.977
<b>Huber &amp; Mueller</b>	6.681	10.12	4.387	6.081	6.180
<b>Kopeikin et al.</b>	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				$^i\sigma_f \times 10^{43}$ [cm <sup>2</sup> /fission]	$^{INR}\sigma_f \times 10^{43}$ [cm <sup>2</sup> /fission]	$R_{INR}$	H-M	$R_{H\_M}$
	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$					
Double Chooz	0.520	0.087	0.333	0.060	<b>5.71</b> ± 0.06	<b>5.779</b>	<b>0.988</b>	<b>6.180</b>	<b>0.924</b>
Bugey-4	0.538	0.078	0.328	0.056	<b>5.752</b> ± 0.081	<b>5.742</b>	<b>1.002</b>	<b>6.163</b>	<b>0.933</b>
Daya Bay	0.561	0.076	0.307	0.056	<b>5.91</b> ± 0.12	<b>5.768</b>	<b>1.025</b>	<b>6.204</b>	<b>0.927</b>
<b>RENO</b>	0.571	0.073	0.300	0.056	<b>5.852</b> ± 0.094	<b>5.765</b>	<b>1.015</b>	<b>6.210</b>	<b>0.926</b>

# Conclusion

- New data base for unknown nuclei is received
- $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  individual spectra were calculated basing on our data base
- Cross sections calculated using our spectra satisfy to the experimental values measured with best accuracy

Thank you for the attention

# Extra slides

# Сечения

	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$	DC
Только DC	5.894	10.71	4.212	6.326	5.779
Только DB	5.854	10.80	4.171	6.293	5.750
совместно	5.780	10.73	4.383	6.624	5.796

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

# Сравнение расчетных сечений и экспериментальных при совместном анализе DC и DB

experiment	Core content				$i\sigma_f \times 10^{43}$ [cm <sup>2</sup> /fission]	$^{INR}\sigma_f \times 10^{43}$ [cm <sup>2</sup> /fission]	$R_{INR}$	H-M	$R_{H\_M}$
	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>239</sup> Pu	<sup>241</sup> Pu					
Double Chooz	0.520	0.087	0.333	0.060	<b>5.71</b> ± 0.06	<b>5.779</b>	<b>0.988</b>	<b>6.180</b>	<b>0.924</b>
Bugey-4	0.538	0.078	0.328	0.056	<b>5.752</b> ± 0.081	<b>5.742</b>	<b>1.002</b>	<b>6.163</b>	<b>0.933</b>
Daya Bay	0.561	0.076	0.307	0.056	<b>5.91</b> ± 0.12	<b>5.768</b>	<b>1.025</b>	<b>6.204</b>	<b>0.927</b>
<b>RENO</b>	0.571	0.073	0.300	0.056	<b>5.852</b> ± 0.094	<b>5.765</b>	<b>1.015</b>	<b>6.210</b>	<b>0.926</b>