

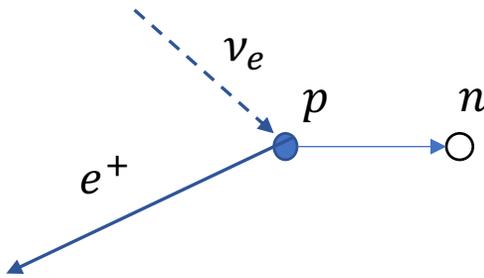
Ядерный реактор как источник антинейтрино: моделирование и эксперимент

А.П. Власенко, С.В. Силаева, В.В. Синев

New Year seminar Experimental Physics Department LGARN

- Что такое энергетический спектр антинейтрино ядерного реактора? Как его измерить?
- Где был измерен наиболее точно спектр позитронов?
- Экспериментальный спектр антинейтрино Double Chooz
- Почему расчетный спектр не может быть точным?
- Описание экспериментальных спектров расчетными
- Новые спектры антинейтрино ядерного реактора на базе измеренного спектра позитронов Double Chooz

Позитронный и антинейтринный спектры



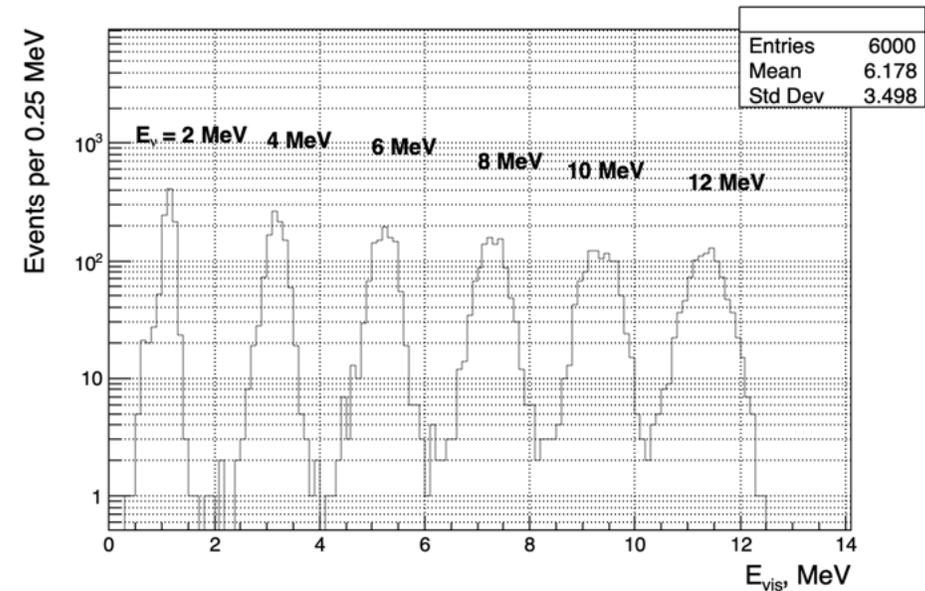
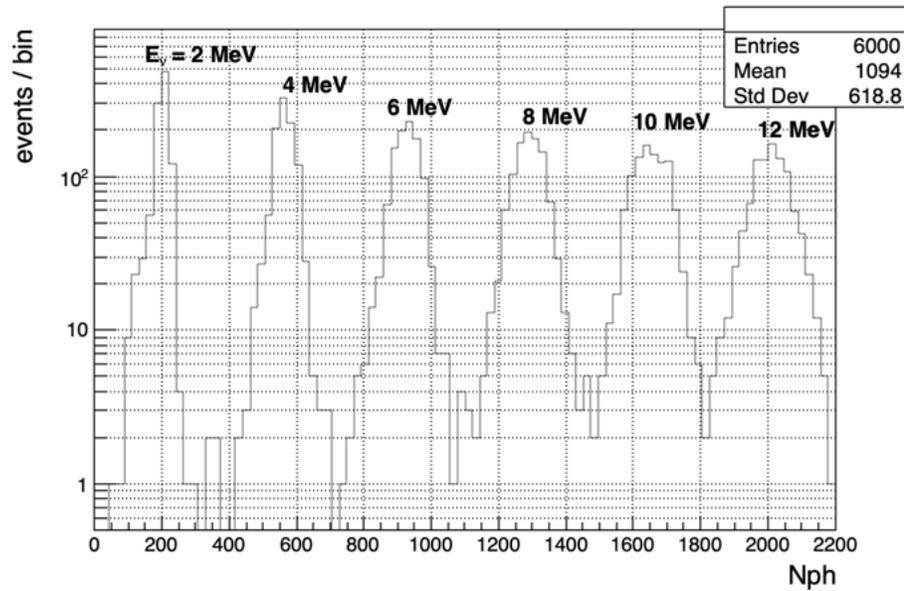
$$T = E - 1.806 \text{ MeV}$$

$$\frac{dN_e}{dT}(T) = \int_{E_{thr}}^{E_{max}} \frac{dN_e}{dE}(E) \cdot \sigma_{\nu p}(E) \cdot R(E, T) dE$$

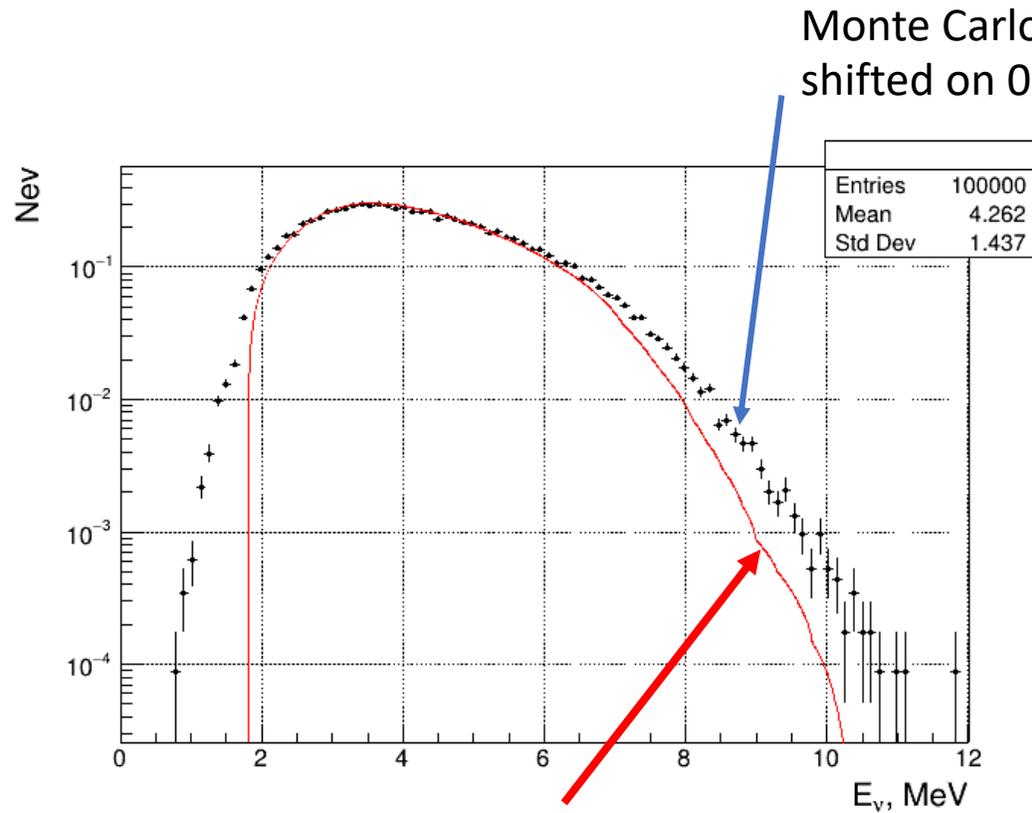
Positron spectrum $\frac{dN_e}{dT}(T)$ (Positron kinetic energy T)
 Antineutrino spectrum $\frac{dN_e}{dE}(E)$ (Antineutrino energy E)
 Antineutrino cross section $\sigma_{\nu p}(E)$
 Detector response function $R(E, T)$

Cross section: Strumia and F. Vissani, Phys. Lett. B 564, 42-54 (2003) doi:10.1016/S0370-2693(03)00616-6 [arXiv:astro-ph/0302055 [astro-ph]].
 G. Ricciardi, N. Vigniaroli, F. Vissani, JHEP 08 (2022) 212 doi:10.1007/JHEP08%282022%29212 [arXiv:2206.05567 [hep-ph]].

Пример функции отклика детектора

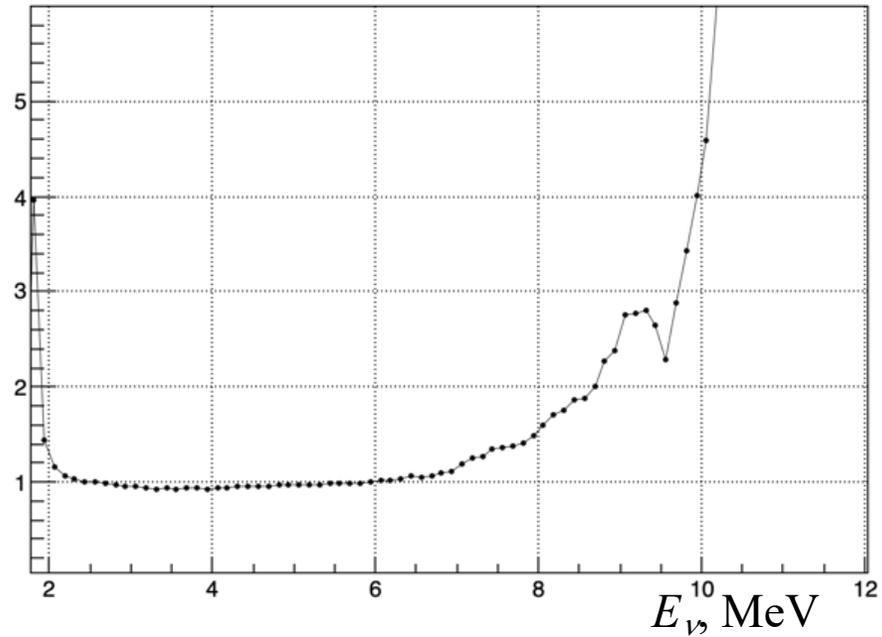


Функция преобразования позитронного спектра в антинейтринный, полученная методом Монте Карло



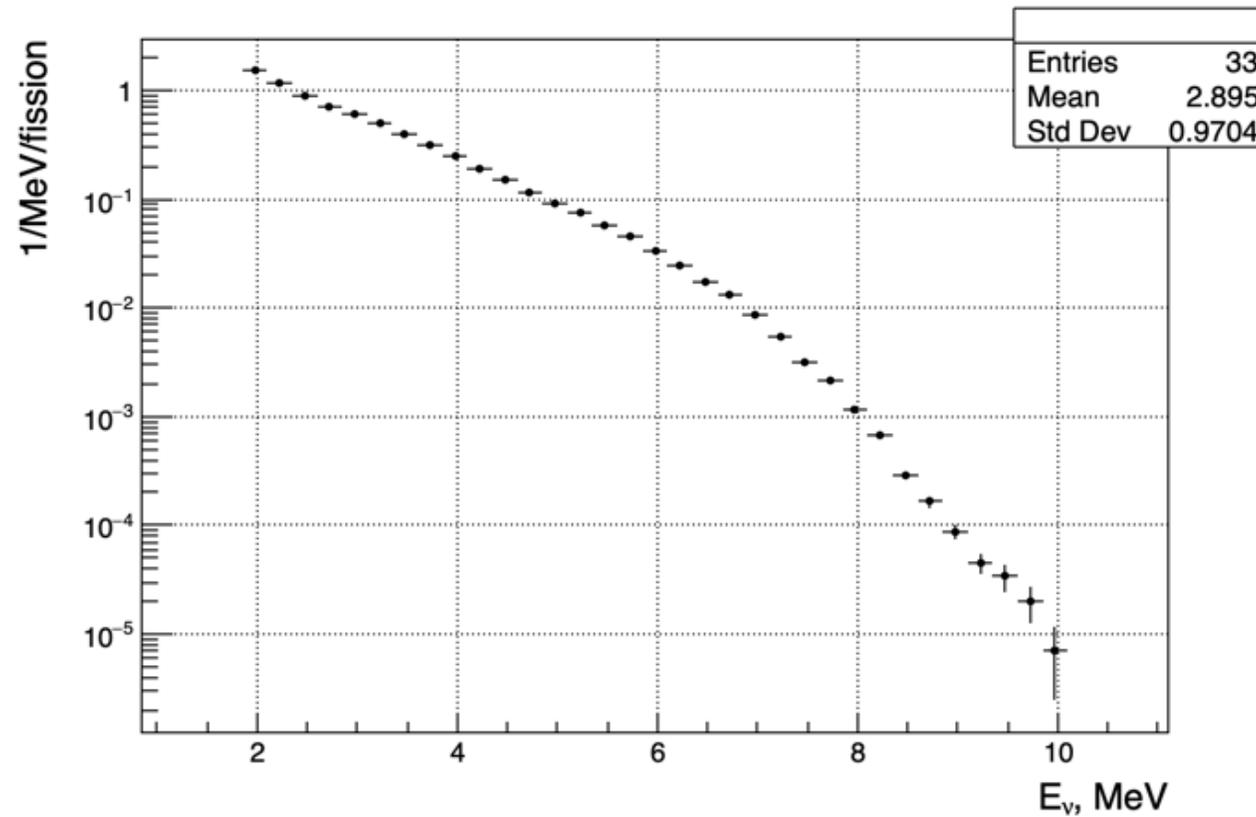
Ideal spectrum $\frac{dN_\nu}{dE}(E)\sigma_{\nu p}(E)$

Graph



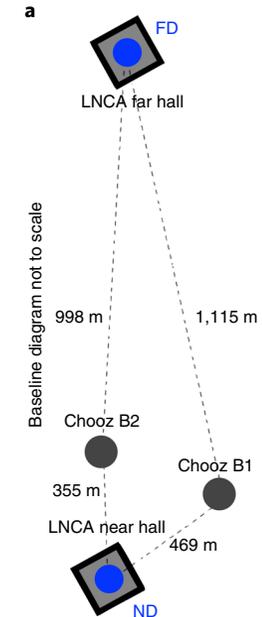
Transformation function calculated for 10^6 events statistics

Экспериментальный спектр антинейтрино

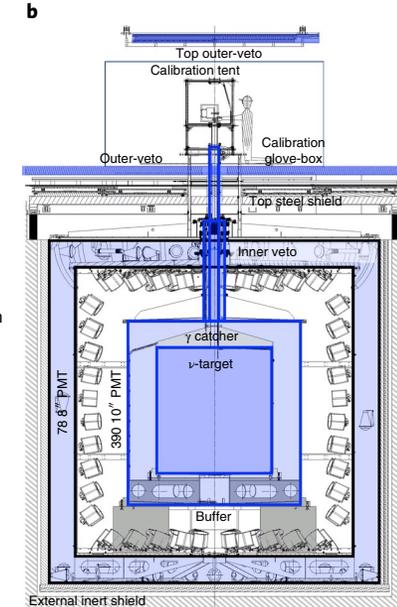


Где был измерен наиболее точно спектр
позитронов?

Место измерения Double Chooz эксперимента

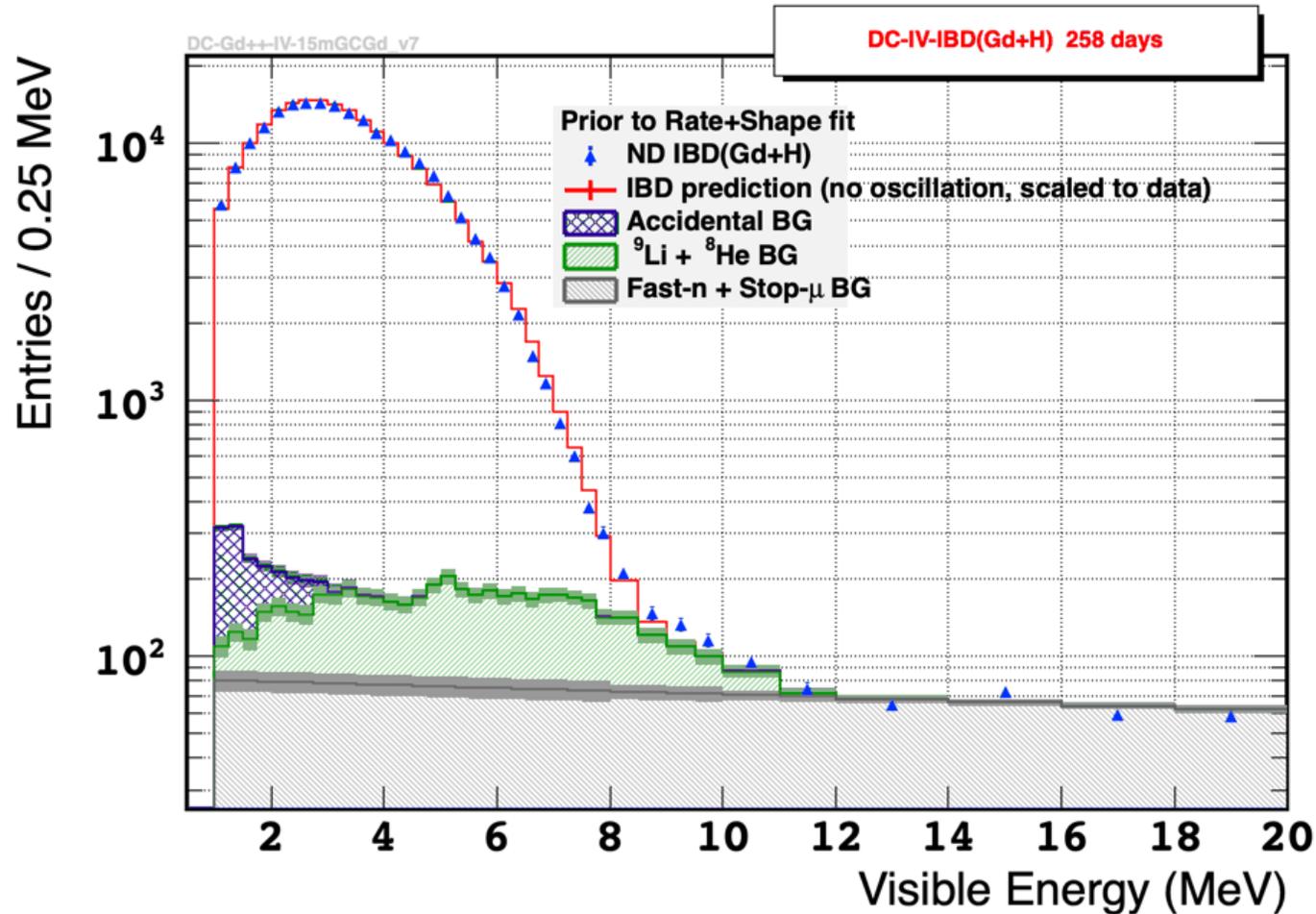


Detector
positions
from top
view



Each Detector
construction

Измеренный спектр нейтрино-подобных событий



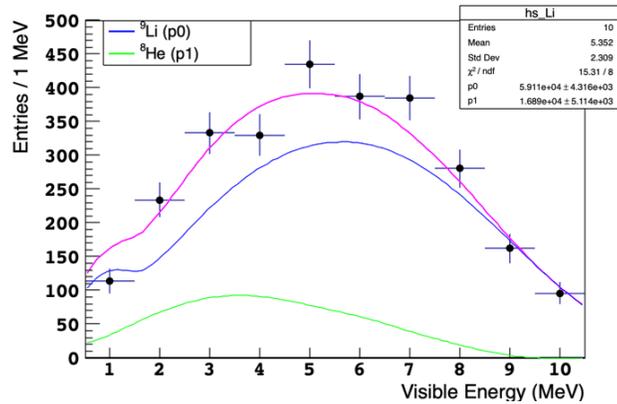
~200 000 events in the spectrum

To get positron spectrum one needs to subtract backgrounds:

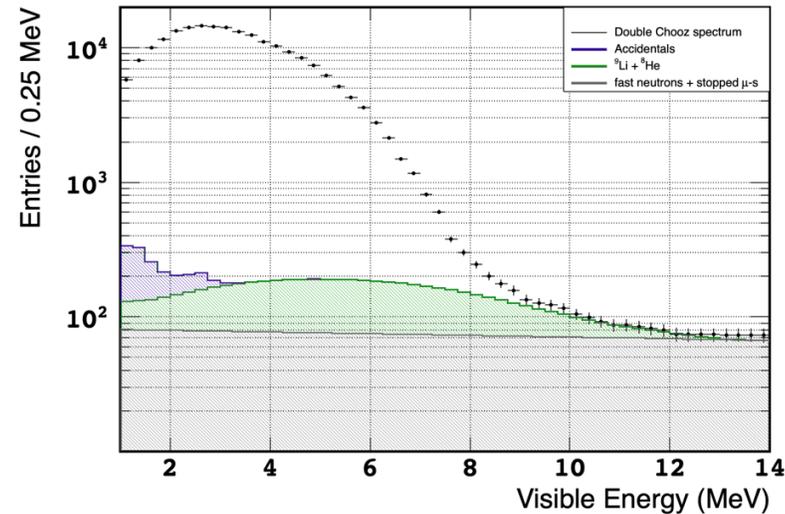
- Accidentals
- ${}^9\text{Li}$ - ${}^8\text{He}$ cosmogenic
- Fast neutrons and stopped muons

Nature Physics, (2020) 16, 558–564. doi:
10.1038/s41567-020-0831-y
Arxiv:1901.09445 [hep-ex]

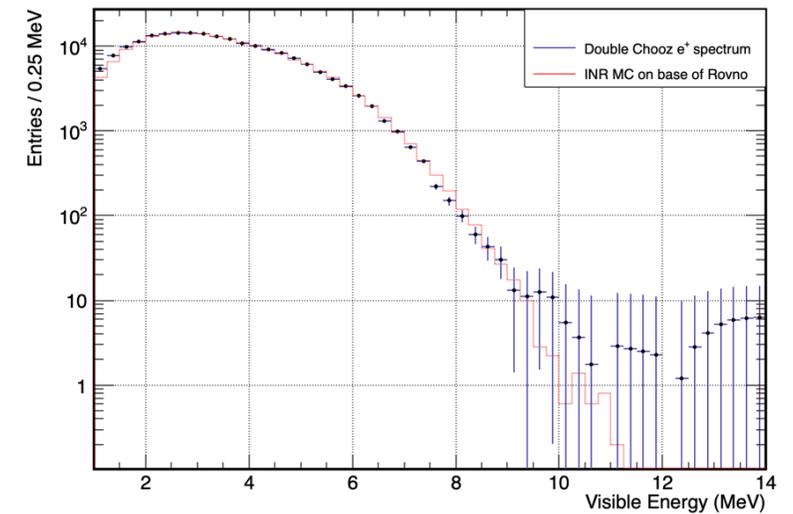
Вычитание фонов. Экспериментальный спектр позитронов реакции обратного бета-распада



Experimentally measured beta-spectrum produced by cosmogenic isotopes ^9Li and ^8He .

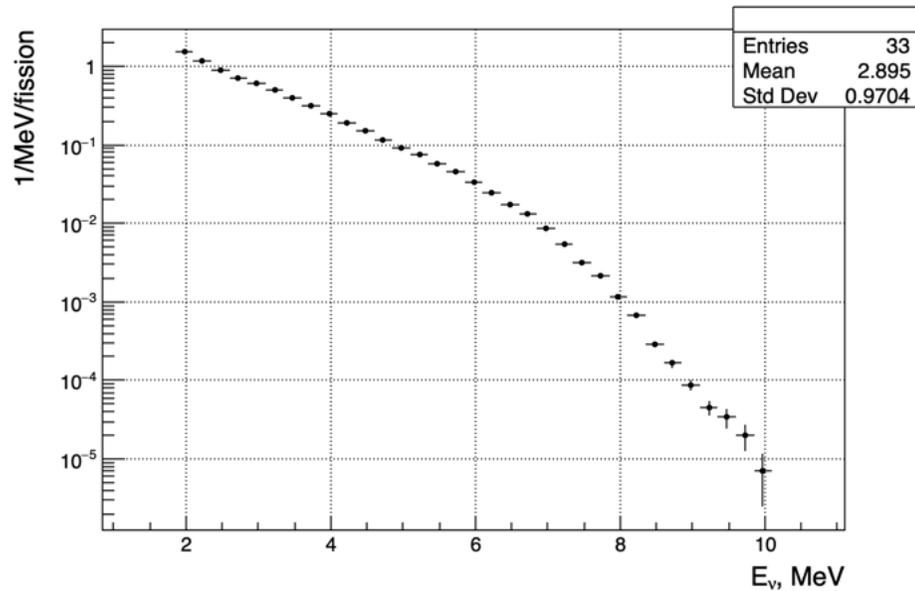


Normalized ^9Li and ^8He beta-spectrum on measured counting rate of these events in near detector.

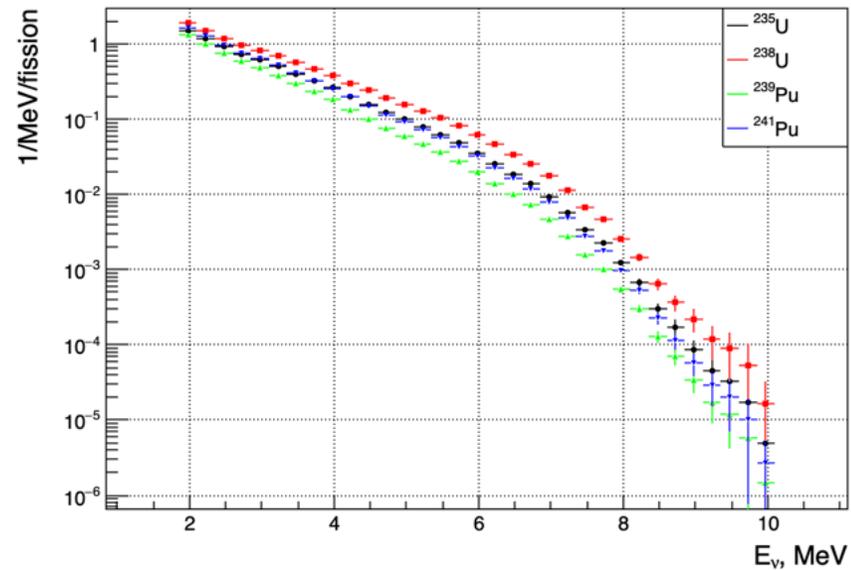


Pure positron spectrum after background subtraction. Red line – Monte Carlo simulation on base of Rovno spectra.

Экспериментальный спектр антинейтрино Double Chooz



Experimental antineutrino spectrum
as a result of division experimental
ideal spectrum by transformation
function



^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu experimental antineutrino
spectra as a result of splitting experimental spectrum
according to their parts
 $^{235}\text{U} - 0.52$, $^{238}\text{U} - 0.087$, $^{239}\text{Pu} - 0.333$, $^{241}\text{Pu} - 0.06$

Почему расчетный спектр не может быть точным?

Из 943 осколков

409 – известные

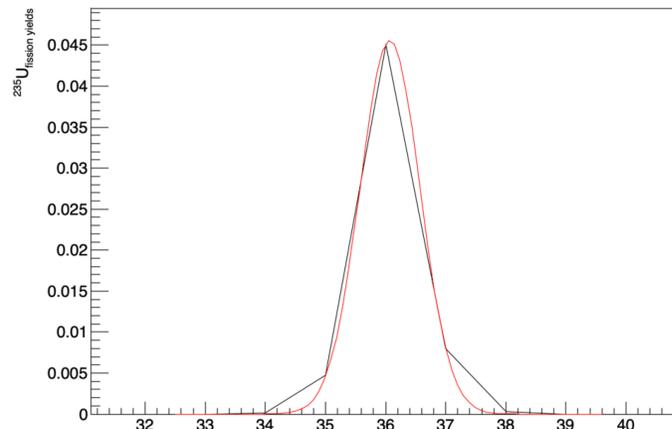
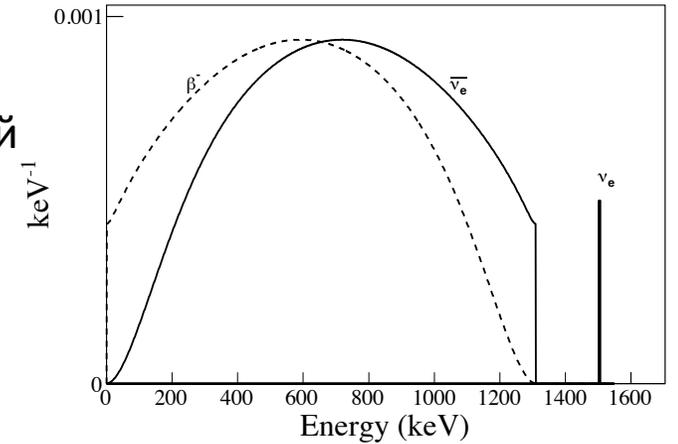
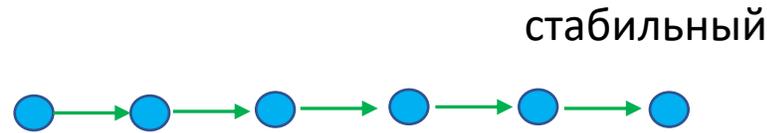
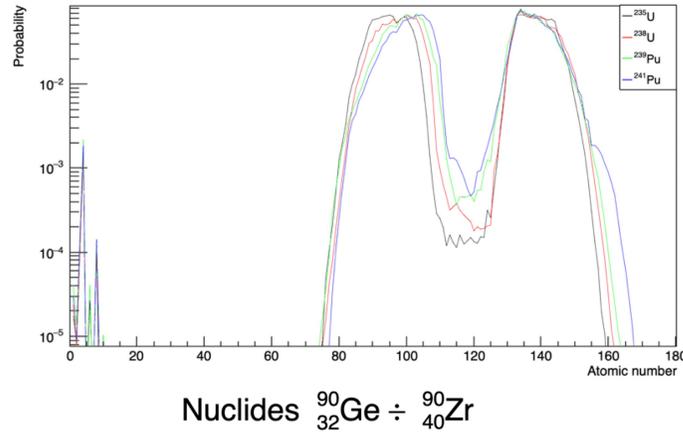
332 – неизвестных

202 – оцененные

534

Как делается расчет спектра?

Вероятность рождения осколка с массой A

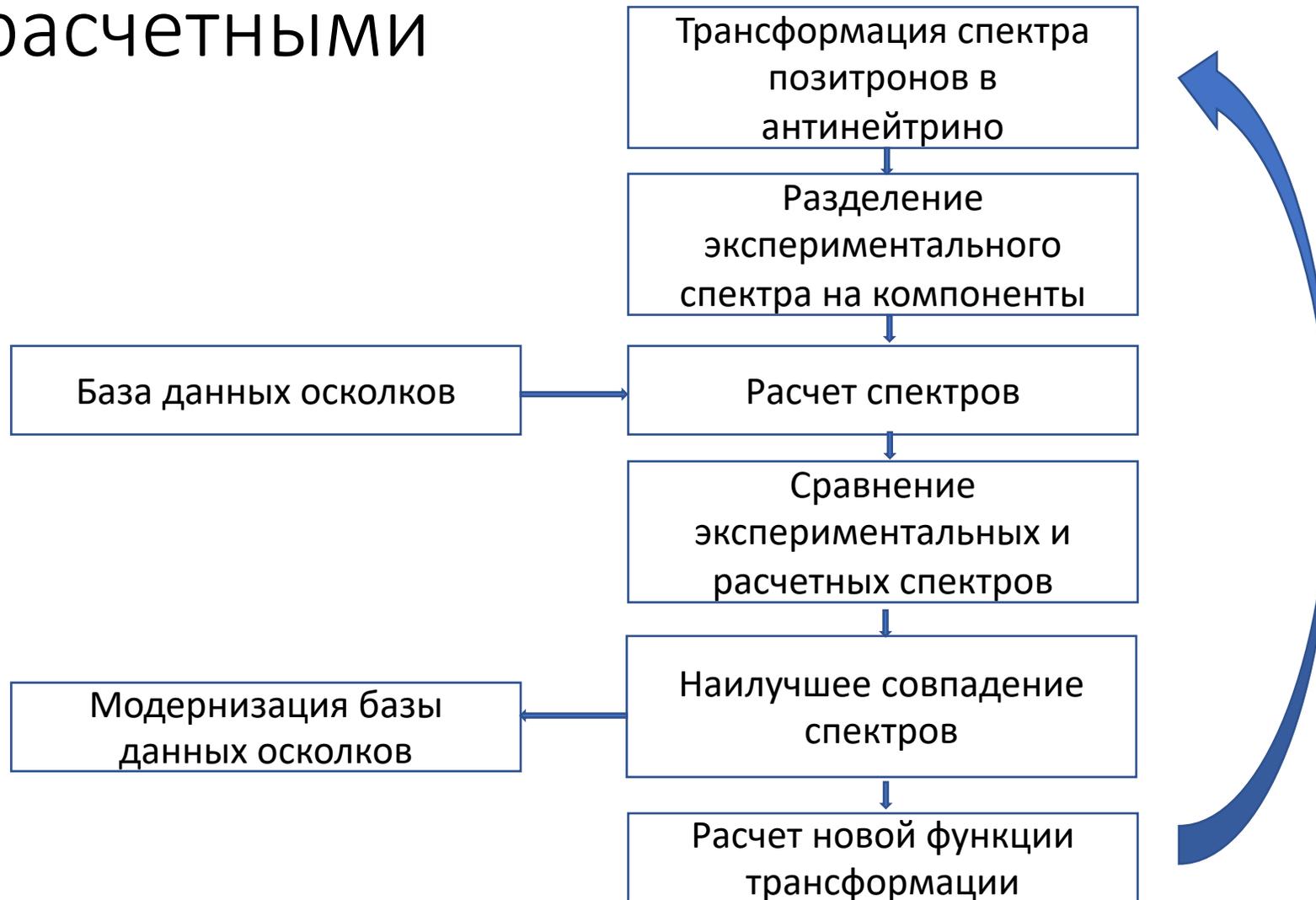


Вероятность рождения осколка с зарядом Z

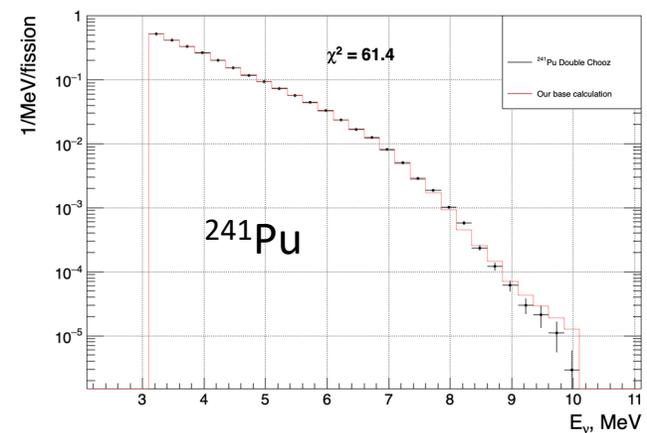
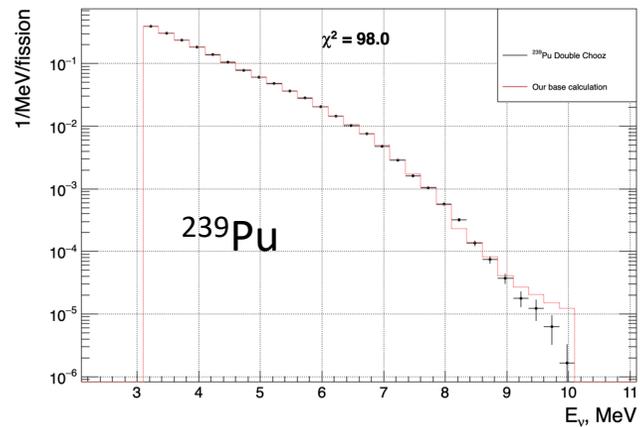
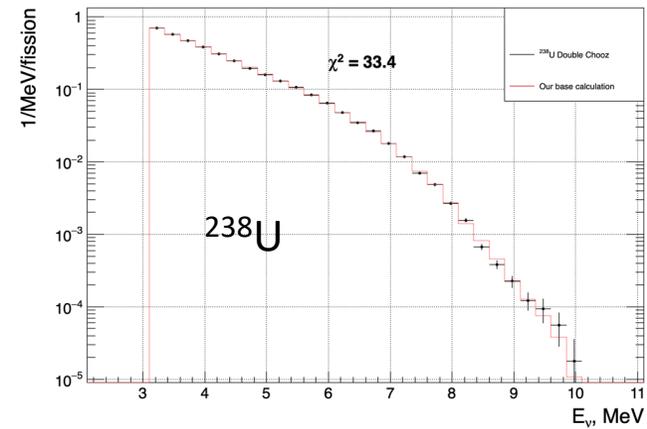
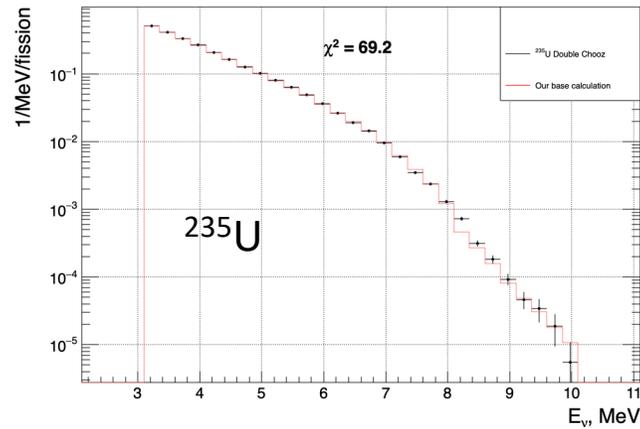
$$S_{ie}(E) = K \cdot pE \cdot (E_0 - E)^2 \cdot F(Z, E) \cdot C(Z, E) \cdot (1 - \delta(Z, A, E))$$

$$S_e(E) = \sum S_{ie}(E) * Y_i$$

Описание экспериментальных спектров расчетными

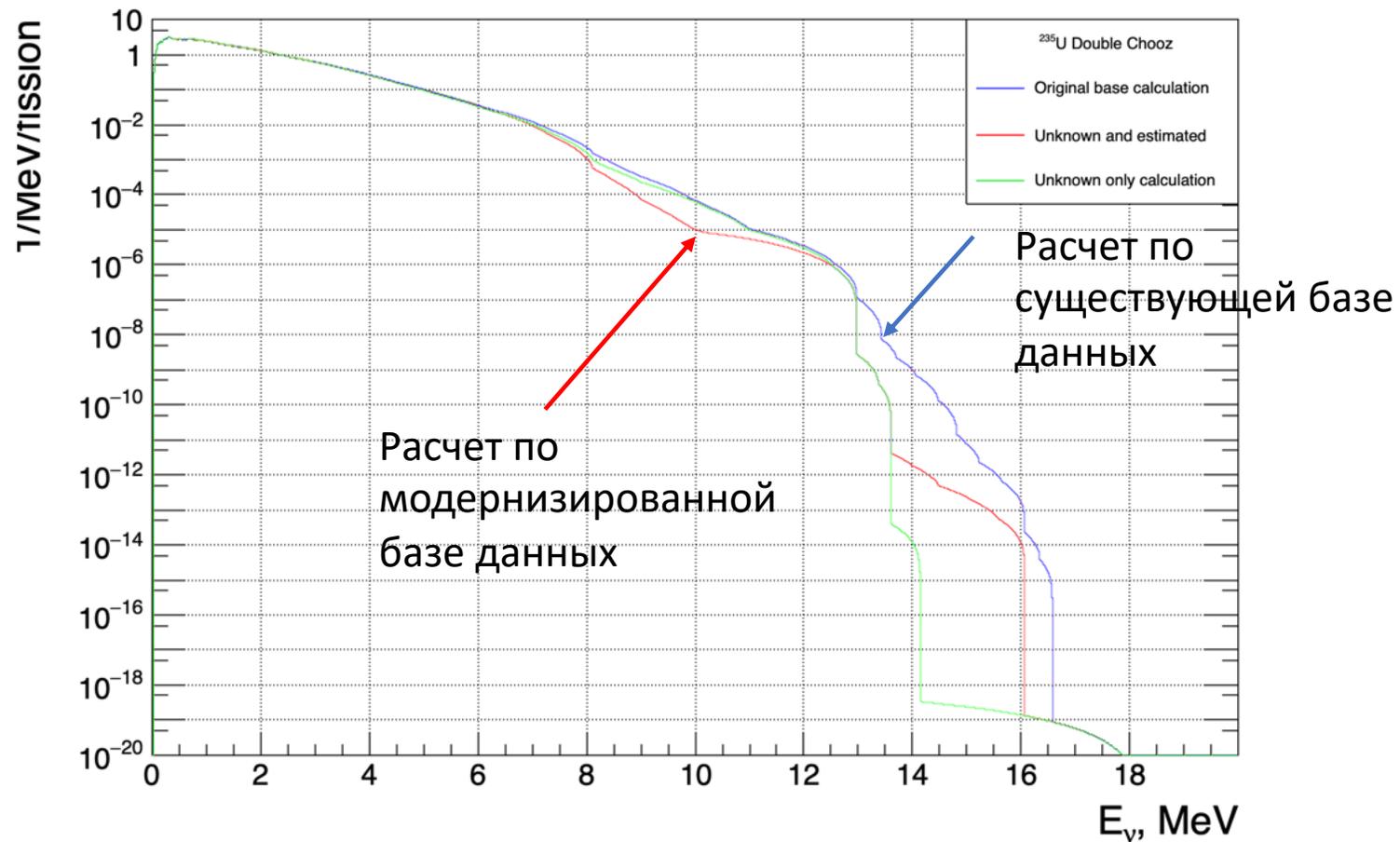


Fitting of experimental spectra by calculated ones



Спектр антинейтрино ^{235}U

^{235}U Double Chooz



Cross sections of calculated spectra [$\times 10^{-43}$ cm²/fission]

	²³⁵ U	²³⁸ U	²³⁹ Pu	²⁴¹ Pu	DC
Эта работа	6.031	9.160	4.153	5.902	5.67
Rovno	6.241	9.089	4.269	5.948	5.815
ILL	6.395	8.903	4.185	5.768	5.840
Vogel	6.498	9.135	4.508	6.520	6.066
MEPhI	6.404	9.267	4.383	6.489	5.985
Huber & Mueller	6.658	10.08	4.364	6.031	6.154
Kopeikin et al.	6.308	9.395	4.33*	6.01*	5.900

Experimental Double Chooz $\sigma_f = (5.71 \pm 0.06) \cdot 10^{-43}$ cm²/fission

Calculation of other experiments cross sections using INR spectra

experiment	Core content				$i\sigma_f \times 10^{43}$ [cm ² /fission]	$^{INR}\sigma_f \times 10^{43}$ [cm ² /fission]	R
	²³⁵ U	²³⁸ U	²³⁹ Pu	²⁴¹ Pu			
DC	0.520	0.087	0.333	0.060	5.71 ± 0.06	5.67	1.007
Bugey-4	0.538	0.078	0.328	0.056	5.75 ± 0.08	5.65	1.017
Daya Bay	0.561	0.076	0.307	0.056	5.91 ± 0.12	5.69	1.040

Заключение

- Получены спектры антинейтрино ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu на базе измерений ближним детектором Double Chooz
- Смесь сечений новых спектров в пропорции Double Chooz дает в точности значение самого точного сечения (1%)
- Систематически меньшее значение для самых точных сечений (Double Chooz, Bugey-4, Daya Bay) может быть обусловлено неучетом в экспериментальном сечении отработанного топлива