

# Мониторинг ядерного реактора с помощью нейтрино в детекторе DANSS



Дмитрий Свирида от коллаборации ДАНСС



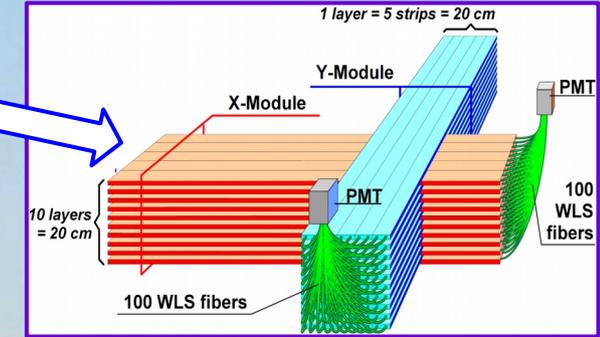
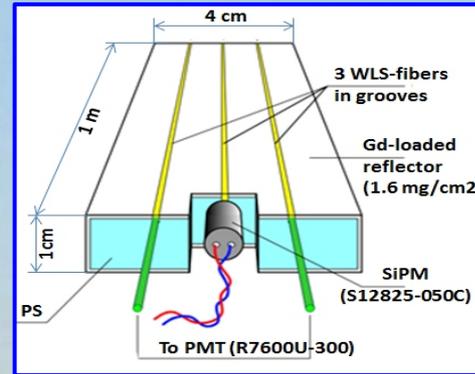
Сессия-конференция секции  
ядерной физики ОФН РАН,  
посвященная  
70-летию В.А. Рубакова



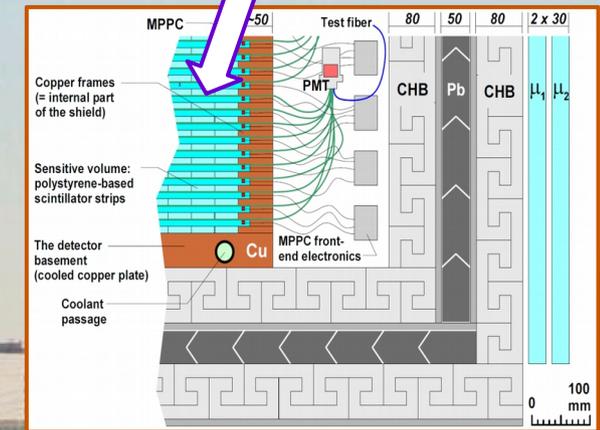
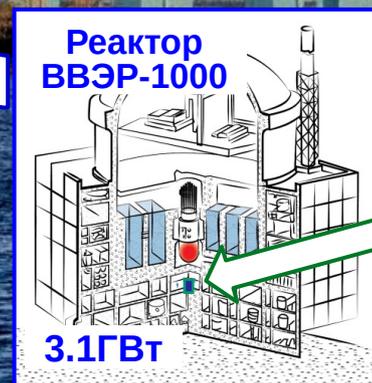
  
*Российская Академия Наук*  
7 – 21 февраля 2025  
Москва

# DANSS — Detector of reactor Anti-Neutrino based on Solid-state Scintillator

- Уникальное расположение**
- ✓ 10.9 – 12.9 m от центра АЗ
  - ✓ Экранировка космики 50 м.в.э.
  - ✓ Еженедельное перемещение
- Безопасность и сегментация**
- ✓ 1 м<sup>3</sup> сцинтилляционных стрипов из полистирола 10x40x1000 мм<sup>3</sup> с Gd-покрытием и светосбором по 3 спектросмещающим волокнам
  - ✓ 100 слоев с чередованием направления, 25 стрипов в слое
  - ✓ Среднее волокно – КФУ, 2500 каналов
  - ✓ Два крайних волокна от 50 стрипов одного направления – ФЭУ, 50 шт.
- Многослойная герметичная защита**
- ✓ Cu (5 см) + CHB (8 см) + Pb (5 см) + CHB (8 см) пассивная защита
  - ✓ 2-слойное  $\mu$ -вето на 5 сторонах
- Гибкая система DAQ**
- ✓ Оцифровщики формы сигнала 125 МГц

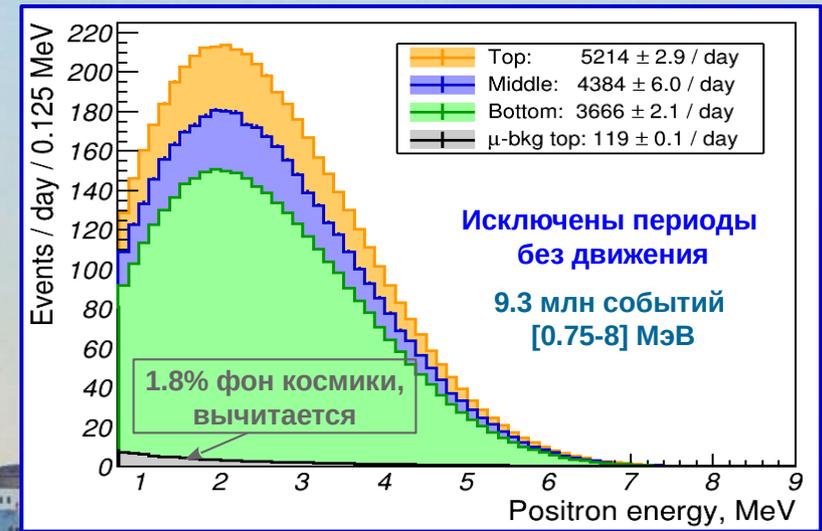
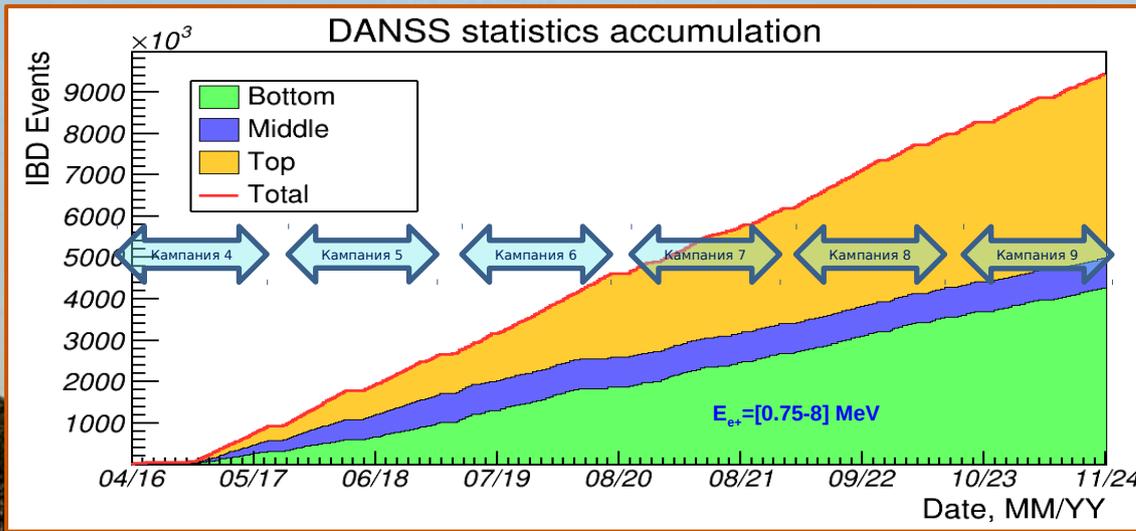


Калининская АЭС  
4 блок

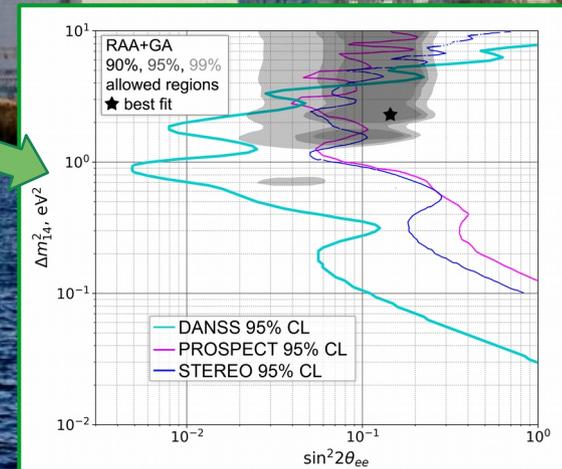


# Впереди Планеты Всей

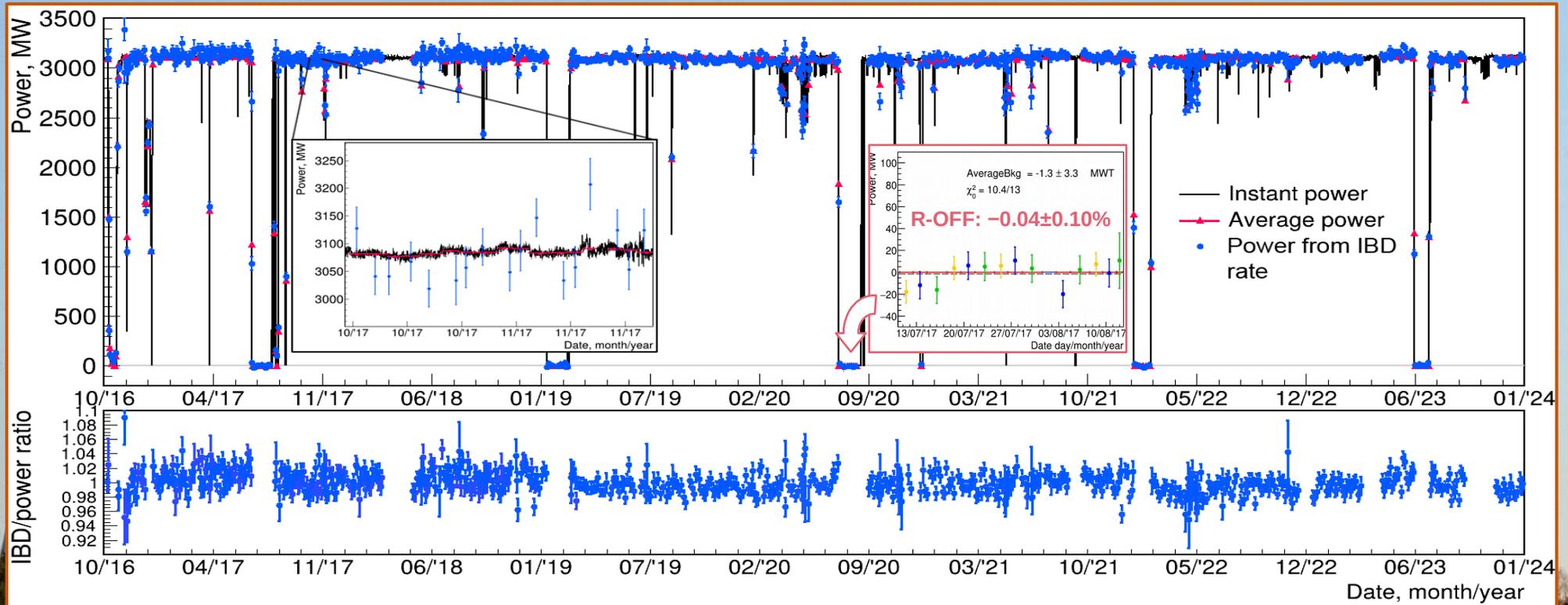
- ✓ **8.5 лет** исключительно стабильной и почти непрерывной работы,
- ✓ **9.3 млн.** нейтринных событий обработано
- ✓ **> 5000** событий/день в верхнем положении, **> 50:1** отношение сигнал/фон
- ✓ Старение пластика **0.55%** в год **JINST 19 (2024) P04031**
- ✓ Изменения абсолютной эффективности известны лучше **1%** за более, чем 8 лет
- ✓ **5** полных топливных кампаний, **6** периодов выключения



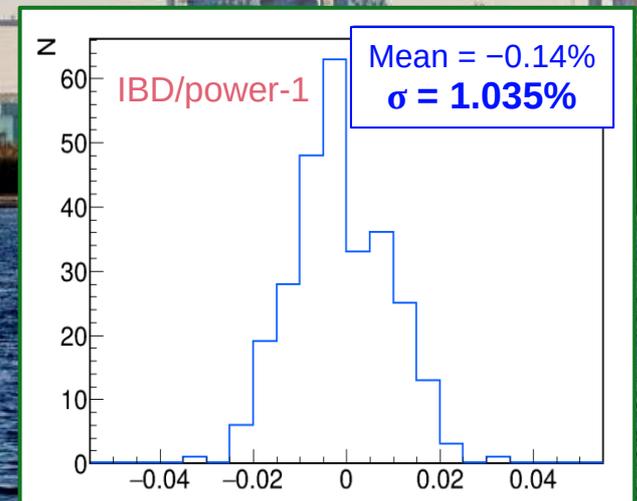
- ✓ **Серьезные фундаментальные достижения** — поиск стерильного нейтрино и другое:  
Н.Скрובהва **21 февраля 13:45**  
(Нейтрино)
- ✓ **О модернизации:**  
М.Ширченко **21 февраля 16:30**  
(Детекторы)



# Мониторирование Мощности Реактора

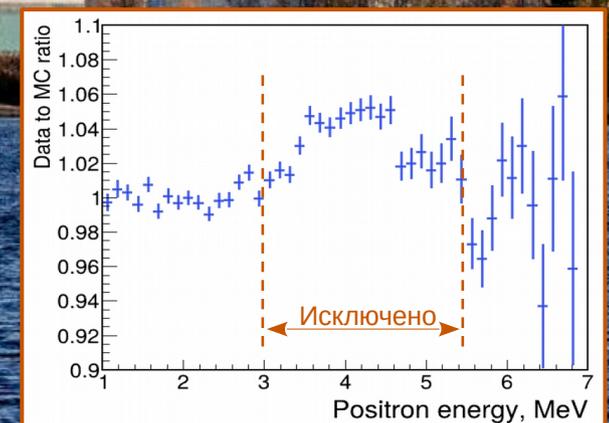
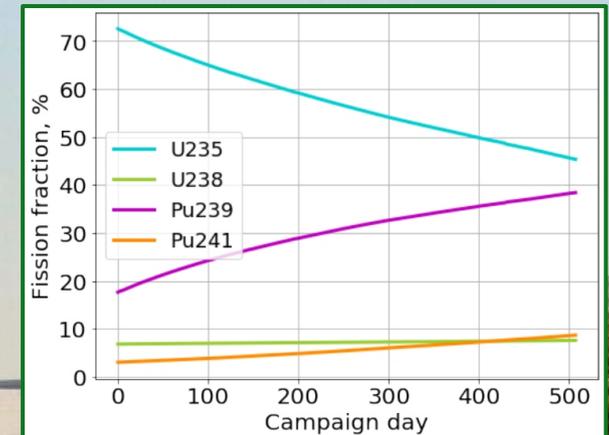
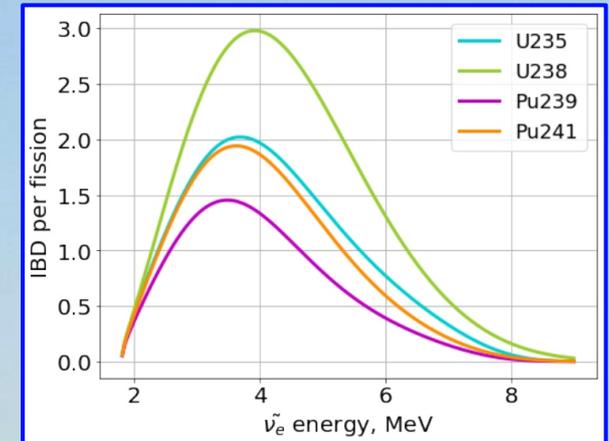


- ✓ **Коррекции счета ОБР:**
  - ✓ Изменение состава топлива по Н-М
  - ✓ Эффективность регистрации (карта каналов)
  - ✓ Мертвое время (изолирующие каты)
  - ✓ Соседние реакторы  $\sim 0.6\%$
- ✓ Единая нормировка по 1 месяцу (10.2016)
- ✓ Несущественное смещение  $0.14\%$  за 8 лет
- ✓ Стат. точность недельного измерения  $0.66\%$
- ✓ Фактический разброс  $1.04\%$
- ✓ Систематика ДАНСС+реакторные измерения  $0.8\%$  -- оценки АЭС: не лучше  $1\%$

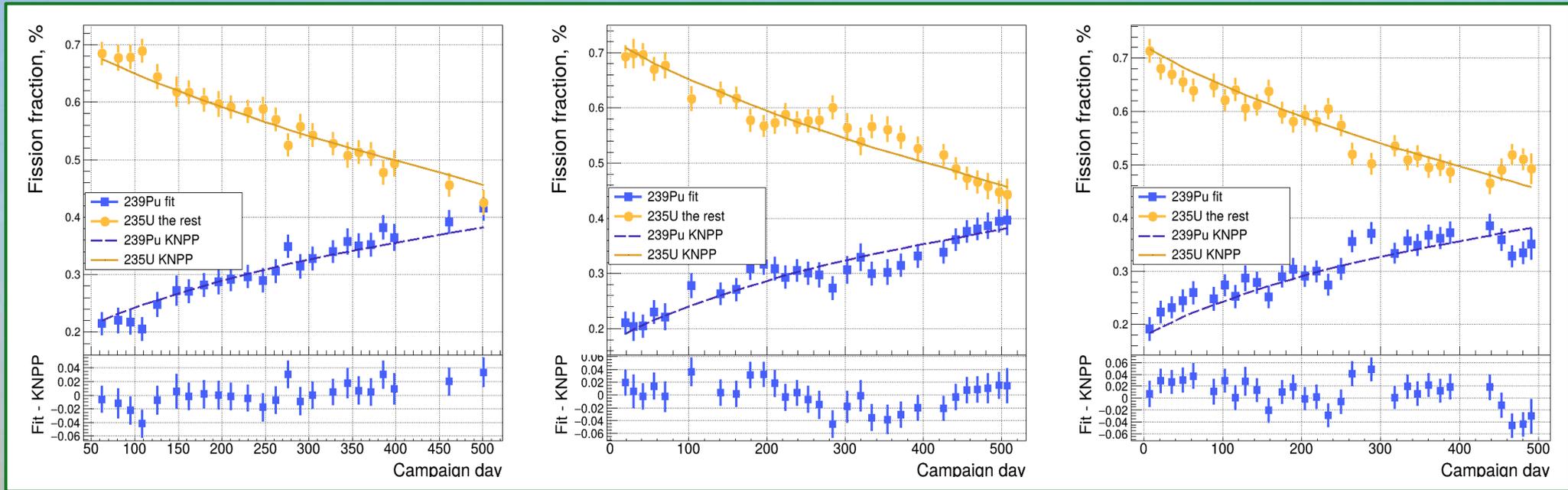


# Определение Долей Делений

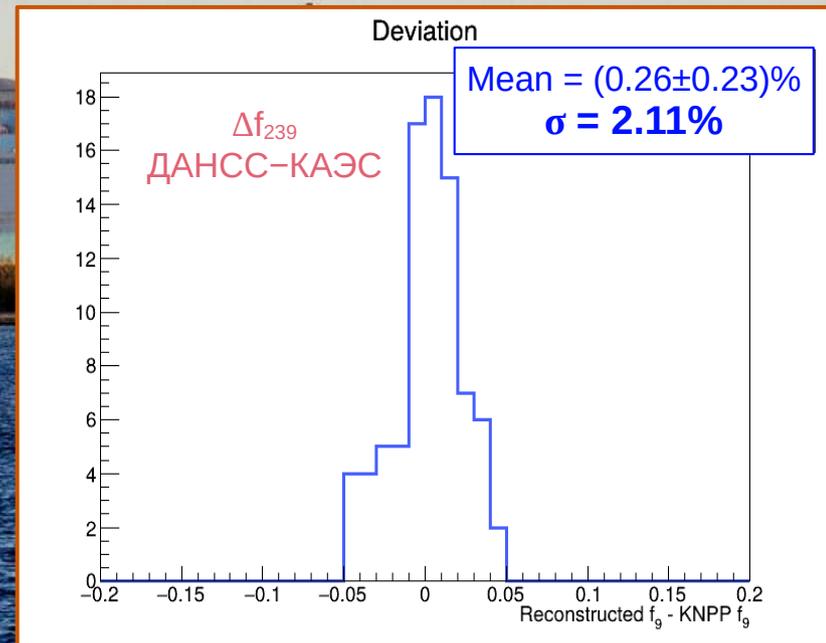
- ✓ Спектры антинейтрино от различных изотопов различны
- ✓ Суммарный спектр и скорость счета изменяются вместе с составом топлива
- ✓ Одно измерение – **12-15 дней**
- ✓ Фитируем наблюдаемые позитронные спектры суммой по **4** основным изотопам по модели **H-M** в каждом измерении
- ✓ Части спектров в области «бампа» (**3-5.5 МэВ e<sup>+</sup>**) исключены из фитирования
- ✓ Небольшие вклады **<sup>238</sup>U** и **<sup>241</sup>Pu** – по типичной кампании (кампания 5), общая сумма – единица
- ✓ Фактически один параметр фита
- ✓ Нормировка – по средним за кампанию
- ✓ Счета в разных положениях сопоставлены по «toy MC» точек в реакторе и детекторе
- ✓ Коррекции на мертвое время, эффективность, соседние реакторы
- ✓ Не учитывается точное значение мощности реактора и положение центра горения



# Определение Долей Делений

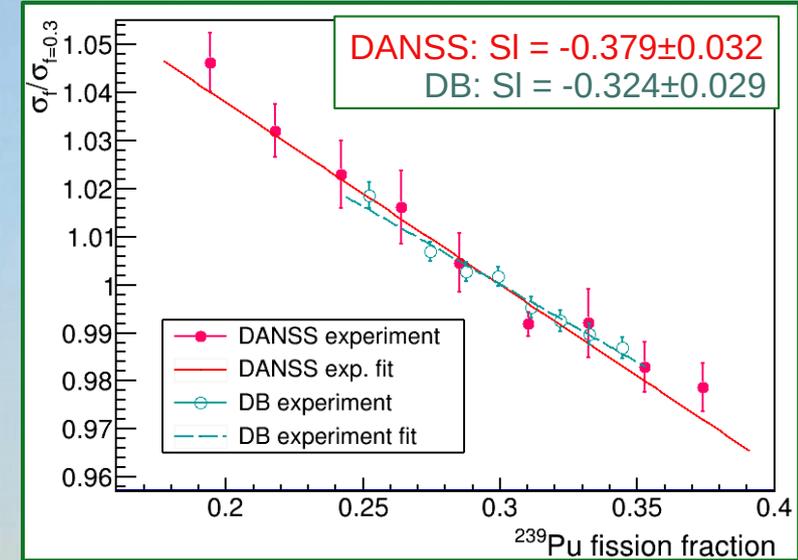


- ✓ Результаты согласуются с данными **КАЭС**
- ✓ Среднее отличие практически нулевое
- ✓ Разброс отличий **2.1%** – оценка АЭС **5%**
- ✓ Хорошее согласие между двумя совершенно разными способами прибавляет уверенности в обоих результатах
- ✓ Продемонстрирована возможность определения изотопного состава без вмешательства в работу реактора и информации о его параметрах



# Отношение Выходов $\sigma_5/\sigma_9$

- ✓ Обратная задача: зная все про реактор: мощность, доли делений, положение центра горения, исследуем скорость счета (и спектры)
- ✓ Нормализованный наклон  $SI$  – относительная скорость изменения счета ОБР при изменении доли  $^{239}\text{Pu}$
- ✓ Измерения ДАНСС: на  $1.3\sigma$  больший наклон чем ДВ



$$N = \alpha \cdot (\sigma_8 f_8 + \sigma_1 f_1 + \sigma_5 f_5 + \sigma_9 f_9)$$

$N$  – счет ОБР на деление

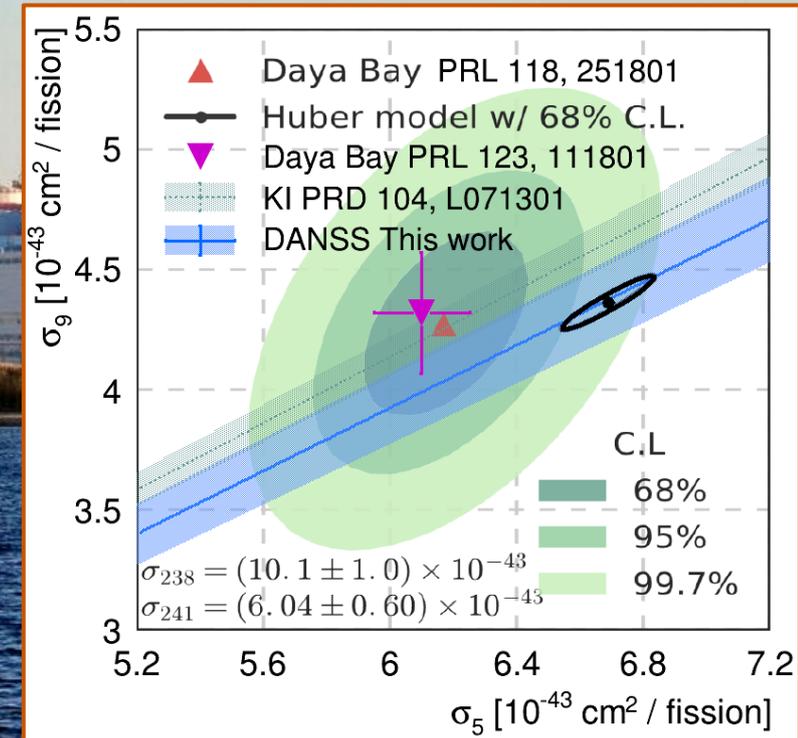
$$\frac{dN}{df_9} = \alpha \cdot \left( \sigma_8 \frac{df_8}{df_9} + \sigma_1 \frac{df_1}{df_9} + \sigma_5 \frac{df_5}{df_9} + \sigma_9 \right)$$

$\sigma_i$  – выходы ОБР  
 $f_i$  – доли делений

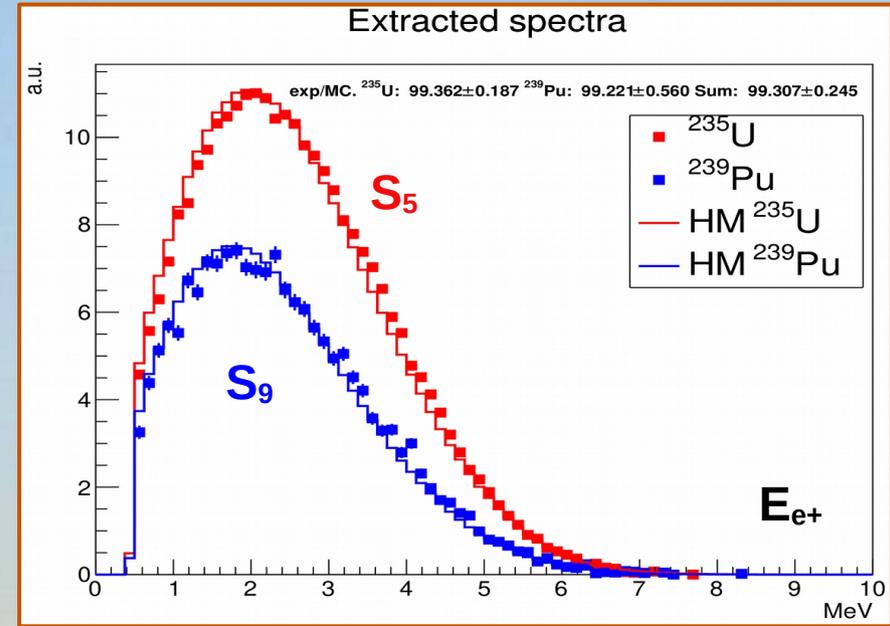
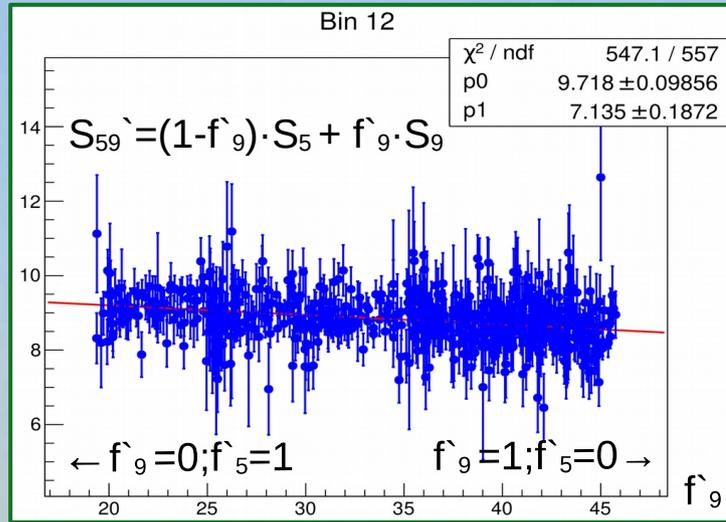
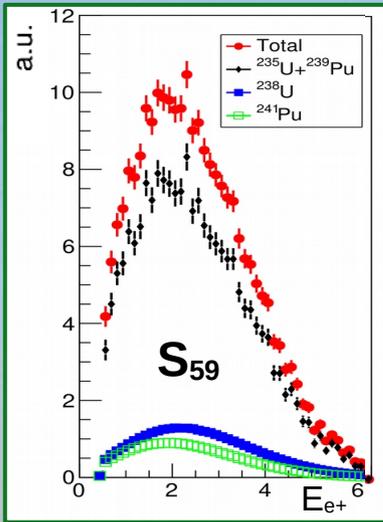
$$SI = \left( \frac{dN}{df_9} \right) / N = \frac{\frac{\sigma_8}{\sigma_9} \frac{df_8}{df_9} + \frac{\sigma_1}{\sigma_9} \frac{df_1}{df_9} + \frac{\sigma_5}{\sigma_9} \frac{df_5}{df_9} + 1}{\frac{\sigma_8}{\sigma_9} f_8 + \frac{\sigma_1}{\sigma_9} f_1 + \frac{\sigma_5}{\sigma_9} f_5 + f_9}$$

$$\frac{\sigma_5}{\sigma_9} = - \frac{\frac{\sigma_8}{\sigma_9} (SI \cdot f_8 - \frac{df_8}{df_9}) + \frac{\sigma_1}{\sigma_9} (SI \cdot f_1 - \frac{df_1}{df_9}) + (SI \cdot f_9 - 1)}{SI \cdot f_5 - \frac{df_5}{df_9}}$$

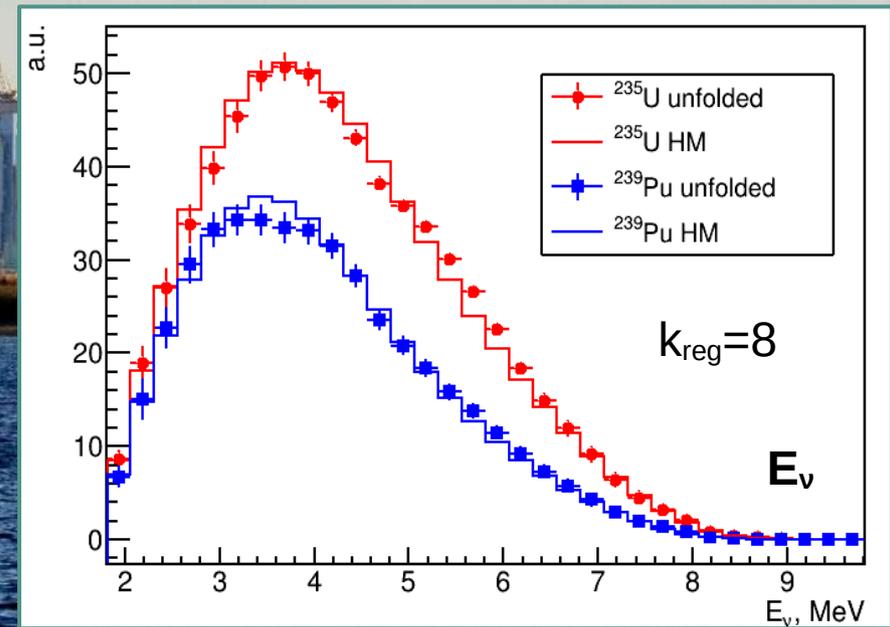
- ✓ Простая, но очень устойчивая формула для  $\sigma_5/\sigma_9$
- ✓ Результат ДАНСС  $\sigma_5/\sigma_9 = 1.528 \pm 0.058$  почти совпадает с Н-М ( $1.53 \pm 0.05$ ), но отличается от ДВ ( $1.412 \pm 0.089$ ,  $1.1\sigma$ ) и КИ ( $1.45 \pm 0.03$ ,  $1.2\sigma$ )
- ✓ Интересно, что наклон ДВ в нашей формуле дает  $1.459 \pm 0.052 \Rightarrow$  различия из-за наклона.



# Разделение Спектров $^{235}\text{U}$ и $^{239}\text{Pu}$



- ✓ Отдельные “недельные” точки на полной мощности. Всего **559** точек, диапазон  $E_{e^+}$  (**0.5-10** МэВ)
- ✓ В каждой точке перенормируем спектр позитронов (на деление) на **МК** по **Н-М** с известными **Д.Д.**
- ✓ Вычитаем **МК** спектры  $^{238}\text{U}$  и  $^{241}\text{Pu}$  с их **Д.Д.**
- ✓ Делаем замену:  $f_5 = f_5 / (f_5 + f_9)$ ,  $f_9 = f_9 / (f_5 + f_9)$ ,  $S_{59} = S_{59} / (f_5 + f_9)$  так что  $f_5 + f_9 = 1$
- ✓ Для каждого бина по энергии  $S_{59}' = (1 - f_9) \cdot S_5 + f_9 \cdot S_9$
- ✓ В каждом бине по энергии выполняется линейный фит со свободными параметрами  $S_5$  и  $S_9$
- ✓ Относительная нормировка, но верное **соотношение**
- ✓ Методом **SVD** конвертируем спектр позитронов в спектр антинейтрино (регуляризация **8**)
- ✓ **Неплохо для первой попытки!**



# Заключение

- ✓ Исключительная стабильность **ДАНССа** позволяет выполнять прецизионные измерения на протяжении **8 лет**
- ✓ Мощность реактора по счету антинейтрино измеряется с точностью **1%** за неделю, включая **0.8%** суммарных систематических неопределенностей **ДАНСС** и эксплуатационных измерений **КАЭС**
- ✓ Впервые в мире выполнено восстановление долей делений по измеренным спектрам, согласие с данными расчетов КАЭС в пределах **2.1%**; это прибавляет уверенности в обоих подходах
- ✓ Относительное изменение скорости счета в топливной кампании согласуется с моделью **Н-М** и несколько больше, чем результат **DB**
- ✓ Отношение выходов  $\sigma_5/\sigma_9 = 1.528 \pm 0.058$  почти совпадает с **Н-М** ( $1.53 \pm 0.05$ ), но отличается от **DB** ( $1.412 \pm 0.089$ ,  $1.1\sigma$ ) и **КИ** ( $1.45 \pm 0.03$ ,  $1.2\sigma$ )
- ✓ Первые результаты по разделению спектров  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  хорошо описывают соотношение позитронных спектров по **Н-М** и позволяют восстановить спектры нейтрино методом **SVD**

## Спасибо за внимание !