

Измерение реакторных нейтрино высоких энергий в эксперименте ДАНСС

Игорь Алексеев от коллаборации ДАНСС



4й энергоблок

DANSS

Калининская АЭС, г. Удомля,
180 км к северо-западу от Дубны

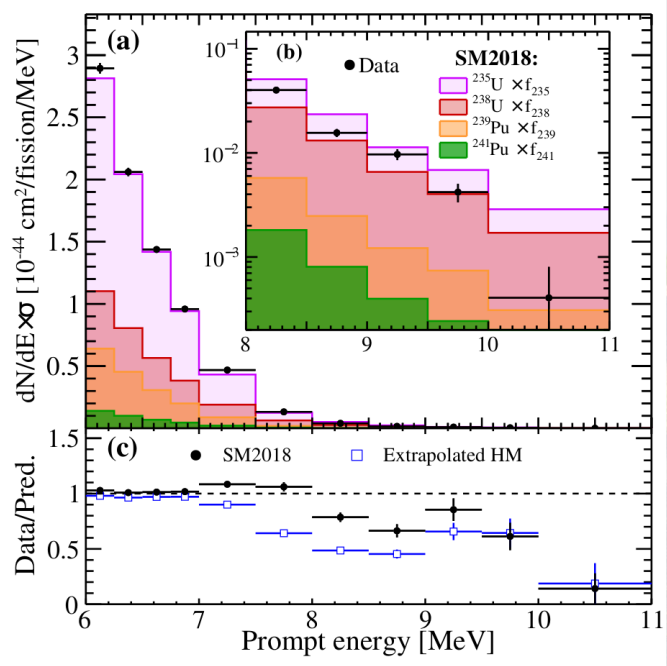
Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН,
посвящённая 300-летию Российской Академии Наук
ОИЯИ, Дубна, 1–5 апр. 2024 г.

Реактор – самый мощный искусственный источник нейтрино.

Для многих экспериментов очень важно знание высокоэнергичной части нейтринного спектра. Например, в поисках когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядрах основной вклад в возможный эффект даёт именно высокоэнергичный край спектра.

См. доклады А. Коновалова, Д. Пономарева и А. Лукьяшина
Нейтрино высоких энергий создаются наиболее короткоживущими изотопами и данные по ним, используемые для предсказаний спектра реакторных антинейтрино содержат большие неопределённости.

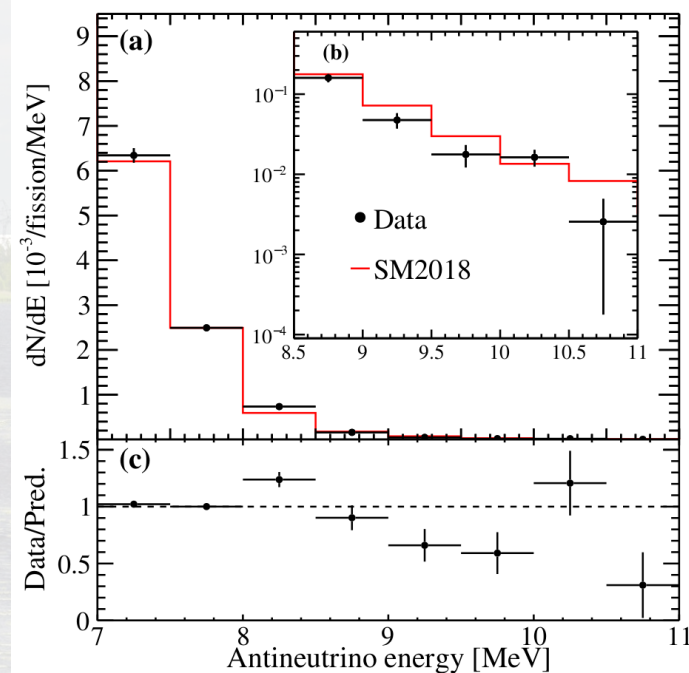
Daya Bay – 1958 дней набора статистики. Phys. Rev. Lett. 129, 041801

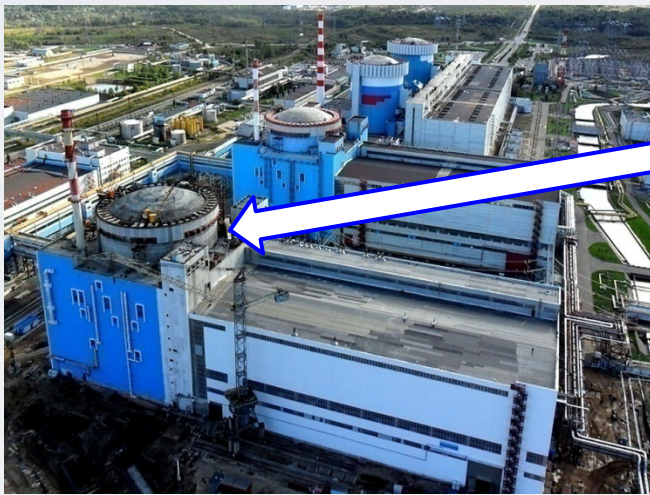


2500 событий в
области

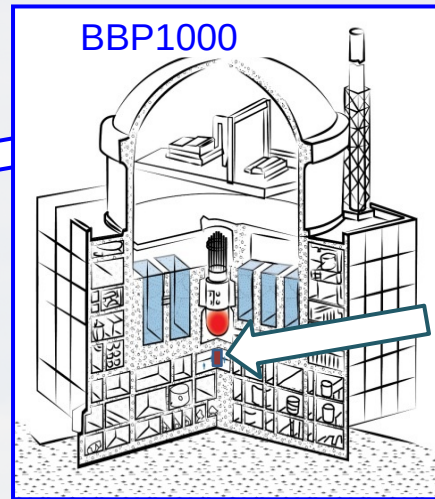
E_{prompt} 8-12 МэВ

Наблюдается
недостаток 29%
событий в области
 $E_{\text{prompt}} = 8-11$ МэВ





**Калининская АЭС,
Тверская область**



**Промышленный
реактор 3.1 ГВт_{th}**

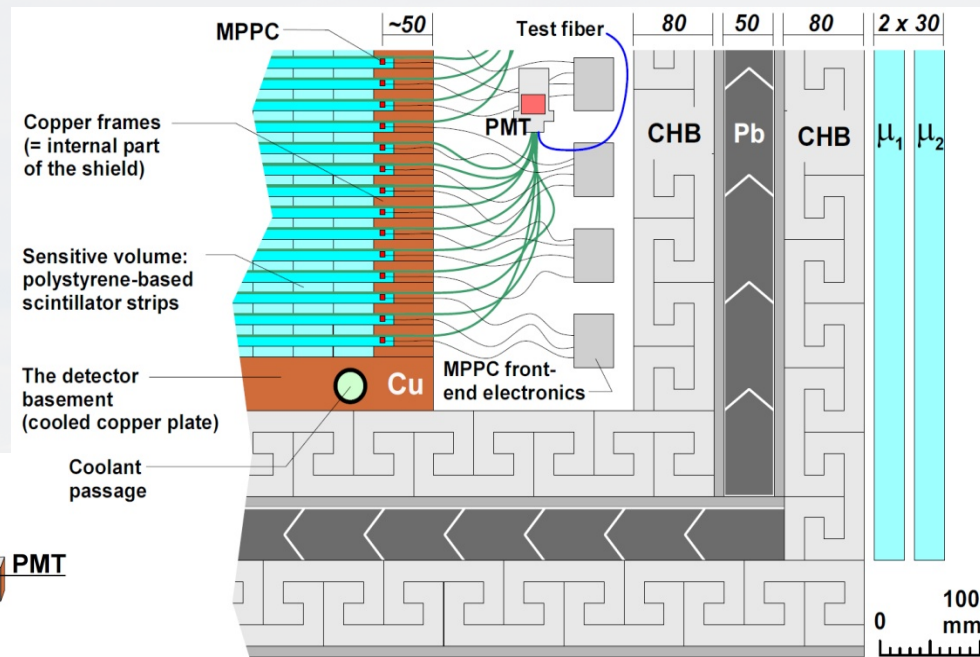
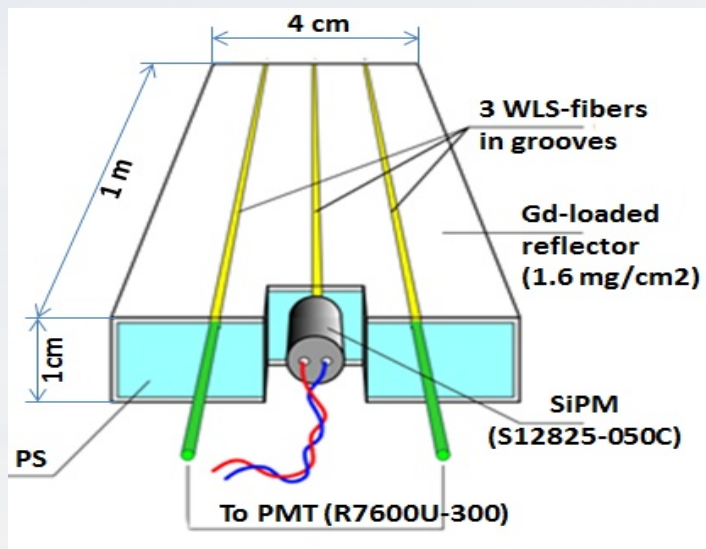
$\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ v} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} @ 11\text{m}$



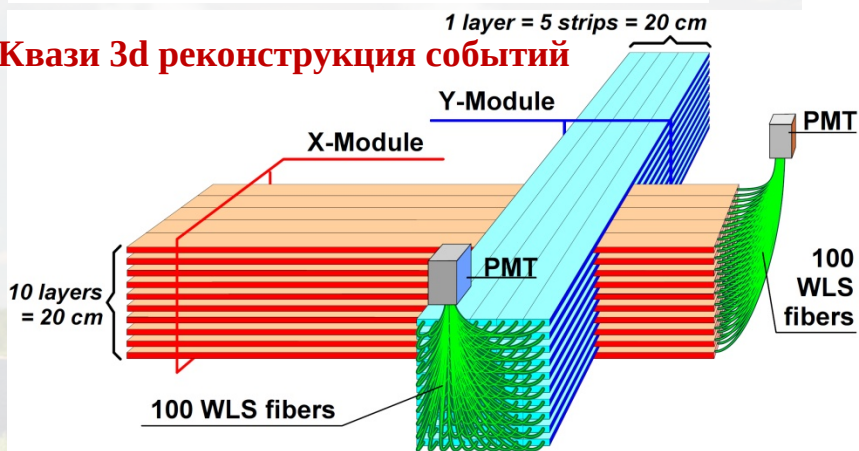
**ДАНСС на подвижной
платформе**

- Detector of the reactor **AntiNeutrino** based on **Solid-state Scintillator** – нет легковоспламеняющихся материалов
- Реакция обратного бета-распада (ОБР): $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$
- Вещество реактора, его здания и бассейнов отработанного топлива создают ~ 50 м в.э. Уменьшение фона $\mu \sim 5$ раз
- Подъёмный механизм позволяет менять расстояние от центра реактора в диапазоне 10.9 - 12.9 м в течение нескольких минут
- Описание установки: JINST 11 (2016) no.11, P11011
- **Первые результаты:** Phys.Lett. B787(2018)56 – **один год набора статистики**

Detector of the reactor AntiNeutrino based on Solid-state Scintillator



Квази 3d реконструкция событий

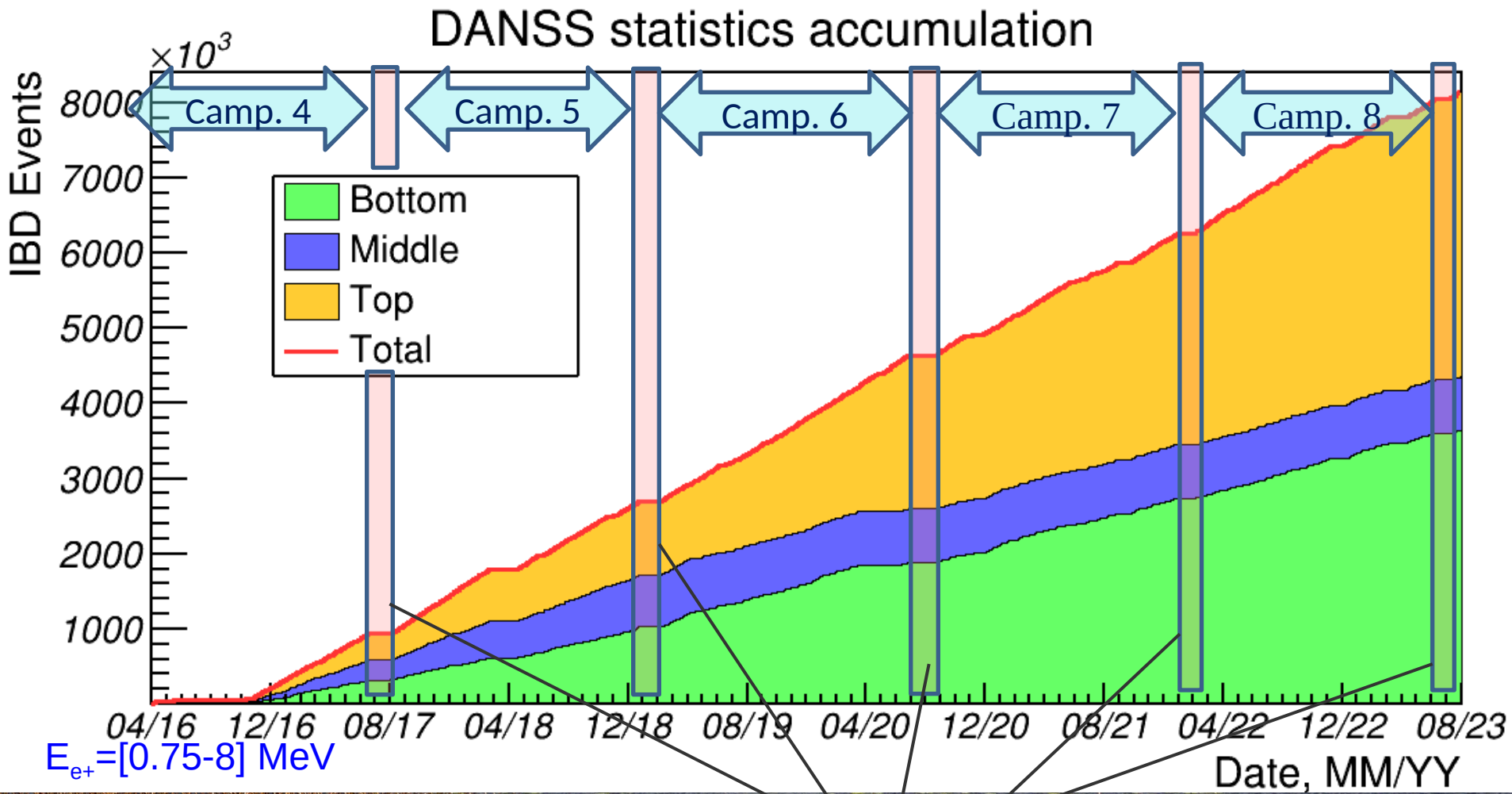


- Сцинтилирующие стрипы 10x40x100 мм³ с покрытием, содержащим гадолиний (0.35%wt)
- Считывание света с помощью ФЭУ (группами по 50 стрипов) и SiPM (каждый стрип)
- SiPM: 18.9 ф.э./МэВ & 0.37 X-talk
- ФЭУ: 15.3 ф.э./МэВ
- 2500 стрипов = 1 м³ чувствительного объёма

- Многослойная пассивная защита: медная рама ~5 см, борированный полиэтилен 8 см, свинец 5 см, борированный полиэтилен 8 см
- Двухслойная активная защита с 5 сторон (БЕТО)
- Специально разработанный DAQ на основе WFD
- Всего 46 64-канальных WFD-модулей (12 бит, 125 МГц)
- Триггер по цифровой сумме сигналов ФЭУ или БЕТО
- Индивидуальная непрерывная оцифровка шумовых сигналов SiPM

JINST 11 (2016) no.11, P11011

ДАНСС – 7 лет работы с апреля 2016 по август 2023: записано 1858 дней включённого реактора и 122 дня выключенного. 8.1 млн. событий ОБР



Плановая остановка реактора

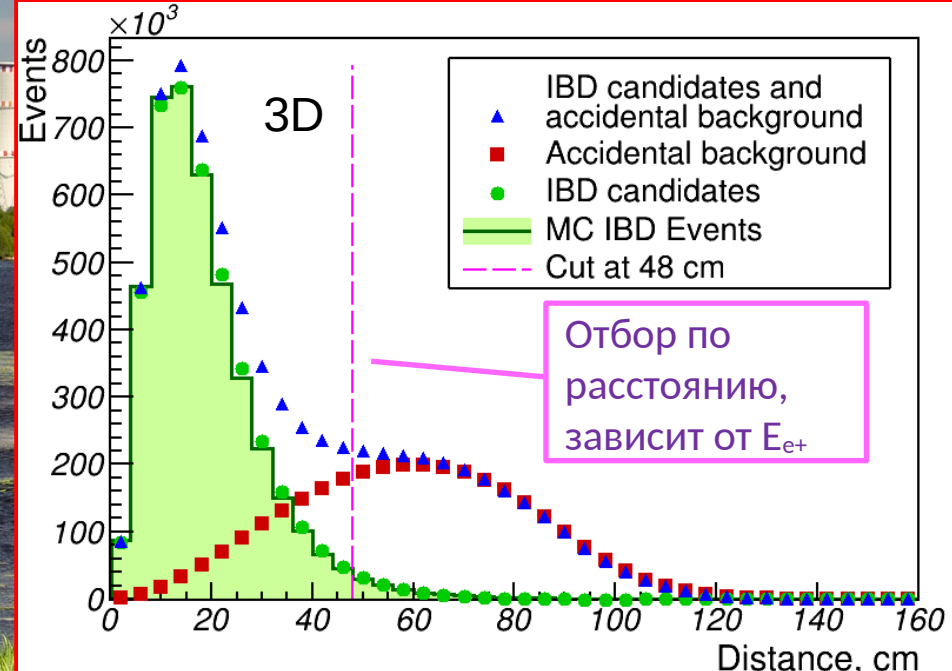
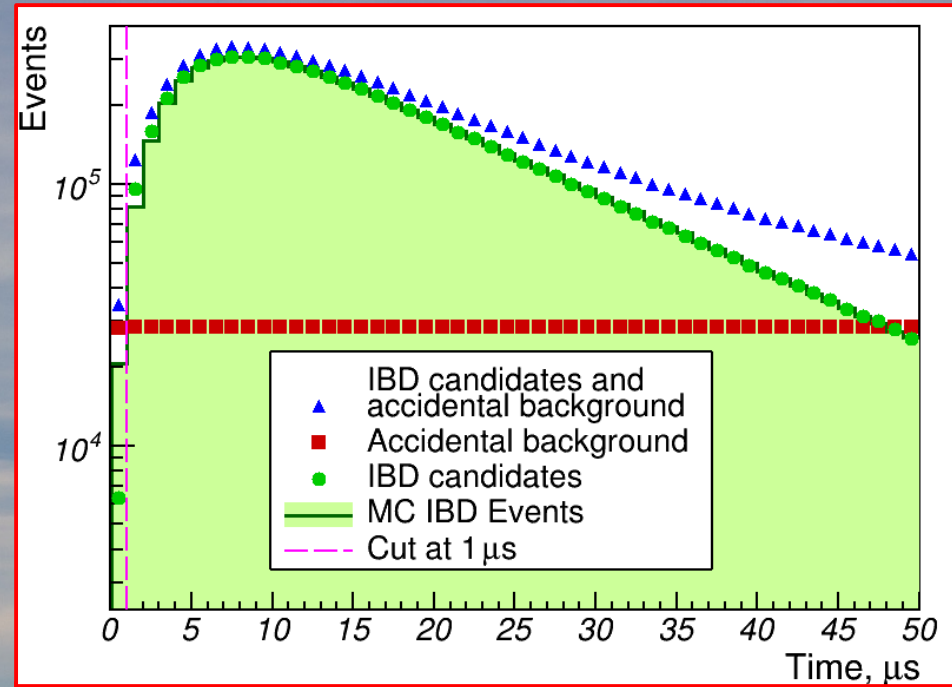
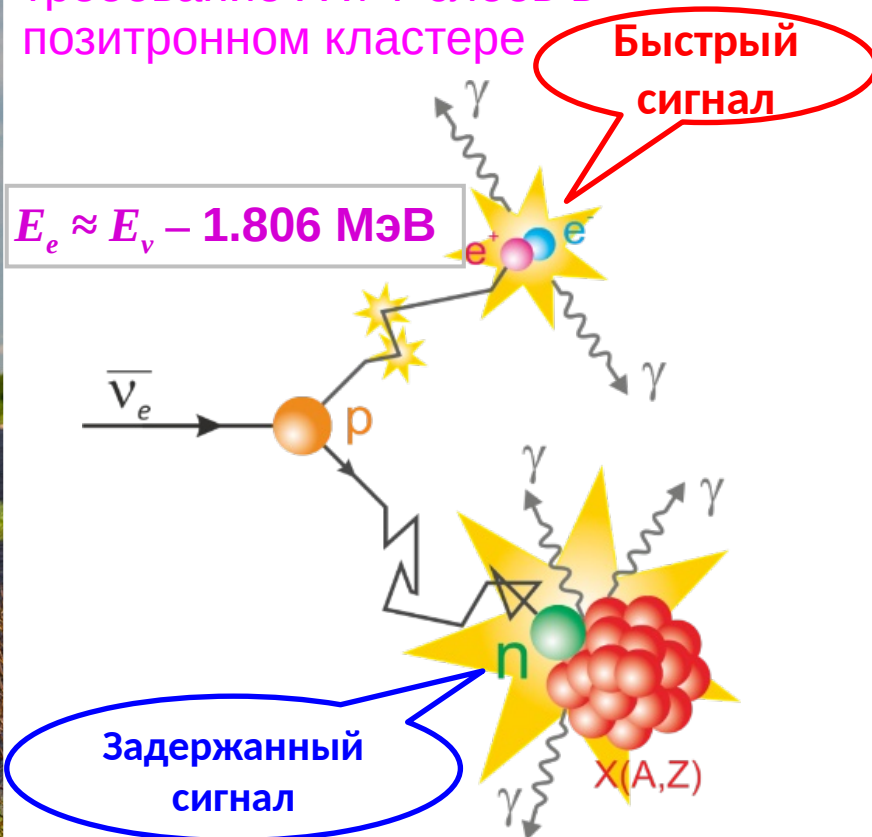
Игорь Алексеев от коллаборации ДАНСС

Выделение событий ОБР

Быстрое (позитронный кандидат) и задержанное (нейтронный кандидат) события:

- $1 \text{ мкс} < \Delta t < 50 \text{ мкс}$
- $L < L_{\text{max}}$ (зависит от энергии позитрона)

В настоящем анализе добавлено требование X и Y слоёв в позитронном кластере



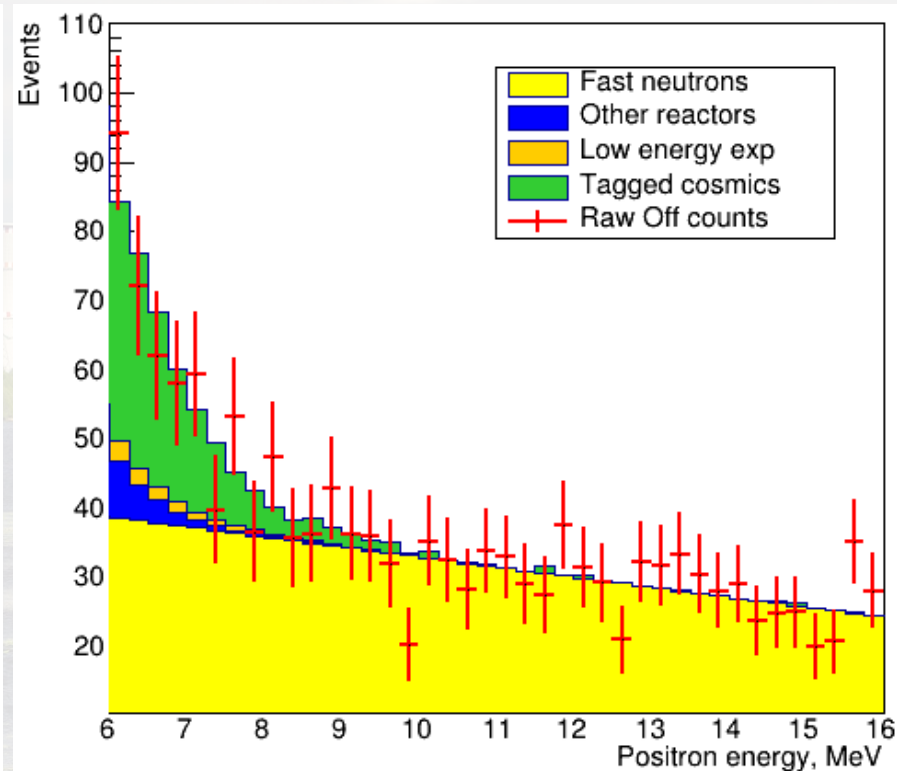
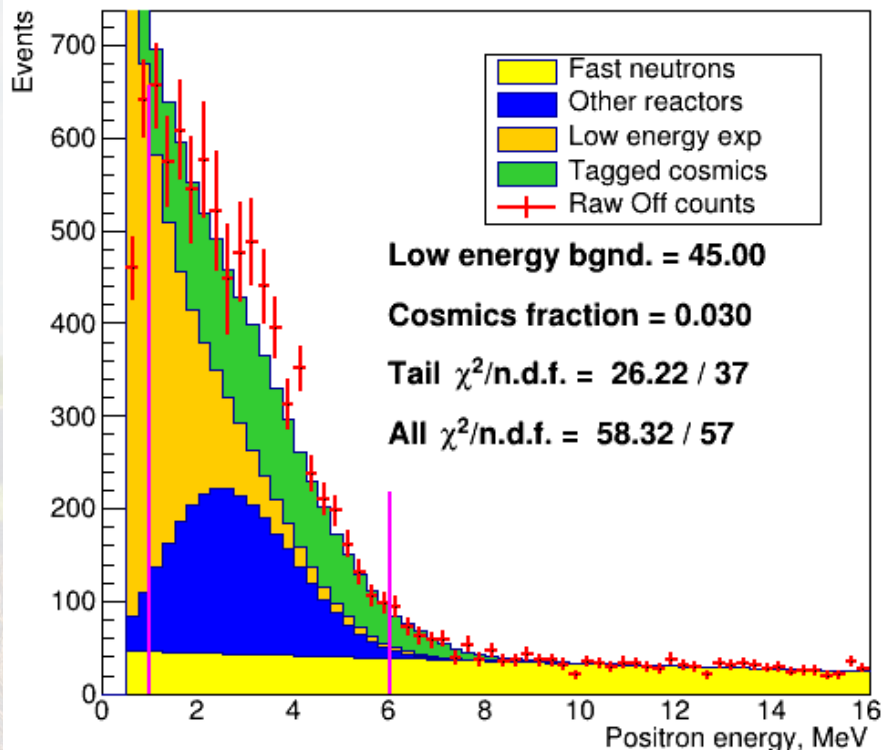
Вычитание фона на выключенном реакторе

Фон быстрых нейтронов — аппроксимация прямой по диапазону 11-16 МэВ.

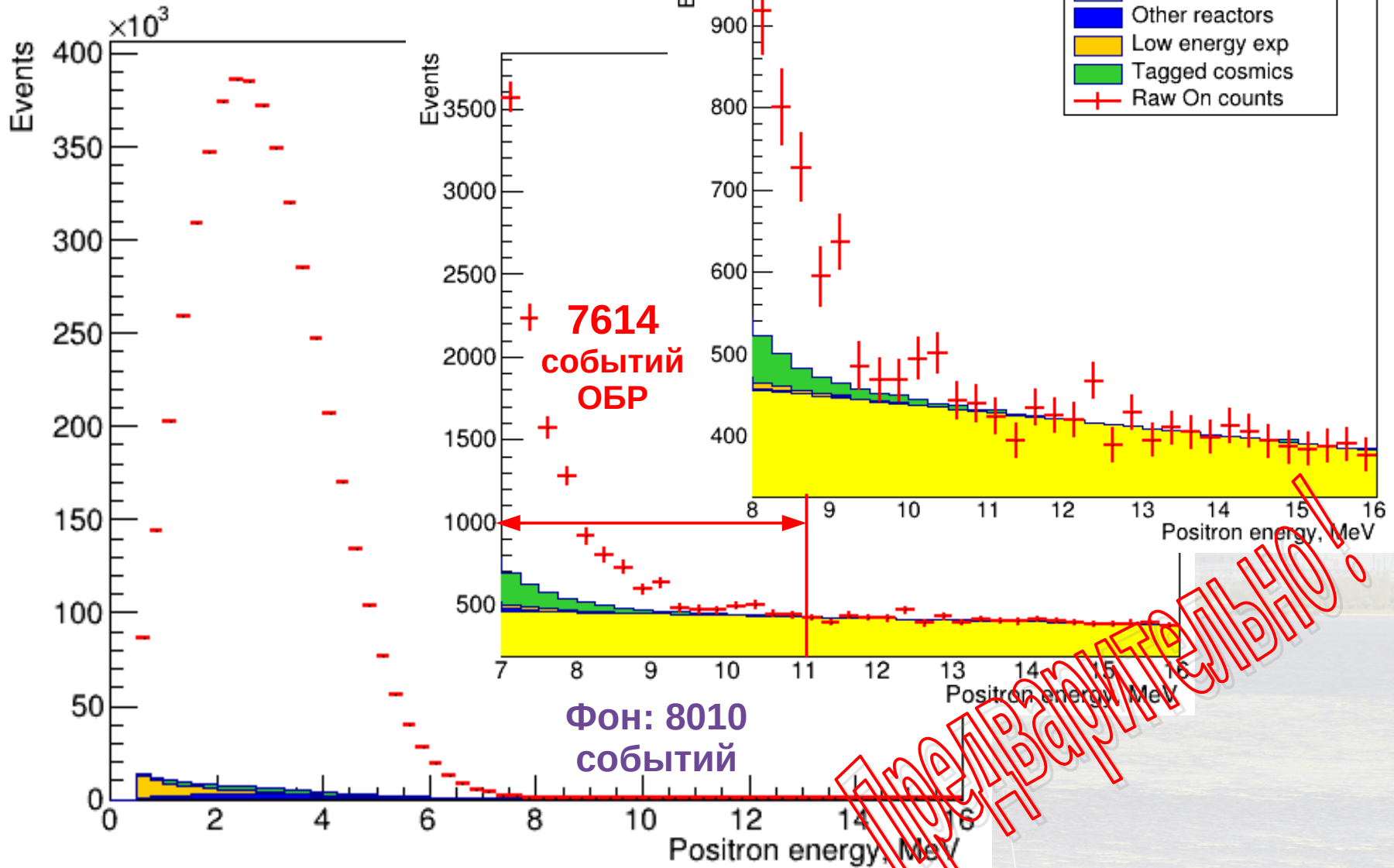
Нейтрино от соседних реакторов — 0.6 % от счёта в ближнем положении при включённом реакторе (в соответствии с $1/R^2$).

Фон от пропущенных ВЕТО атмосферных мюонов — подгоняем по выключенному реактору по части спектра больше 6 МэВ.

Остаточный фон при малых энергиях — аппроксимация экспонентой $e^{-(E/1.0 \text{ МэВ})}$. Вес оптимизирован по выключенному реактору. Мал в области больших энергий.

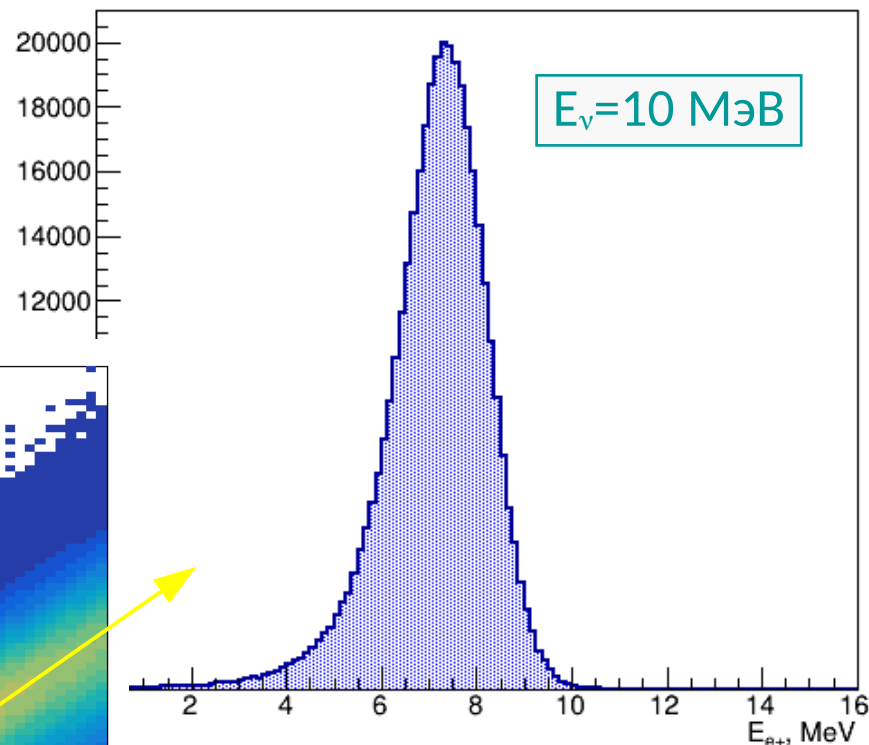
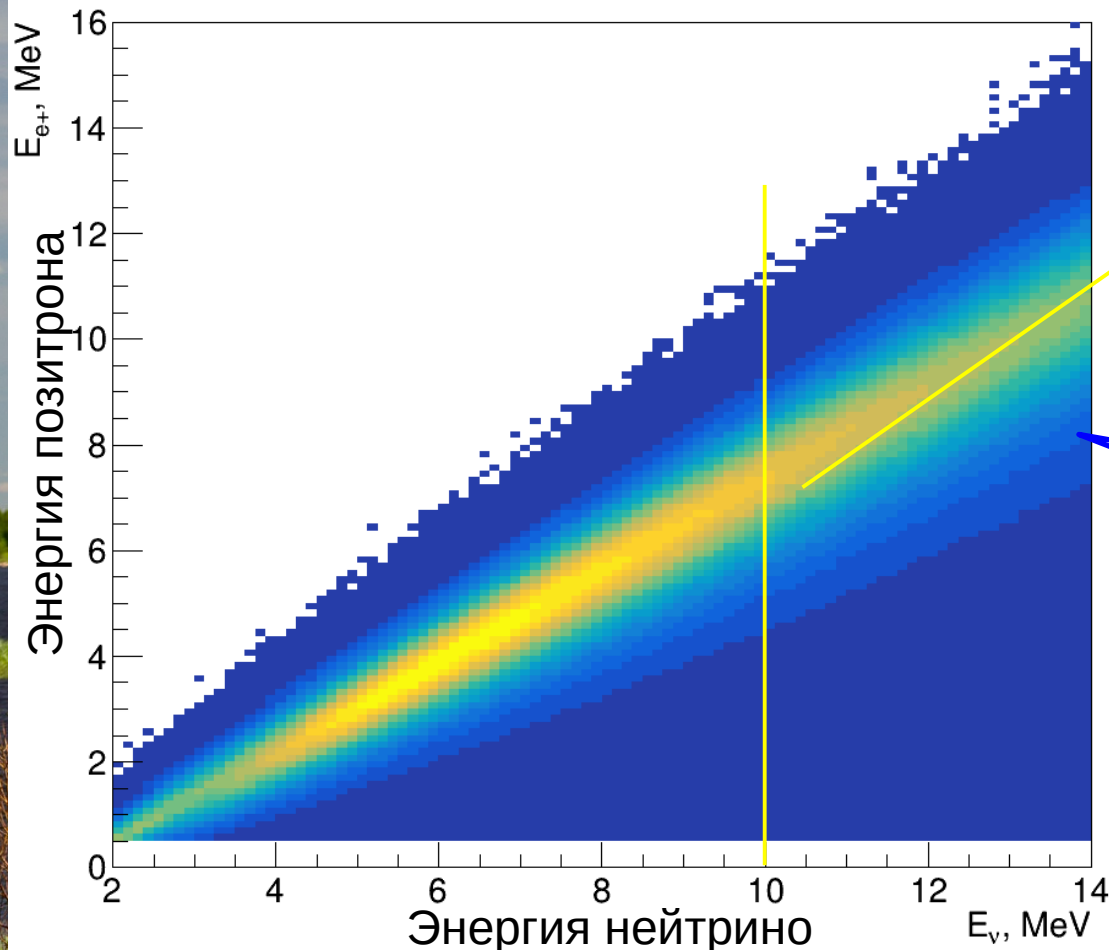


Спектр позитронов



Монте-Карло моделирование

Разыгран равномерный спектр
нейтрино от 1.81 до 14 МэВ,
80 млн. событий



Матрица отклика
установки **M**

$$S_{e^+} = M \cdot S_\nu$$

Попытка аппроксимации спектра

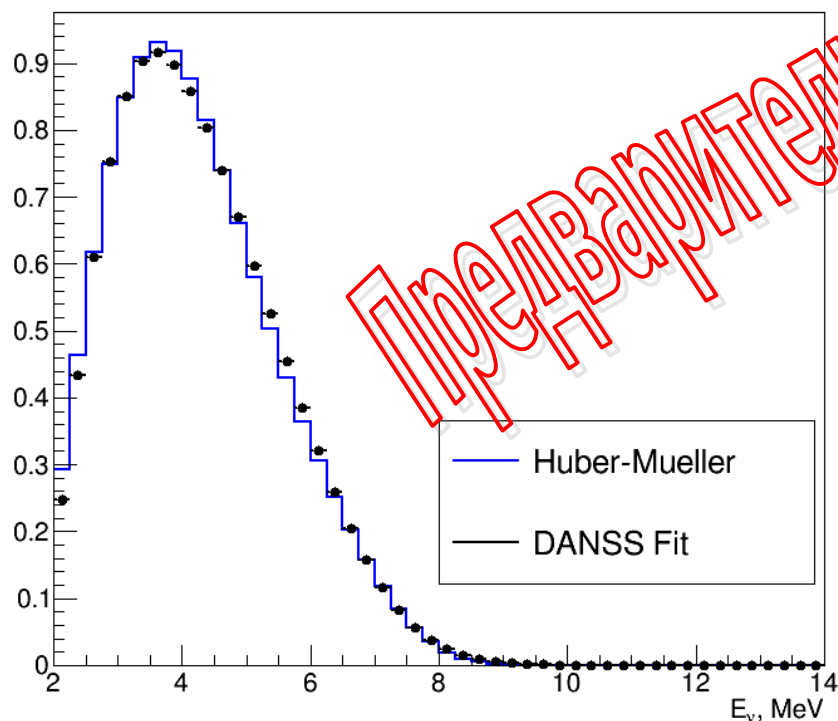
Аналогично аппроксимации Huber-Mueller :

Phys. Rev. C 83, 054615
Phys. Rev. C 84, 024617

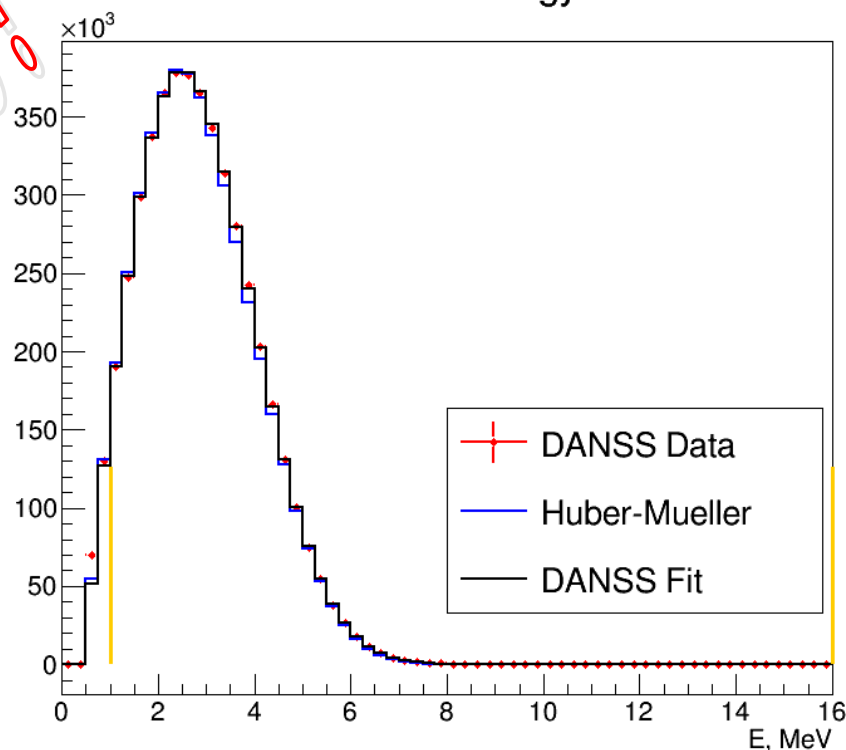
$$S_\nu(E) = \sigma_{IBD}(E) e^{\text{pol5}(E)} \quad S_{e^+}^{\text{pred}} = \mathbf{M} \cdot S_\nu$$

$$\chi^2 = \sum ((S_i^{\text{pred}}_{e^+} - S_i^{\text{meas}}_{e^+}) / \sigma_i)^2$$

Neutrino energy



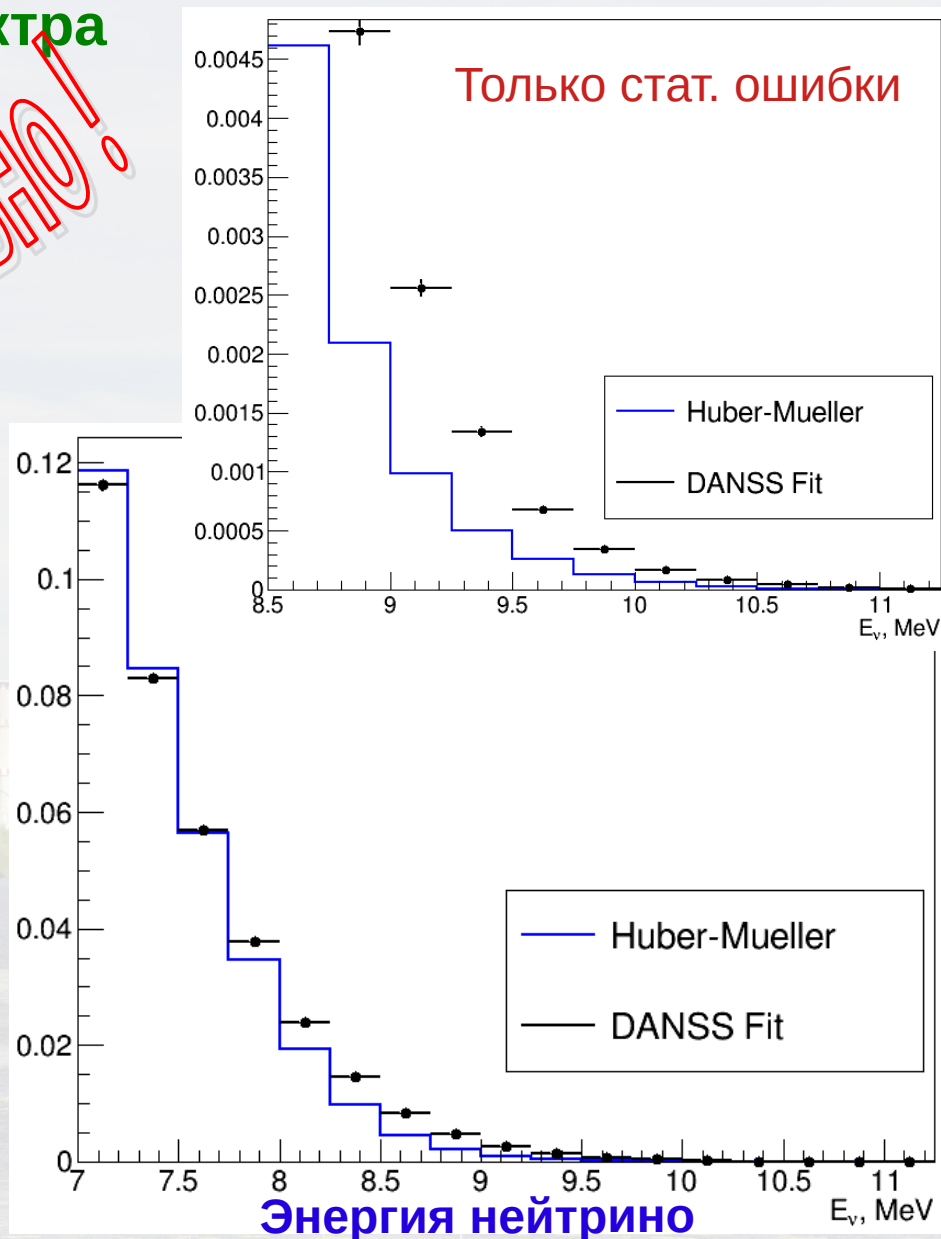
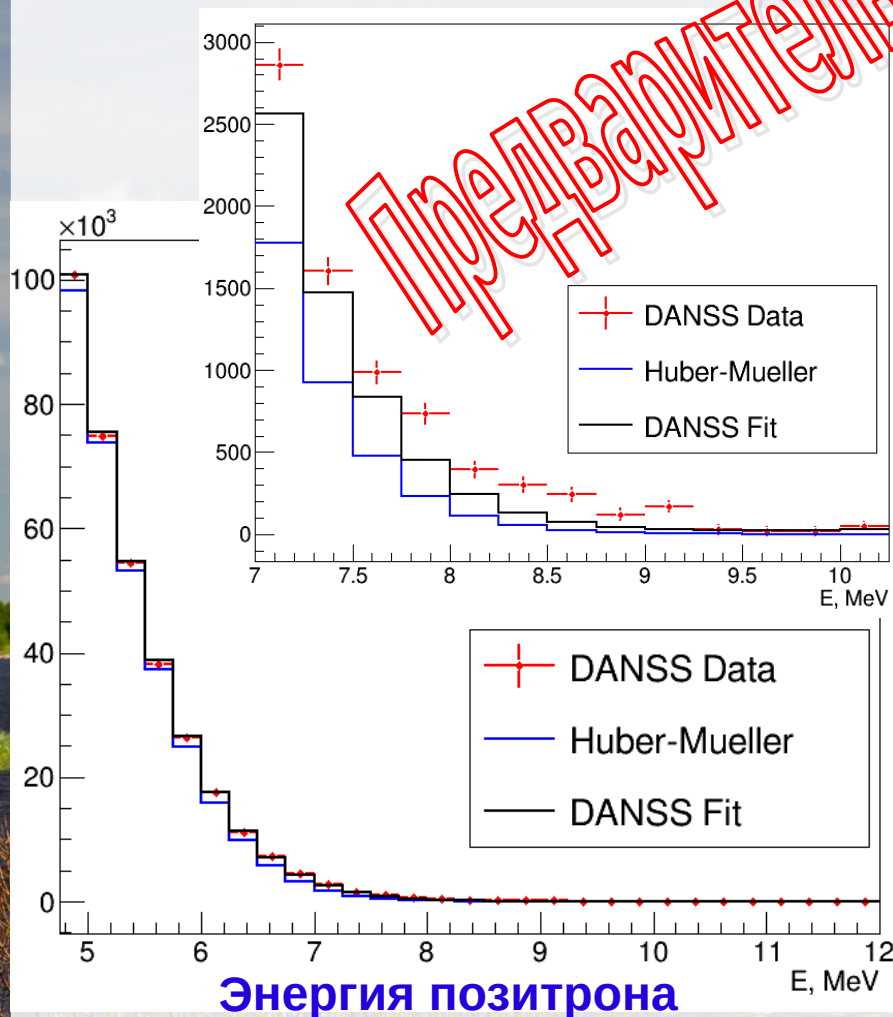
Positron energy



Постер Н. Машина: Восстановление спектра методом SVD

Высокоэнергичная часть спектра

Предварительно!



- В эксперименте ДАНСС зарегистрировано 7614 ± 205 событий ОБР в диапазоне $E_{e^+} = 7-11$ МэВ.
- Наблюдается избыток событий по сравнению с ожиданиями при использовании экстраполяции в высокие энергии модели Huber-Mueller.
- Дальнейшие планы включают анализ систематических ошибок, учёт абсолютной нормировки, продолжение работы по восстановлению спектра нейтрино, сравнение с SM2018.



DANSS

Спасибо!

Грант РФФИ <https://rscf.ru/project/23-12-00085/>

Игорь Алексеев от коллаборации ДАНСС

Inverse Beta-Decay (IBD)



H. Bethe and R. Peierls 1934.
F. Reines and C. L. Cowan 1953-56

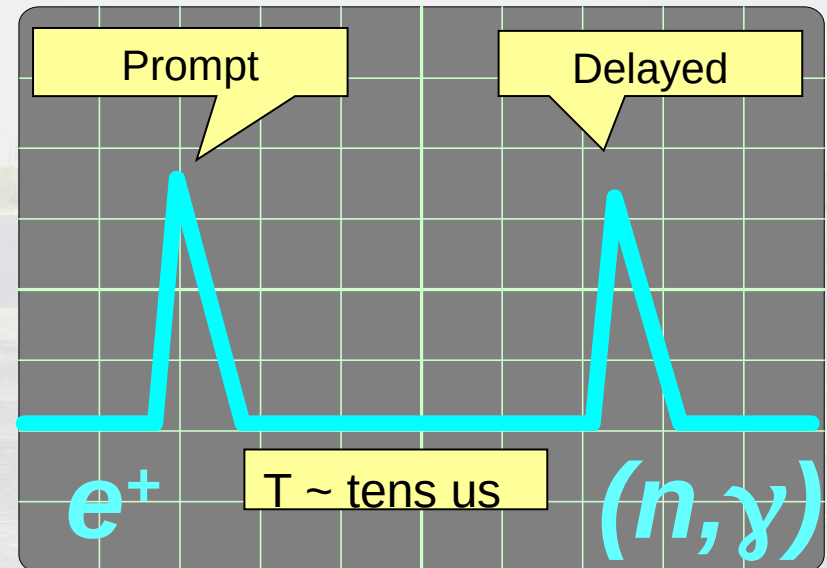
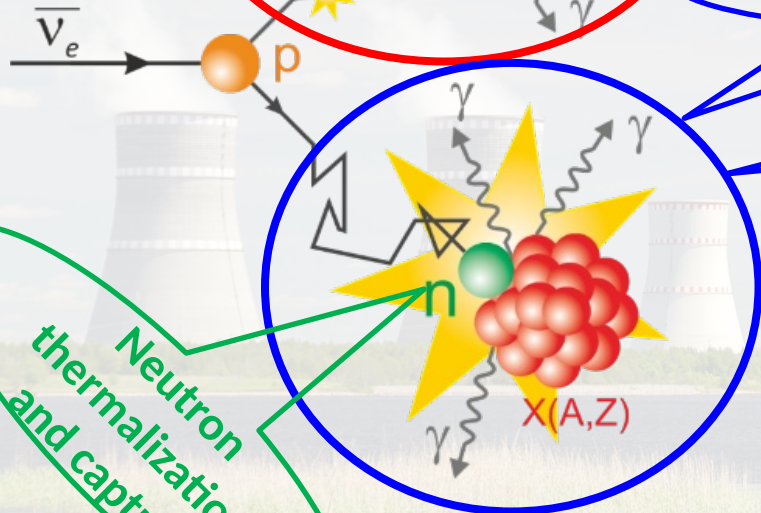
Continuous ionization cluster

Fast (prompt) signal

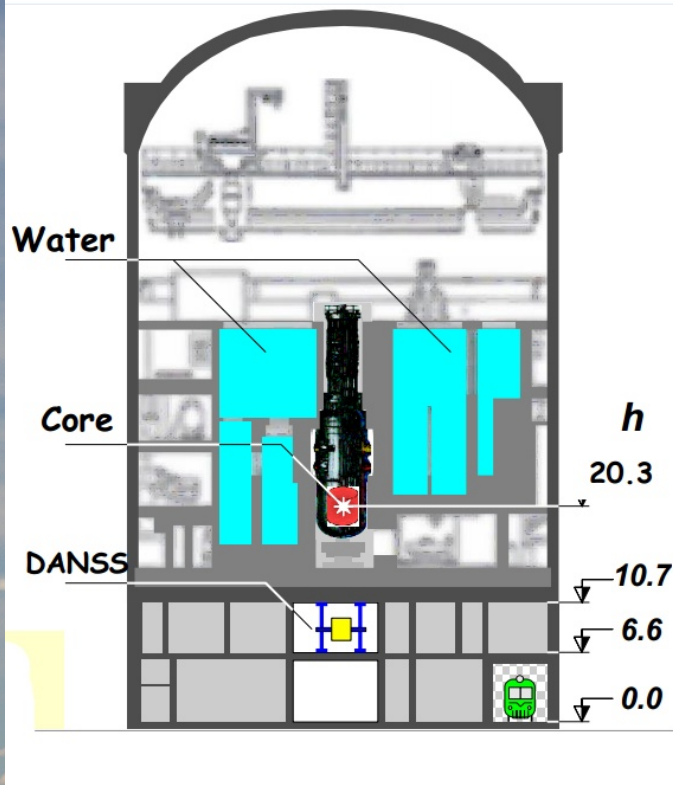
$$E_e \approx E_\nu - 1806 \text{ MeV}$$

Delayed signal

Gamma flush in the whole detector



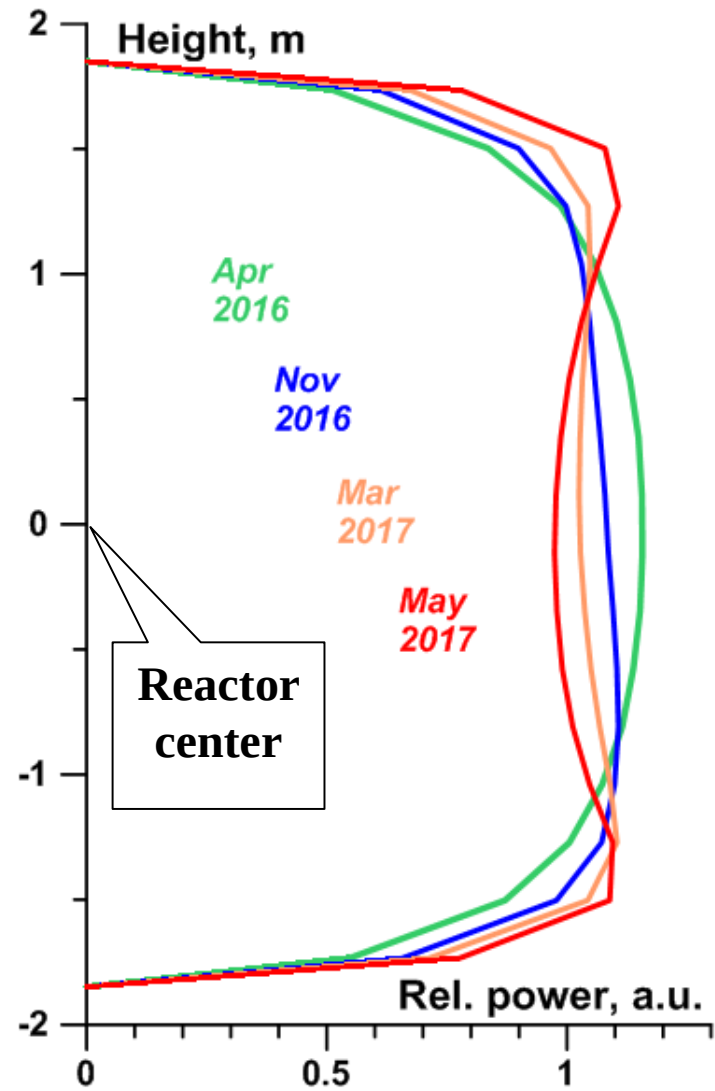
Reactor WWER1000



Fuel contribution during the campaigns

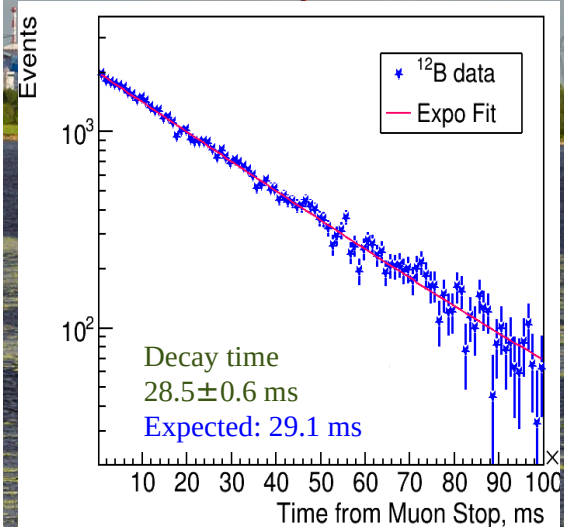
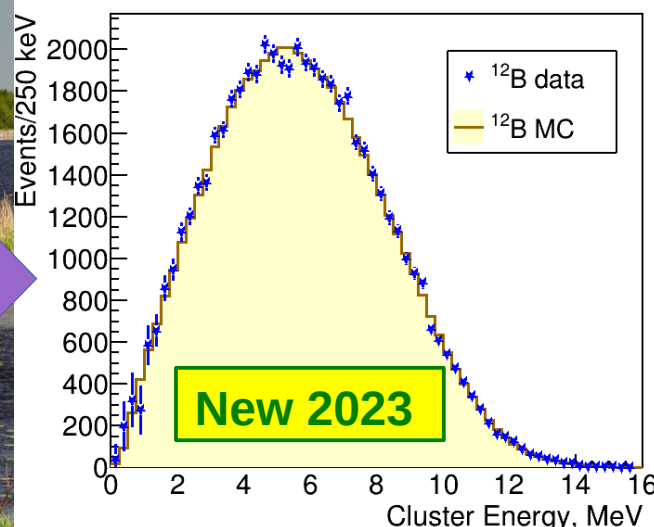
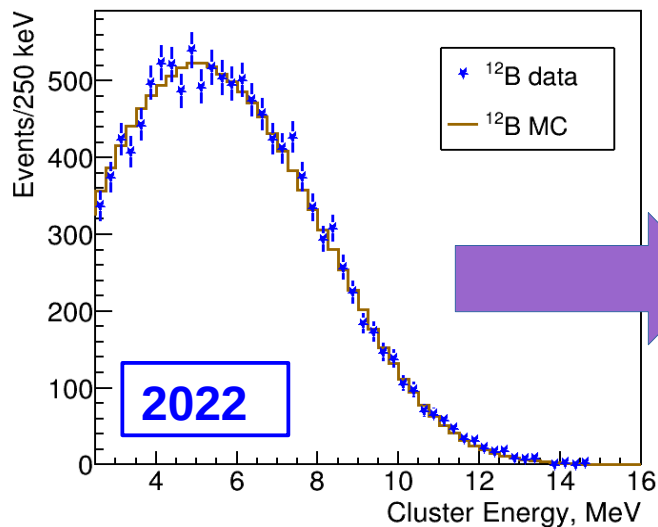
	Begin 4	End 4	Begin 5	End 5	Begin 6	End 6	Begin 7
²³⁵ U	63.5%	44.1%	65.8%	43.9%	66.3%	45.6%	68.7%
²³⁸ U	6.7%	7.8%	6.9%	7.8%	6.5%	7.3%	6.7%
²³⁹ Pu	26.7%	39.3%	24.9%	39.4%	24.8%	38.6%	22.8
²⁴¹ Pu	2.7%	8.6%	2.2%	8.6%	2.3%	8.6%	1.7%

Reactor vertical burning profile for 100% power during the campaign



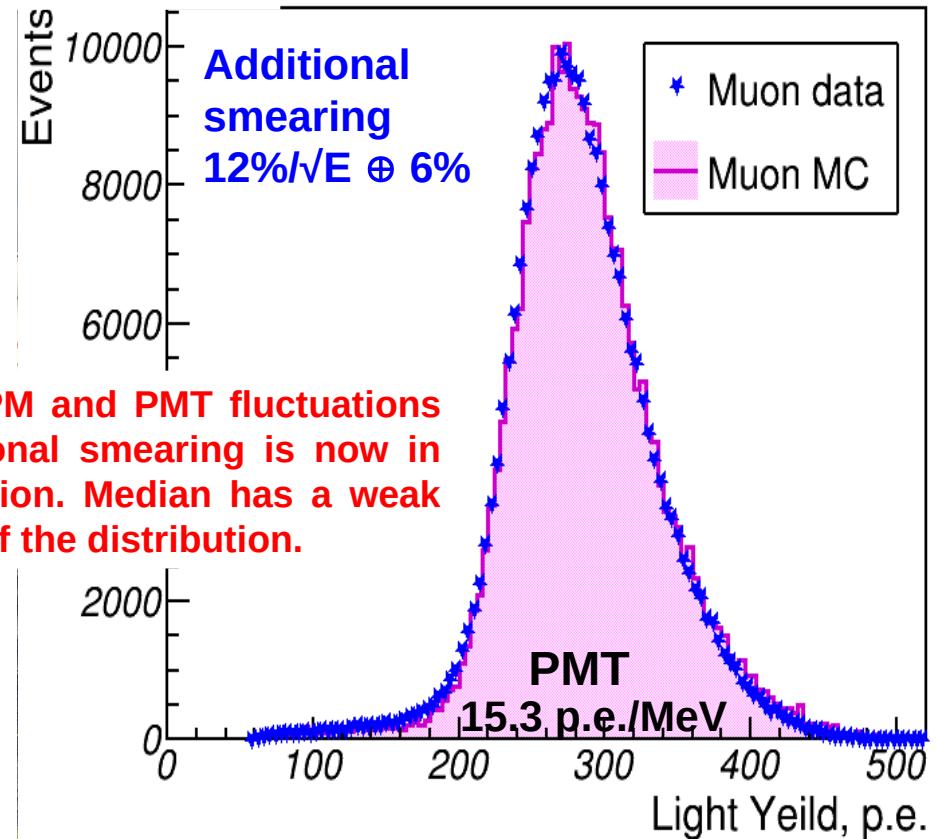
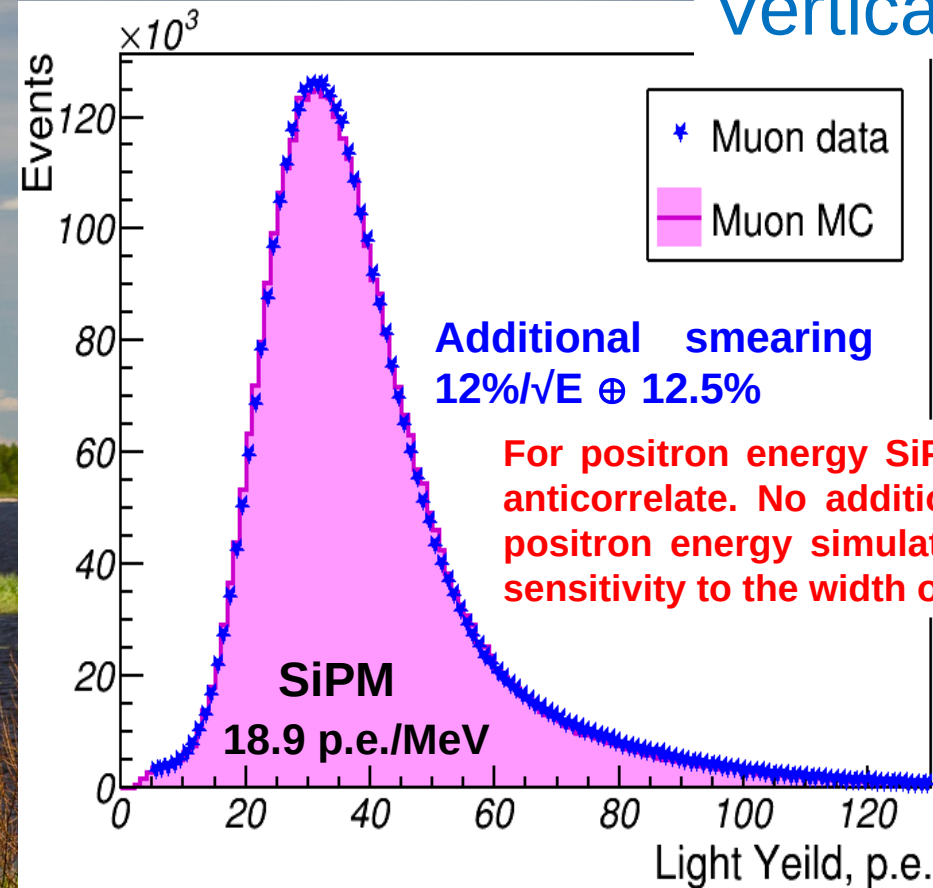
- Initial calibration is done by cosmic muons using median of the distribution. SiPM gain and X-talks are calibrated every 30-40 min. Scale for all photo-sensors is calibrated every 2 days.
- MC uses individual light yields for each SiPM and PMT channel.
- Final energy scale is fixed by ^{12}B -decay, which is similar to e^+ signal we measure. Two independent ^{12}B samples from spallation neutrons and muon capture agree within $\pm 0.2\%$. **[We measure the positron energy, not the total prompt event energy].**
- Calibration check is done using ^{22}Na , ^{60}Co , ^{248}Cm (neutrons) sources and neutrons from IBD events.
- Everything with exception of ^{22}Na agree better than $\pm 0.2\%$. Nevertheless we keep energy scale uncertainty estimation at 2% level and add it to the systematical error.

$^{12}\text{B}(\mu^{12}\text{C})$

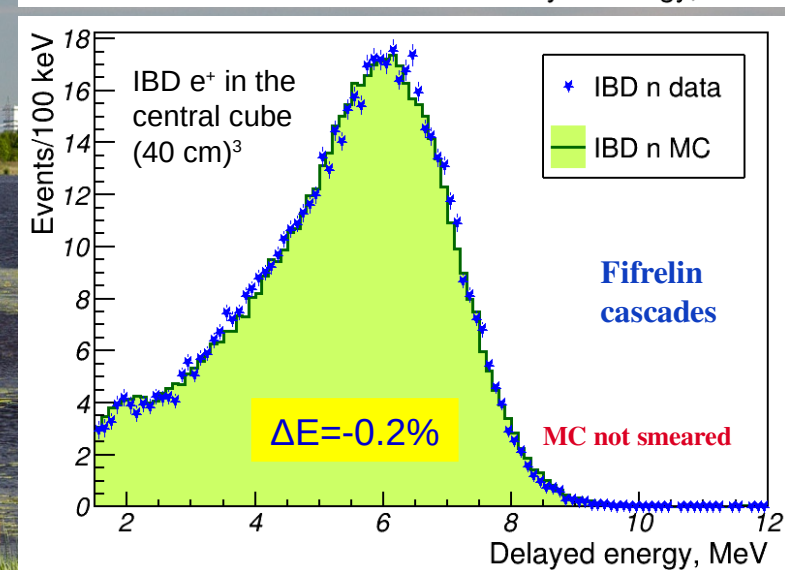
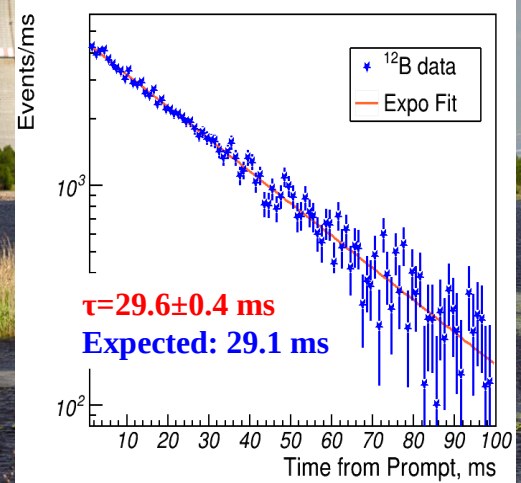
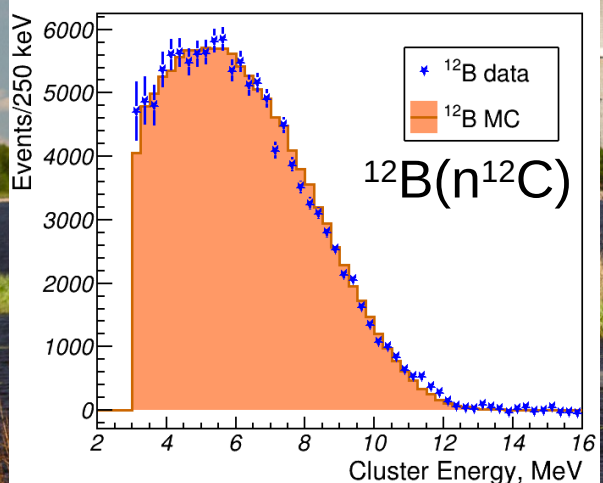
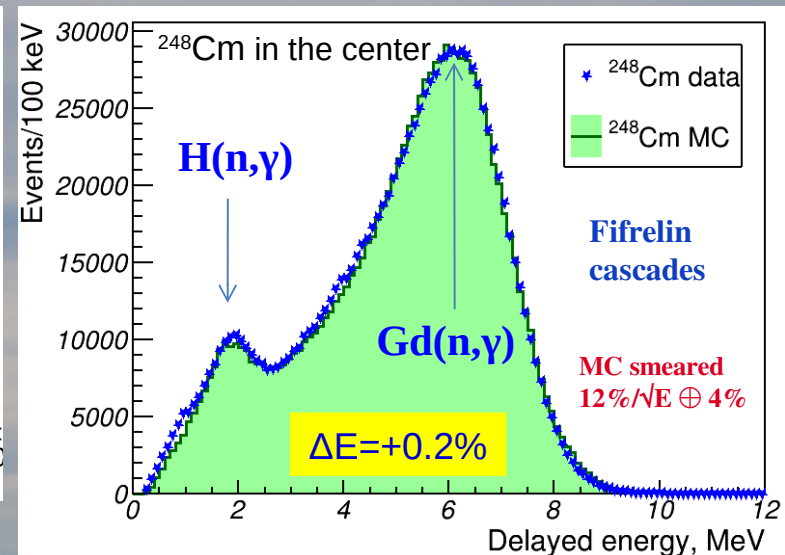
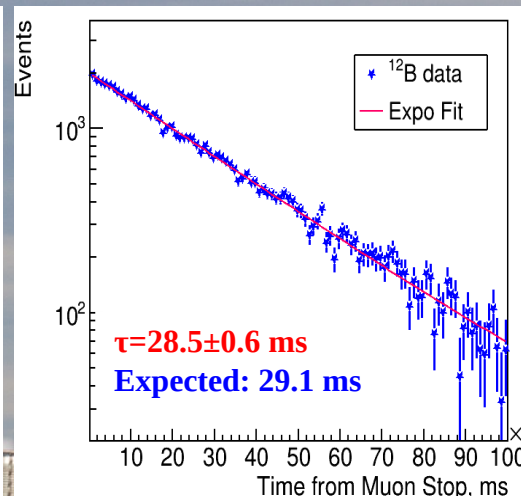
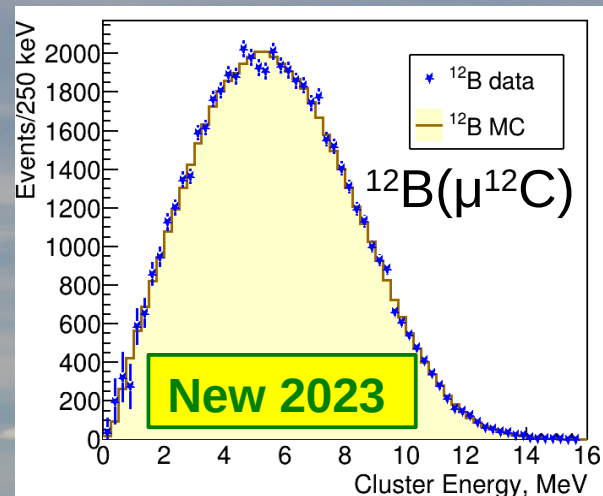


- Initial calibration is done by cosmic muons using median of the distribution. SiPM gain and X-talks are calibrated every 30-40 min. Scale for all photo-sensors is calibrated every 2 days.
- MC uses individual light yields for each SiPM and PMT channel.
- Final energy scale is fixed by ^{12}B -decay, which is similar to e^+ signal we measure. [We measure the positron energy, not the total prompt event energy].
- We keep energy scale uncertainty estimation at 2% level and add it to the systematical error.

Vertical muons

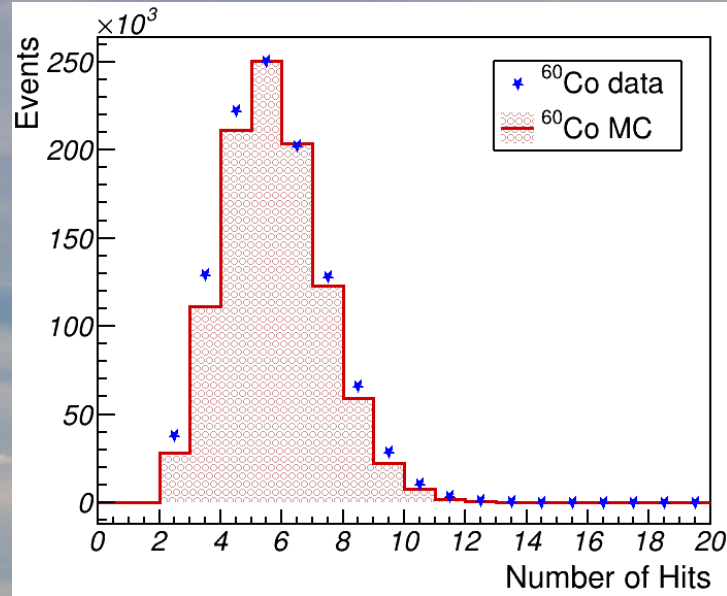
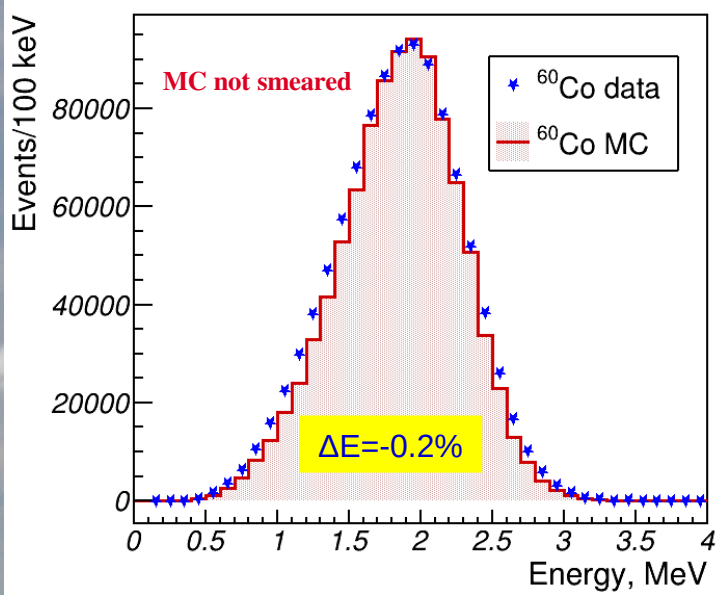


Calibration

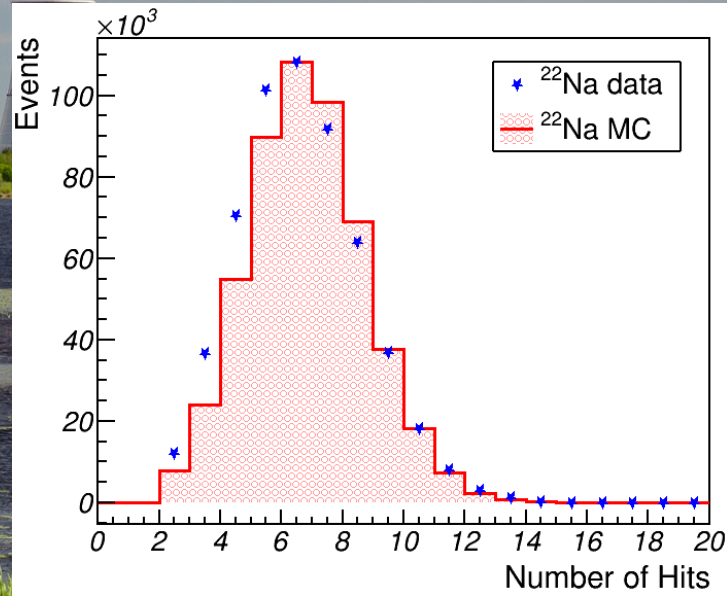
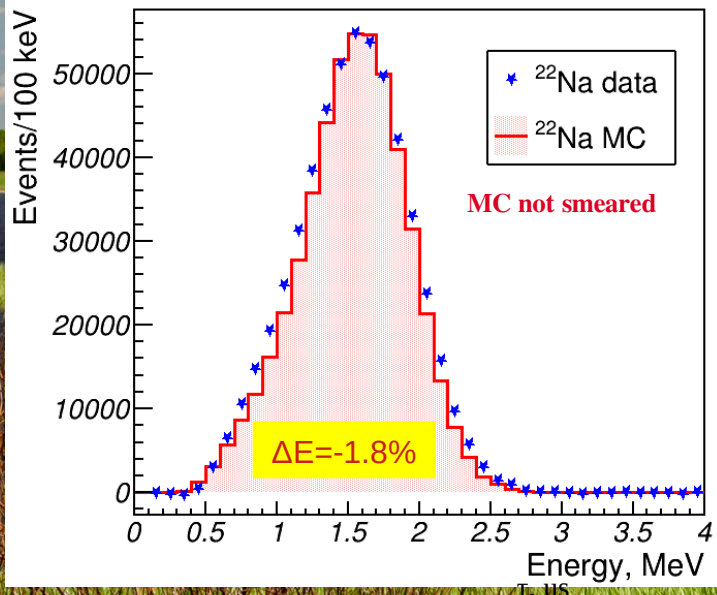


Calibration

⁶⁰Co in the center

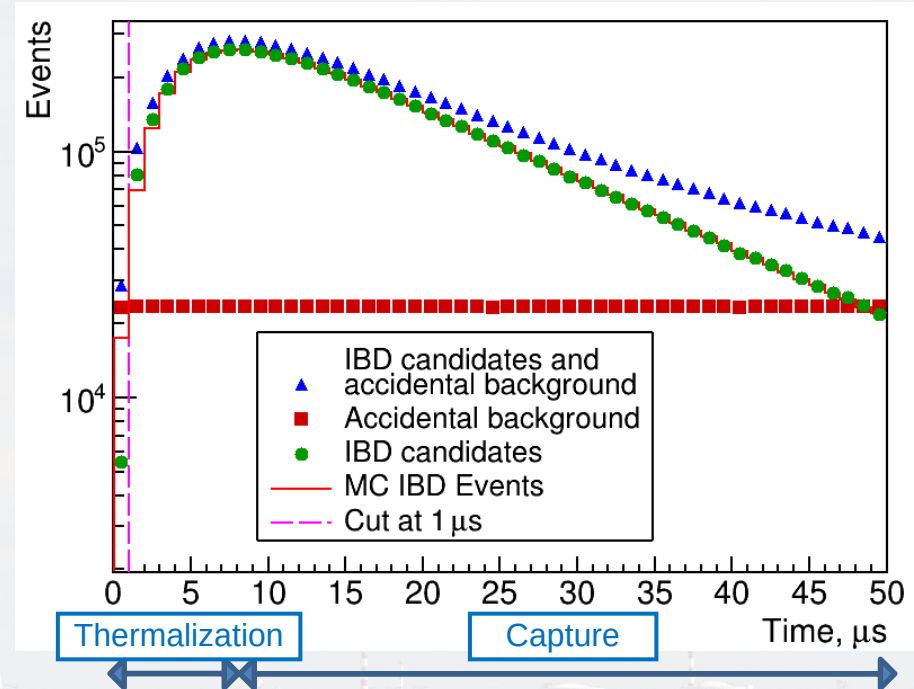


²²Na in the center



Trigger and events

- Trigger = digital sum of PMT > 0.5 MeV or VETO
 - Total trigger rate ≈ 1.1 kHz
 - Veto rate ≈ 400 Hz
 - True muon rate ≈ 180 Hz
 - Positron candidate rate ≈ 170 Hz
 - Neutron candidate rate ≈ 30 Hz
 - IBD rate ~ 0.1 Hz
- IBD event = two time separated triggers:
 - Positron track and annihilation
 - Neutron capture by gadolinium
- SiPM noise cut:
 - Time window ± 10 ns
 - SiPM hits require PMT confirmation



Building Pairs

Positron candidate: > 0.5 MeV in continuous ionization cluster (PMT+SiPM)

Neutron candidate: > 1.5 MeV total energy (PMT+SiPM), hit multiplicity ≥ 3

Search positron 50 μs backwards from neutron

Significant background by uncorrelated triggers. Subtract accidental background events: search for a positron candidate where it can not be present – 50 μs intervals 5, 10, 15 ms etc. away from neutron candidate. Use 16 non-overlapping intervals to reduce statistical error. All physics distributions = events - accidental events/16

Analysis cuts

Cuts – suppress accidental and muon induced backgrounds:

Fiducial volume - positron cluster position: 4 cm from all edges

Positron cluster has < 8 strips

Energy in the prompt event beyond the cluster < 1.2 MeV and there are < 12 hits out of the cluster

Delayed event energy is < 9.5 MeV and number of hits is < 20

Positron (cluster) energy E_e dependent cuts on prompt to delayed cluster distance and delayed event energy:

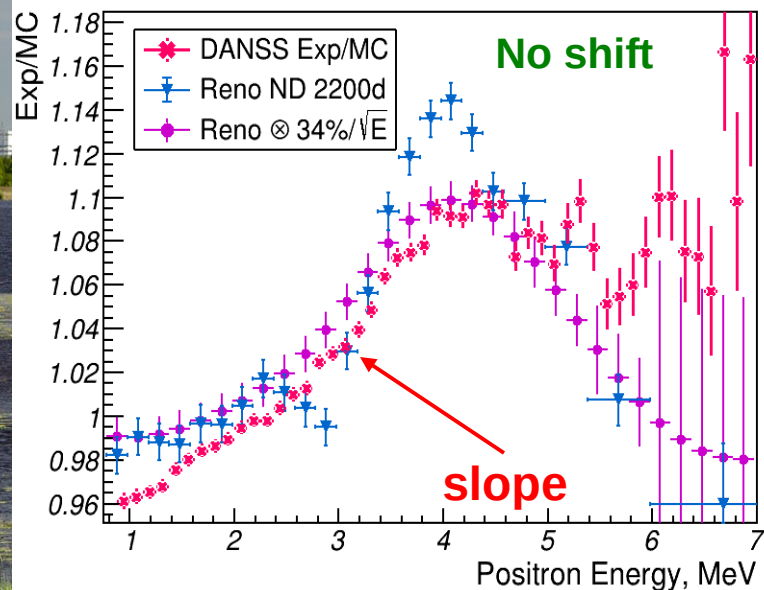
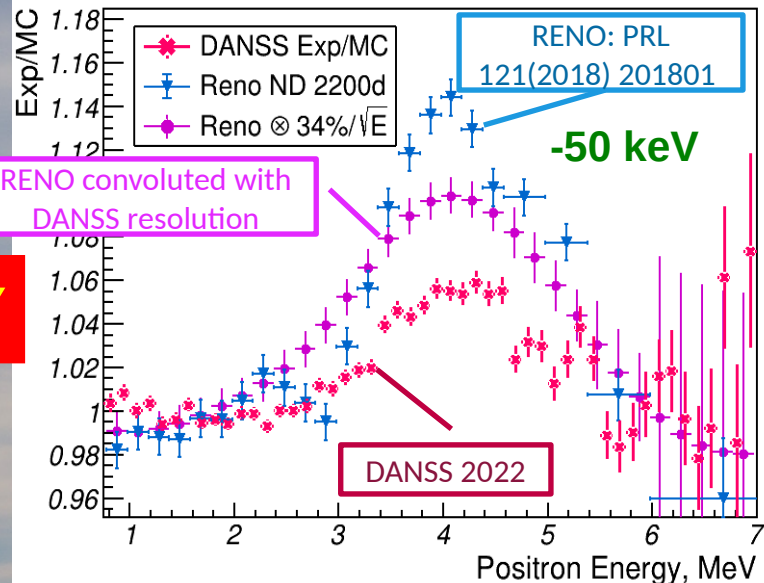
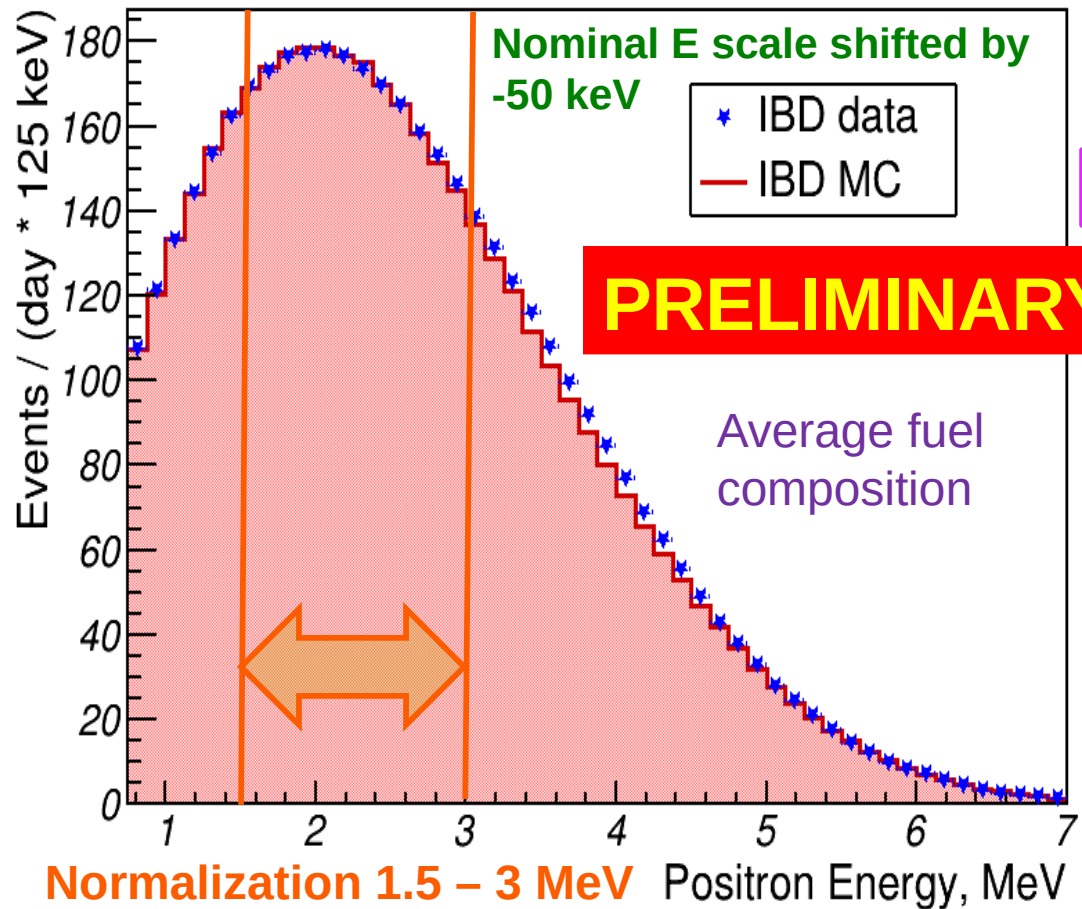
$$L_{2D}[cm] < 40 - 17 \cdot e^{-0.13 \cdot E_e^2}$$

$$L_{3D}[cm] < 48 - 17 \cdot e^{-0.13 \cdot E_e^2}$$

$$E_N[MeV] > 1.5 + 2.6 \cdot e^{-0.15 \cdot E_e^2}$$

For events with single hit positron cluster additional requirement of at least a hit out of the cluster and the energy beyond the cluster > 0.1 MeV

Positron spectrum comparison to H-M model



- New energy calibration
- Strong dependence on energy shift and scale
- Effect (if does exist) looks twice smaller than expected from other measurements

^9Li and ^8He background ~ 4 events per day

