Исследование пространственной однородности и временной стабильности детекторов Daya Bay и определение параметров нейтринных осцилляций в эксперименте JUNO

(по материалам кандидатской диссертации)

Докладчик: Д.А. Должиков

Руководитель: к.ф.-м.н. М.О. Гончар

Содержание

1. Введение
2. Эксперимент Daya Bay
    i. Описание установки
    ii. Отбор событий обратного бета-распада (ОБР)
    iii. Исследование пространственной однородности и временной стабильности детекторов
3. Эксперимент JUNO
    i. Описание установки
    ii. Оценка чувствительности JUNO к порядку масс нейтрино и осцилляционным параметрам
    iii. Осцилляционный анализ первых данных эксперимента JUNO
4. Заключение

Введение

Статус осцилляционной нейтринной физики

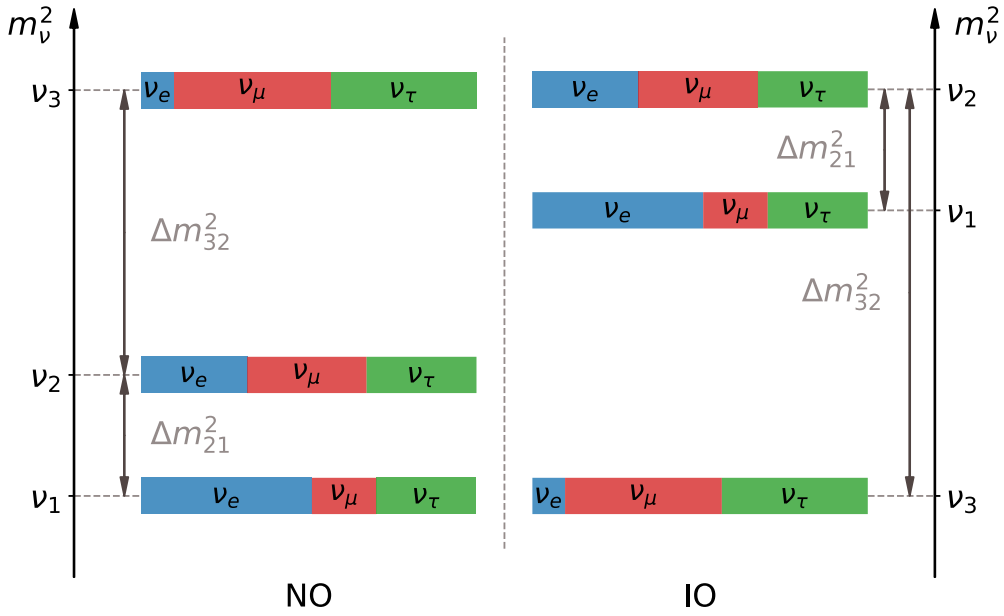
Что известно на данный момент (PDG 2024):

- ✓ $\Delta m^2_{21} \sim 7.5 \times 10^{-5}\ \text{eV}^2$ $(\pm 2.4\%)$
- ✓ $|\Delta m^2_{31}| \sim 2.5 \times 10^{-3}\ \text{eV}^2$ $(\pm 1.1\%)$
- ✓ $\sin^2\theta_{12} \sim 0.3$ $(\pm 4.2\%)$
- ✓ $\sin^2\theta_{13} \sim 0.02$ $(\pm 3.2\%)$
- ✓ $\sin^2\theta_{23} \sim 0.5$ $(\pm 3.2\%)$

Открытые вопросы:

- ⑦ Порядок масс нейтрино: $\Delta m^2_{31} > 0$ или $\Delta m^2_{31} < 0$
- ⑦ Октант угла смешивания θ_{23}: $\theta_{23} > 45°$, $\theta_{23} < 45°$, $\theta_{23} = 45°$?
- ⑦ Значение фазы CP-нарушения

Два возможных
порядка масс нейтрино



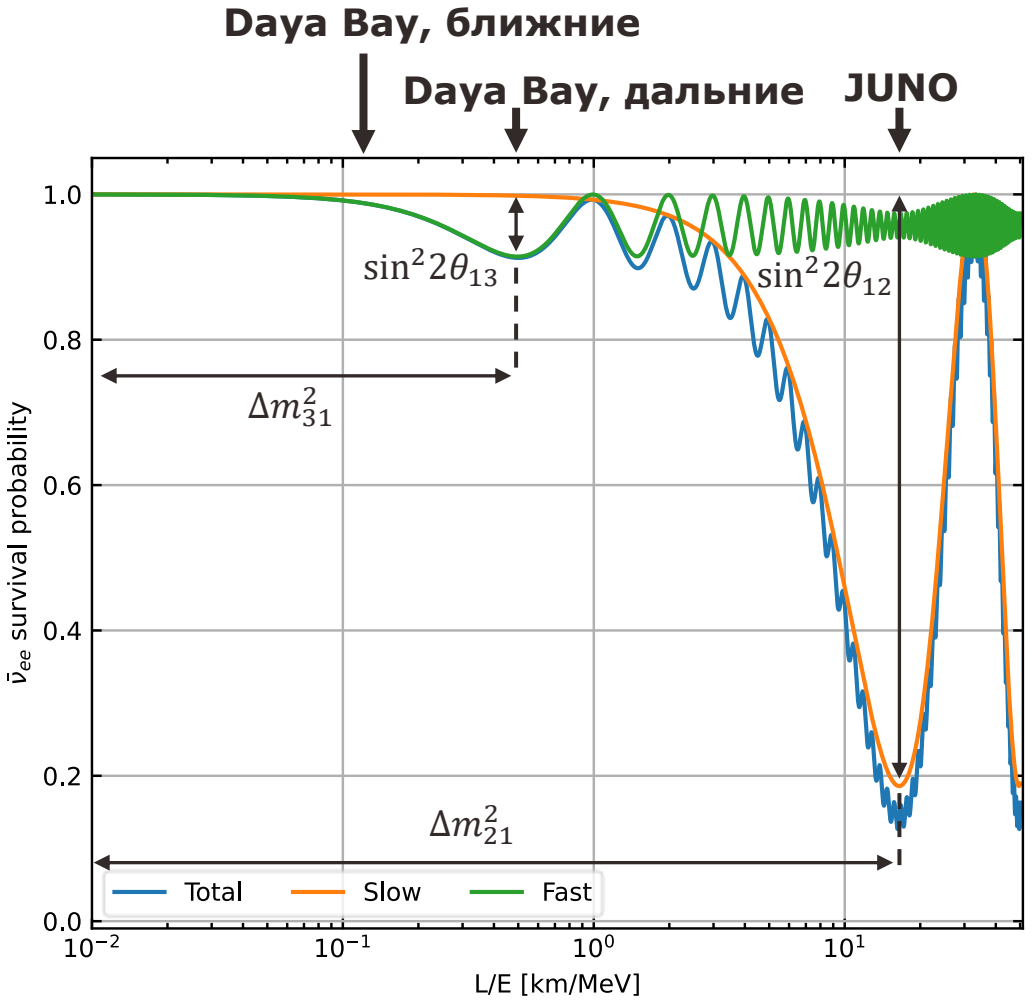
Осцилляции электронных антинейтрино

- Вероятность выживания $\overline{\nu}_e$:

$$\mathcal{P}(\overline{\nu}_e \to \overline{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{12}\, c_{13}^4\, \sin^2 \Delta_{21} - \sin^2 2\theta_{13}\, c_{12}^2 \sin^2 \Delta_{31} - \sin^2 2\theta_{13}\, s_{12}^2 \sin^2 \Delta_{32}$$

Медл.

Быстр.



$c_{ij} \equiv \cos\theta_{ij},\ s_{ij} \equiv \sin\theta_{ij},\ \Delta_{ij} = \Delta m^2_{ij} L/4E$

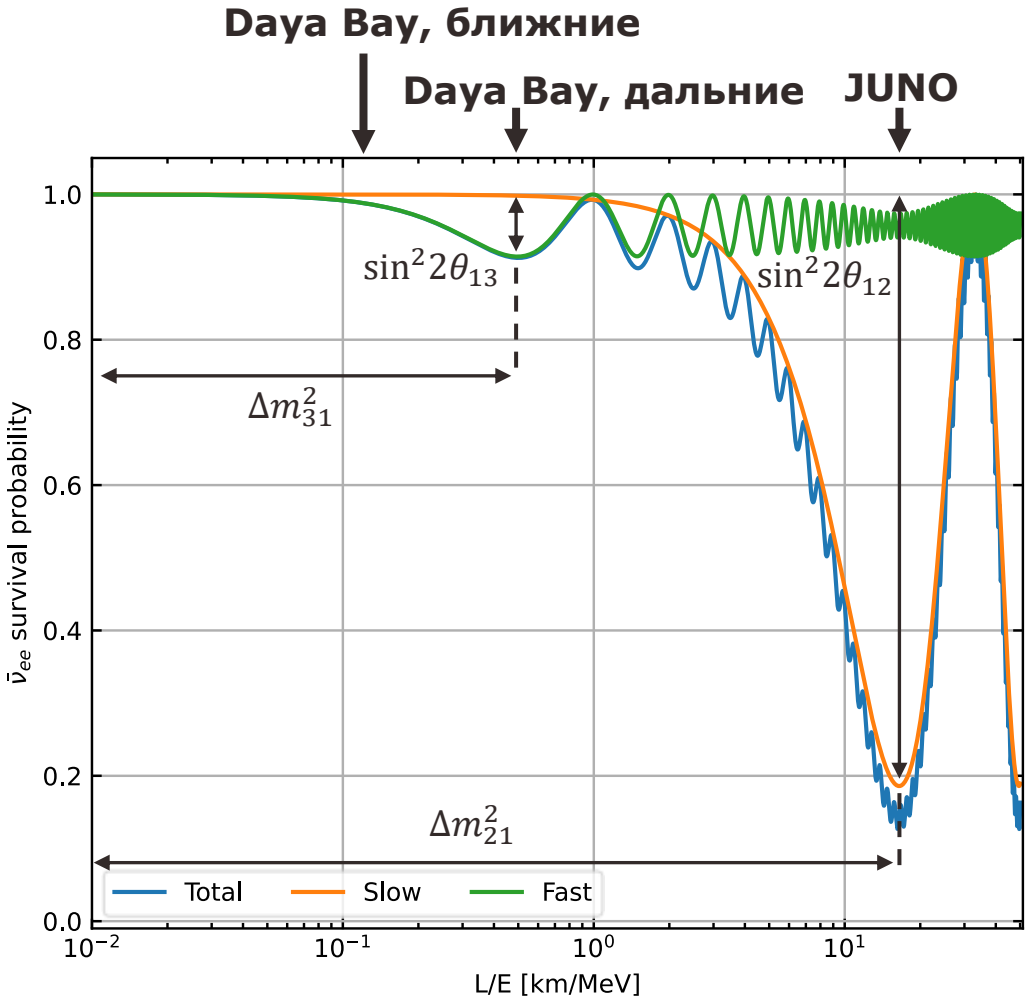
Осцилляции электронных антинейтрино

- Вероятность выживания $\overline{\nu}_e$:

$$\mathcal{P}(\overline{\nu}_e \to \overline{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{12}\, c_{13}^4\, \sin^2 \Delta_{21} - \sin^2 2\theta_{13}\, c_{12}^2 \sin^2 \Delta_{31} - \sin^2 2\theta_{13}\, s_{12}^2 \sin^2 \Delta_{32}$$

Медл. **Быстр.**

- JUNO чувствителен к Δm^2_{31}, Δm^2_{21}, $\sin^2\theta_{12}$ и, незначительно, к $\sin^2\theta_{13}$
- Daya Bay чувствителен к $\sin^2\theta_{13}$ и Δm^2_{31}
- Вероятность выживания не зависит от δ_{CP} и θ_{23}
  → нет вырождения по этим параметрам



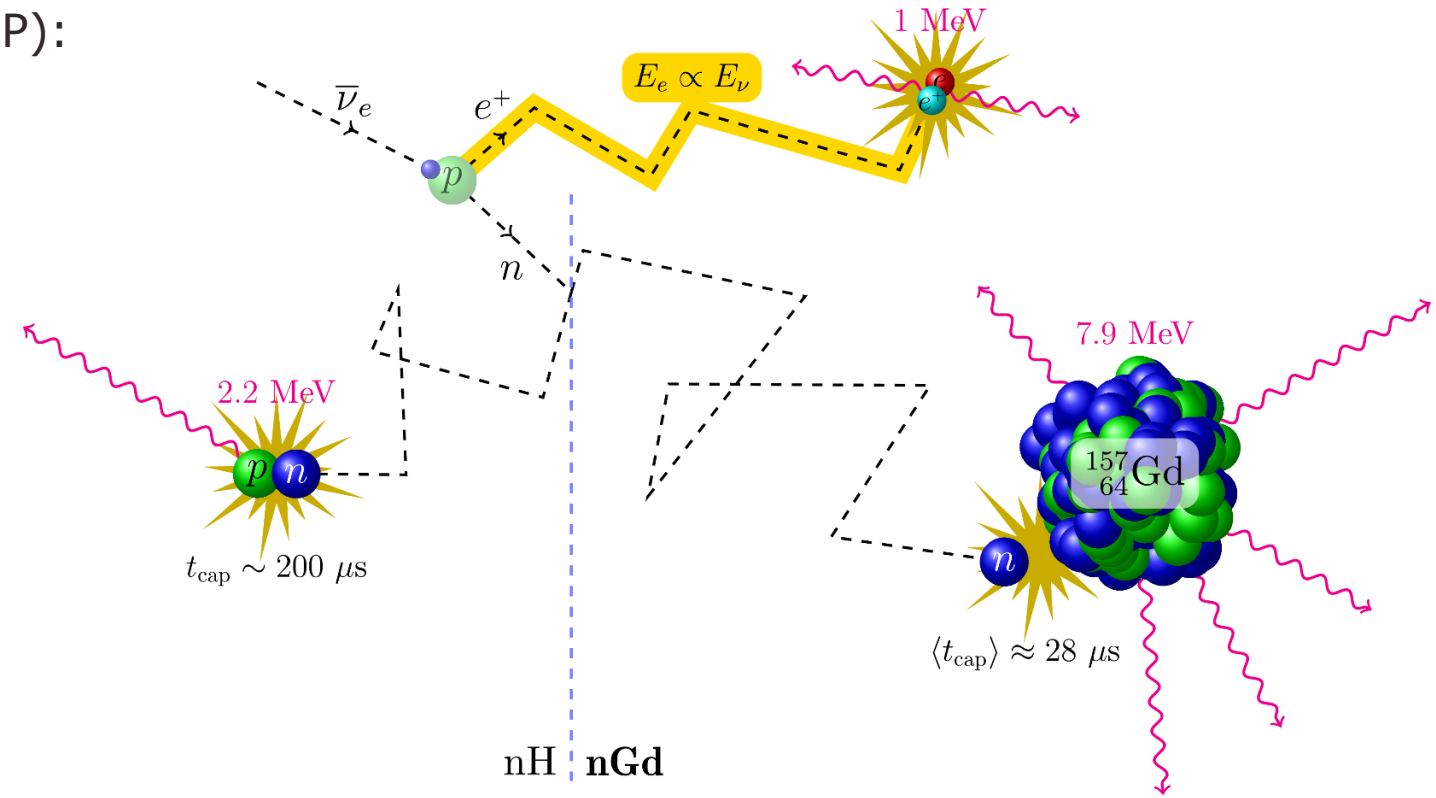
$c_{ij} \equiv \cos\theta_{ij},\ s_{ij} \equiv \sin\theta_{ij},\ \Delta_{ij} = \Delta m^2_{ij} L/4E$

Обратный бета-распад

- Реакция обратного бета-распада (ОБР):

$$\overline{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

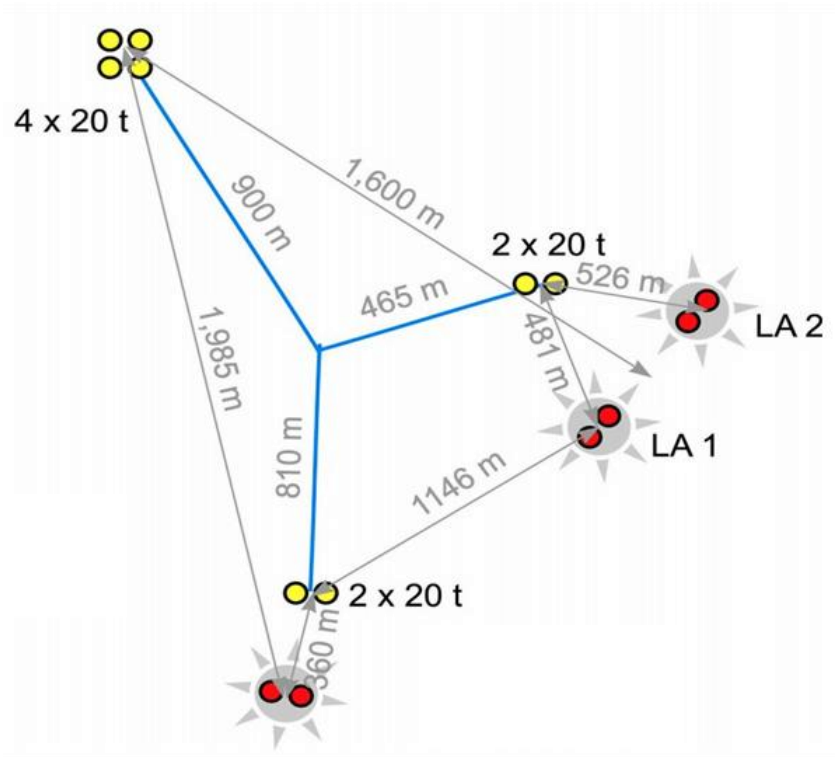
- $\overline{\nu}_e$ передаёт основную часть энергии позитрону
- **Мгновенный сигнал**: энергия выделенная позитроном в жидкий сцинтиллятор (кин. + аннигиляция)
- **Запаздывающий сигнал**: фотоны от релаксации ядра, захватившего нейтрон

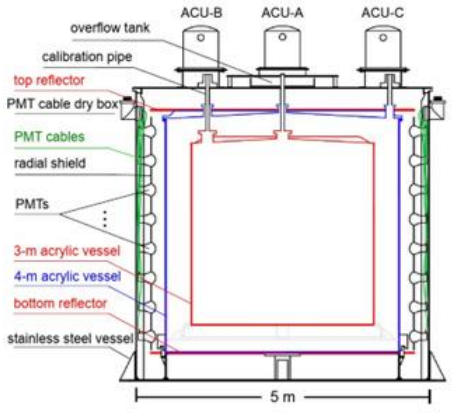


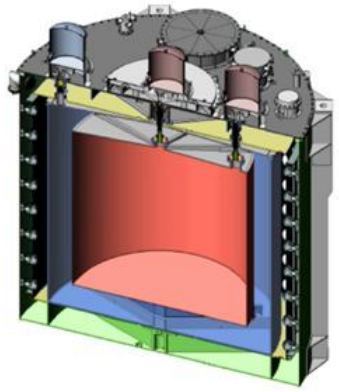
Энергетическая сигнатура, временные и пространственные корреляции пар «мгновенный-запаздывающий» сигнал позволяют эффективно отделять сигнал от фона

Эксперимент Daya Bay

Эксперимент Daya Bay







Основные характеристики:

- 8 идентичных детекторов антинейтрино
- 20 тонн жидкого сцинтиллятора с добавлением гадолиния
- Энергетическое разрешение 8.7% на 1 МэВ
- Набор данных: декабрь 2011 — декабрь 2020

Основные задачи:

- Измерение угла смешивания нейтрино θ_{13}
- Измерение разницы квадратов масс нейтрино Δm^2_{32}

Некоторые дополнительные задачи:

- Поиск стерильных нейтрино
- Измерение антинейтринных спектров от ^{235}U и ^{239}Pu

Отбор событий обратного бета-распада

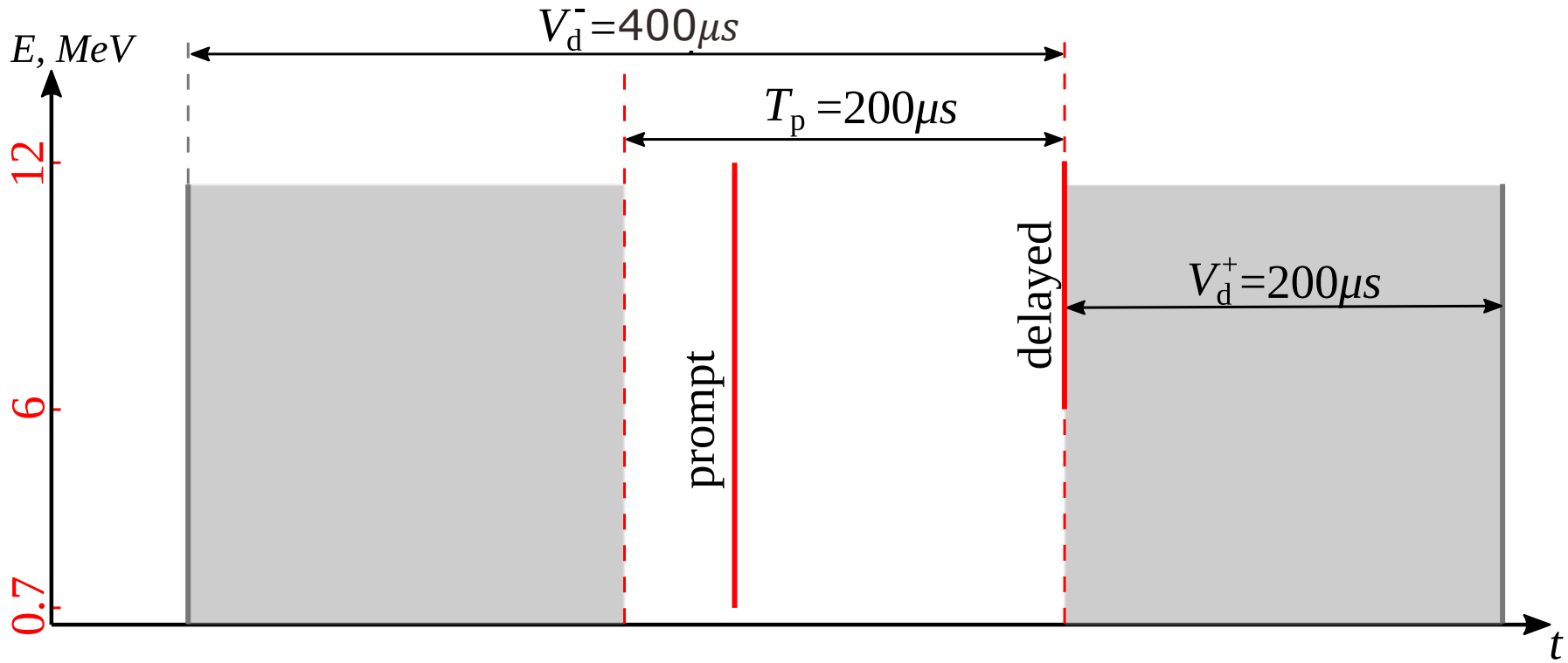
Задачи:

1. Выполнить отбор событий обратного бета-распада на полном наборе данных реакторного эксперимента Daya Bay и провести независимую оценку фона случайных совпадений.

Критерии отбора событий ОБР

Основные критерии отбора событий ОБР:

1. Сигнал не должен быть «флэшером» (спонтанной вспышкой ФЭУ)
2. Реконструированная энергия мгновенного сигнала от 0.7 МэВ до 12 МэВ
3. Реконструированная энергия запаздывающего сигнала от 6 МэВ до 12 МэВ
4. Сигнал произошёл во временном окне не связанном с приходом космического мюона
5. Должен удовлетворяться критерий множественности:



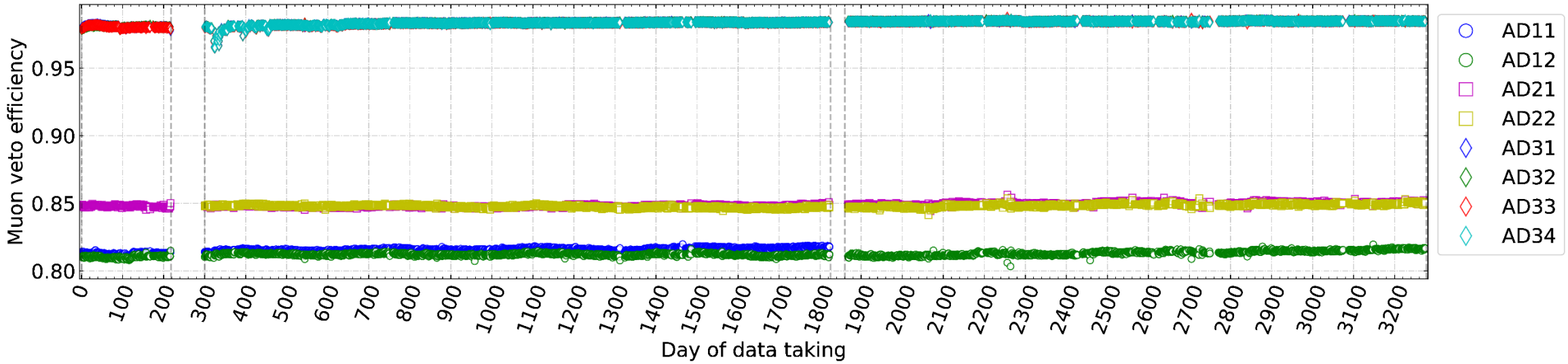
Эффективность мюонного вето

Эффективность мюонного вето для периода набора данных:

$$\varepsilon_\mu = \frac{L - L_\mu}{L},$$

- L – общее время набора данных в периоде
- L_μ – время мюонного вето

Эффективность мюонного вето для каждого детектора и дня набора данных



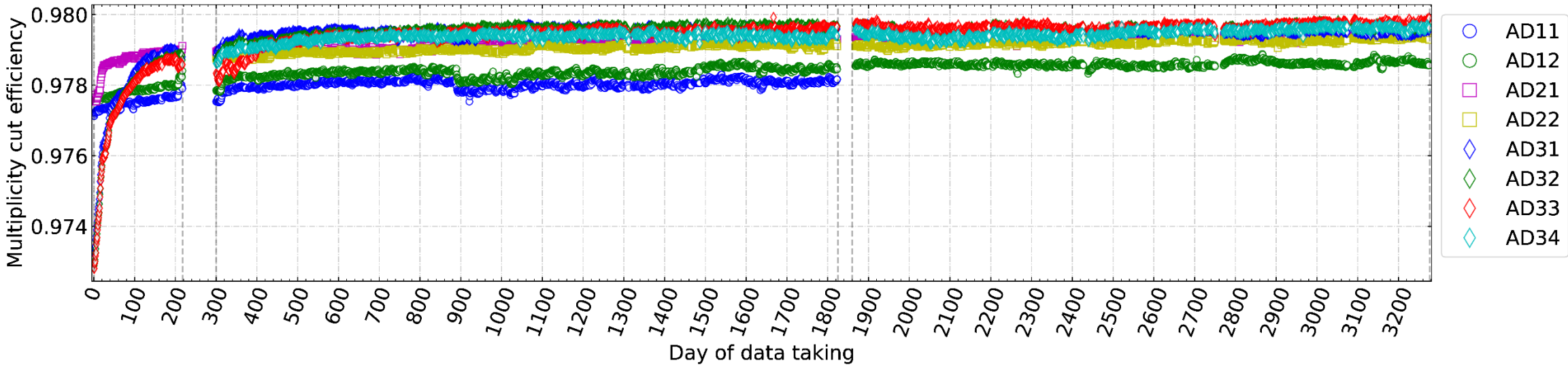
Эффективность критерия множественности

- Критерий отбрасывает пару, если рядом с ней есть посторонний сигнал
- Эффективность — пуассоновская вероятность не встретить такой сигнал:

$$\varepsilon_{\mathrm{m}} = P(\text{нет посторонних сигналов в окне 400 мкс до пары}) \times P(\text{нет высокоэнергетических в 200 мкс после})$$

- Обе вероятности вычислены по измеренным скоростям счёта одиночных сигналов, для каждого дня и каждого из восьми детекторов

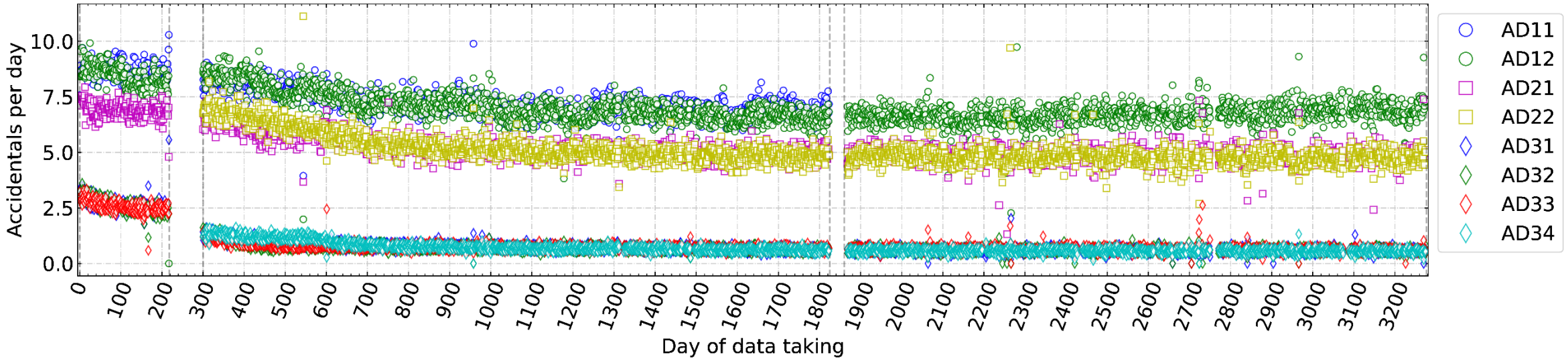
Эффективность критерия множественности для каждого детектора и дня набора данных:



Скорость счёта фона случайных совпадений

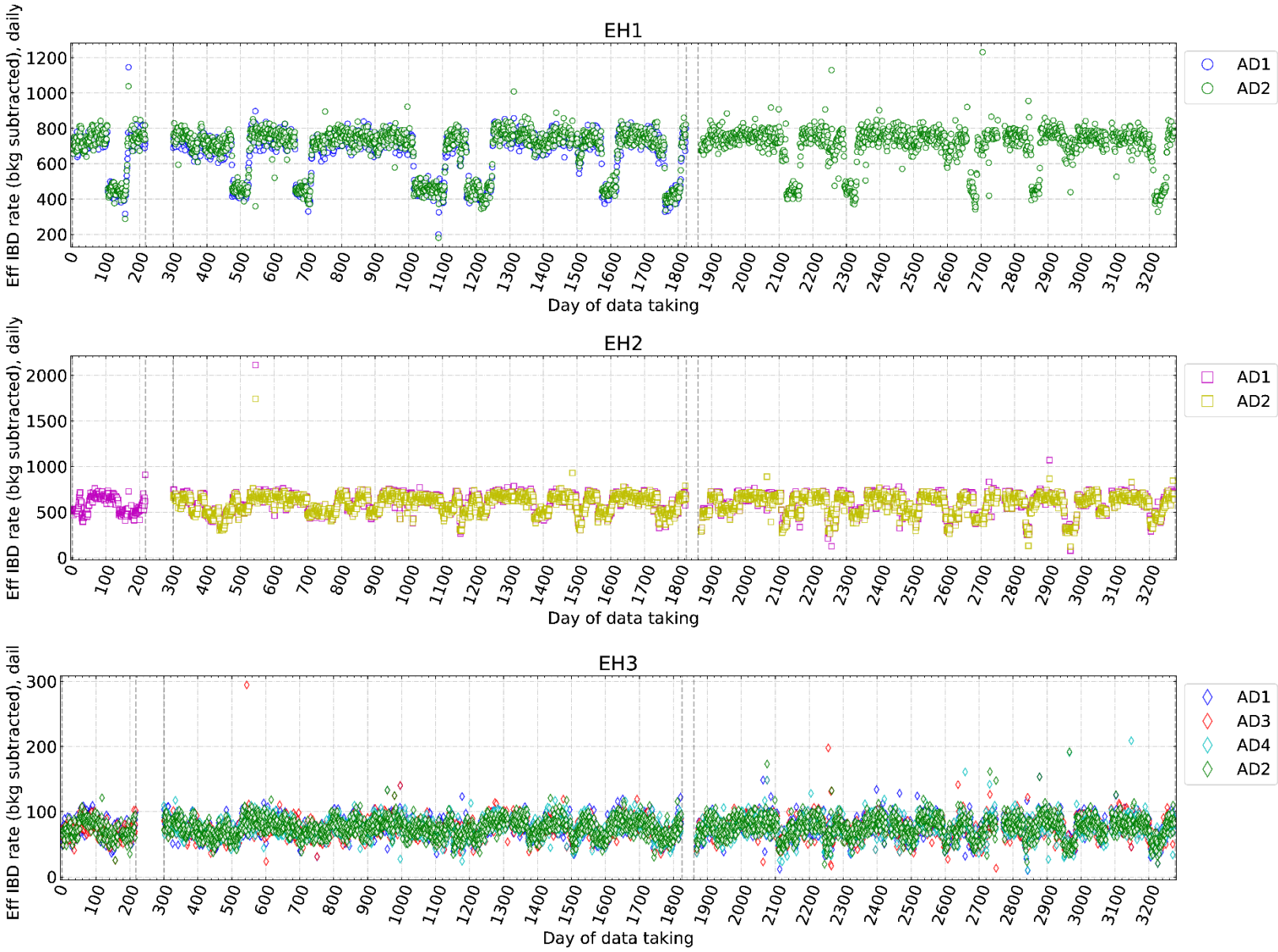
- Случайные совпадения — независимые сигналы, случайно прошедшие критерии отбора событий ОБР
- Для оценки данного фона скорость счёта запаздывающих сигналов умножается на пуассоновские вероятности четырёх условий:

1. один кандидат в мгновенные сигналы за 200 мкс до запаздывающего
2. в том же окне нет сигналов с энергией выше 12 МэВ (фоновые сигналы)
3. нет дополнительных сигналов в окне от 400 до 200 мкс до запаздывающего
4. нет высокоэнергетических сигналов в течение 200 мкс после запаздывающего



Скорость счёта событий ОБР

- Итог отбора: скорость счёта ОБР для каждого дня и каждого из восьми детекторов
  - Поправлены на эффективность
  - Фон вычтен
- Вариация скоростей счёта → изменение мощностей реакторов
- Выбросы → дни с малым временем набора данных



Выводы: отбор событий в Daya Bay

- Отбор выполнен на полном наборе данных 2011–2020 годов. Для каждого дня и каждого из восьми детекторов получены
  - Скорости счёта одиночных сигналов
  - Эффективности мюонного вето
  - Эффективности критерия множественности
  - Оценка фона случайных совпадений
  - Скорости счёта кандидатов в события ОБР
- Отбор независимо вели четыре рабочие группы коллаборации, результаты настоящей работы использовала группа ОИЯИ для перекрёстного осцилляционного анализа
- Финальный результат коллаборации Daya Bay*:
  - $\sin^2 2\theta_{13} = 0.0851 \pm 0.0024$
  - $\Delta m^2_{32} = (2.466 \pm 0.060) \times 10^{-3}$ эВ^2

*Daya Bay Collaboration – "Precision Measurement of Reactor Antineutrino Oscillation at Kilometer-Scale Baselines by Daya Bay" – *Phys. Rev. Lett.* 130 (2023) 161802

Исследование пространственной однородности и временной стабильности детекторов Daya Bay

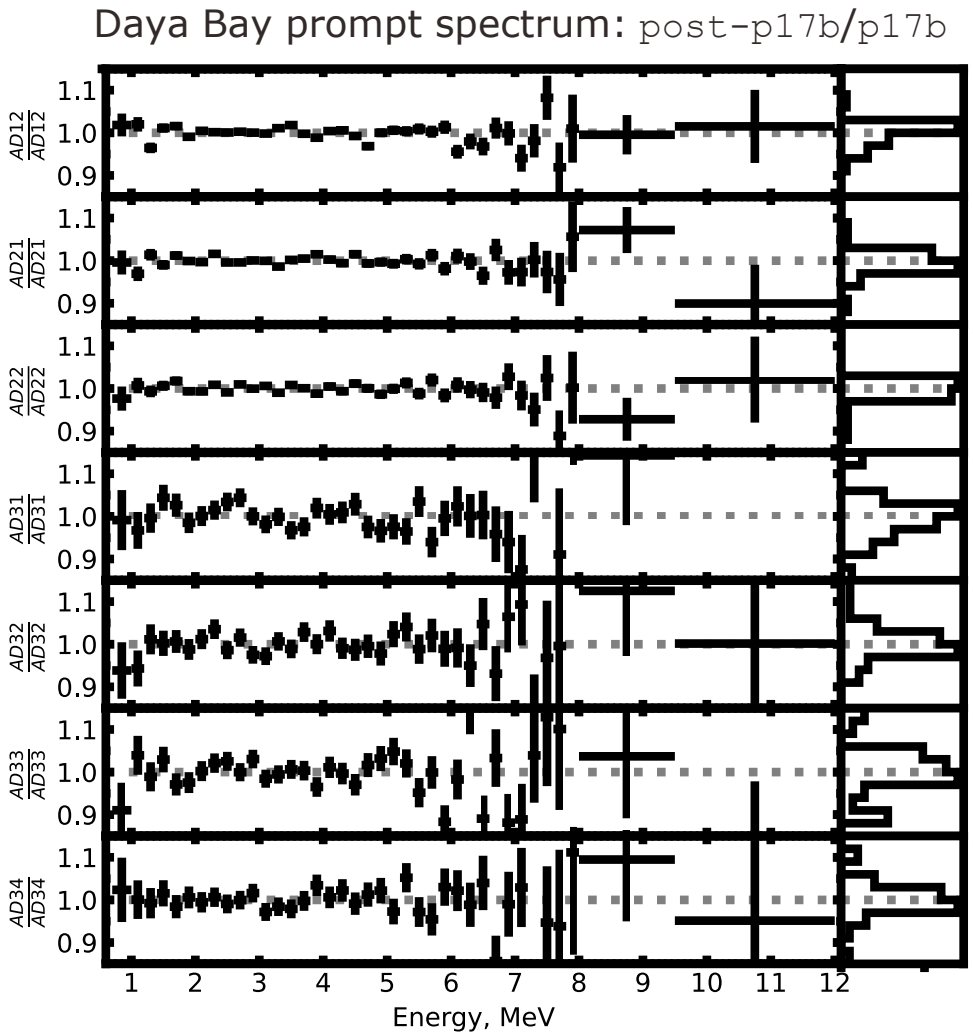
Задачи:

2. Исследовать долговременную пространственную однородность и временную стабильность отклика антинейтринных детекторов Daya Bay

Используемый набор данных

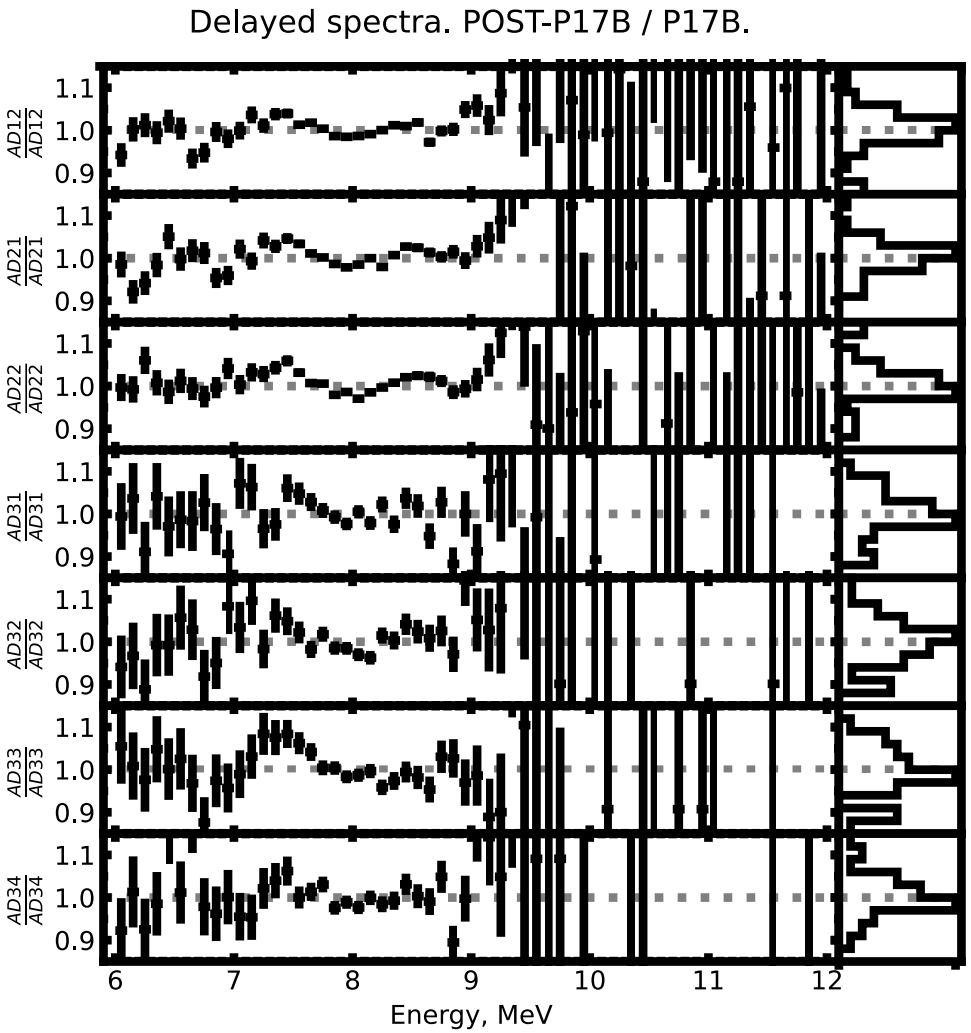
- Для данного исследования весь набор данных был разделён на два периода:
  - `P17B`: декабрь 2011 – август 2017 (1958 дней набора данных)
  - `post-P17B`: сентябрь 2017 – декабрь 2020 (1200 дней набора данных)
- Использовался только внутренний объем с гадолинием

Изменение формы спектра мгновенного сигнала



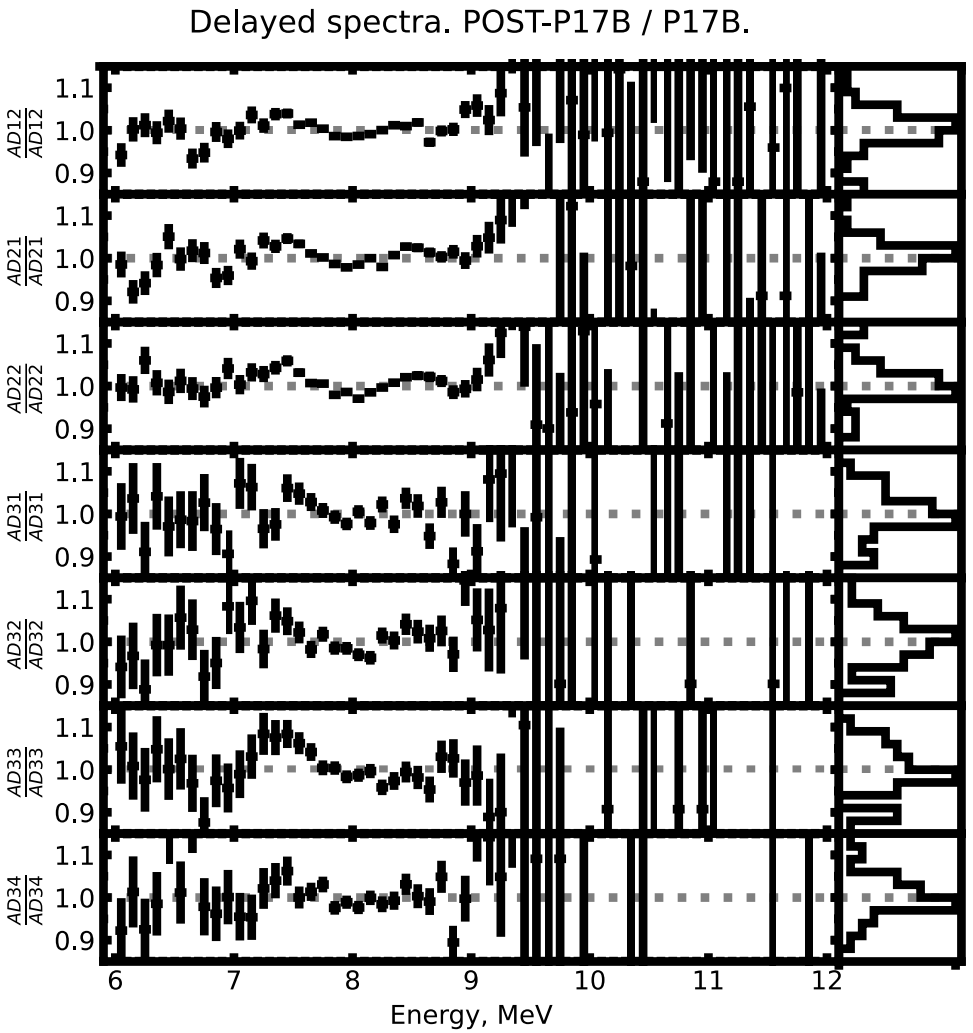
- По спектру мгновенного сигнала извлекают осцилляционные параметры → необходимо чтобы его форма была стабильной по мере набора данных
- Отношение спектров мгновенного сигнала для каждого детектора находится в районе 1
  - Отклонения находятся в рамках статистической неопределённости

Изменение формы спектра запаздывающего сигнала

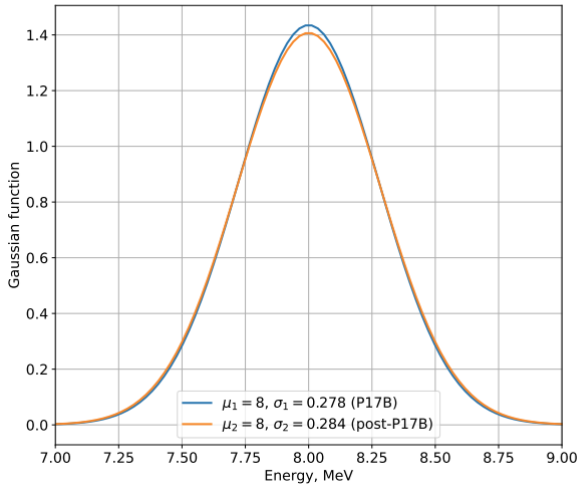


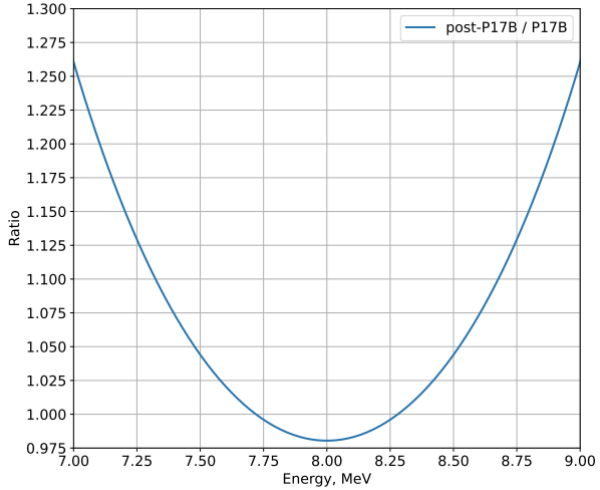
- В отношении спектров запаздывающих сигналов наблюдается волнообразное поведение в области 8 МэВ

Изменение формы спектра запаздывающего сигнала

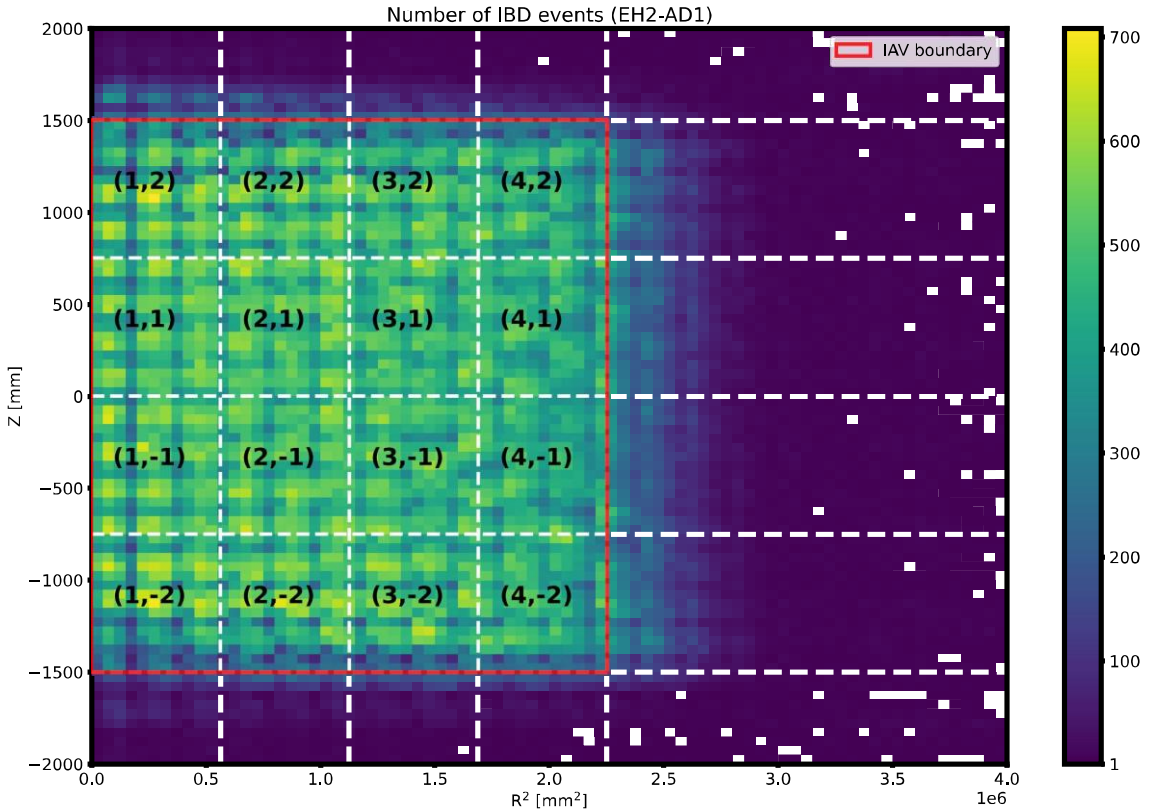


- В отношении спектров запаздывающих сигналов наблюдается волнообразное поведение в области 8 МэВ
- Данное поведение объясняется ухудшением энергетического разрешения между периодами набора данных:



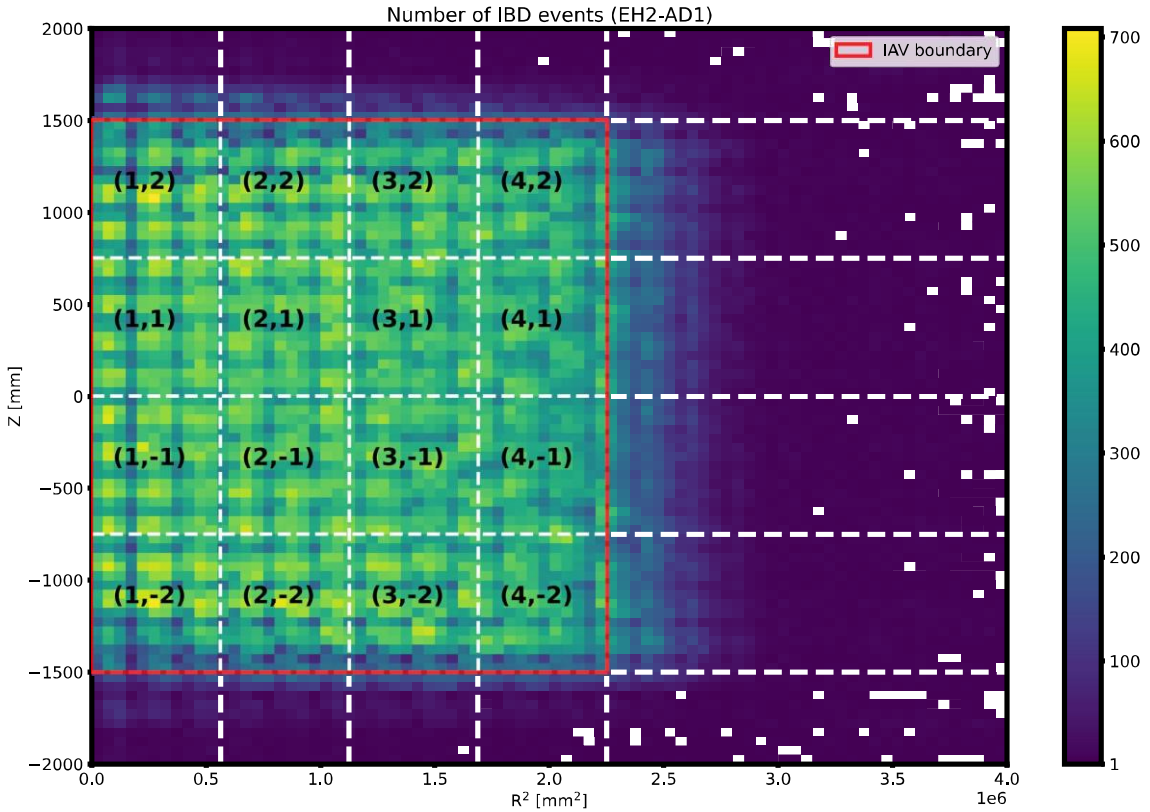


Пространственное сегментирование детекторов



- Для изучения локальных свойств детекторов, каждый детектор был виртуально разделён на $16\ (4 \times 4)$ частей

Пространственное сегментирование детекторов



- Для изучения локальных свойств детекторов, каждый детектор был виртуально разделён на $16\ (4 \times 4)$ частей

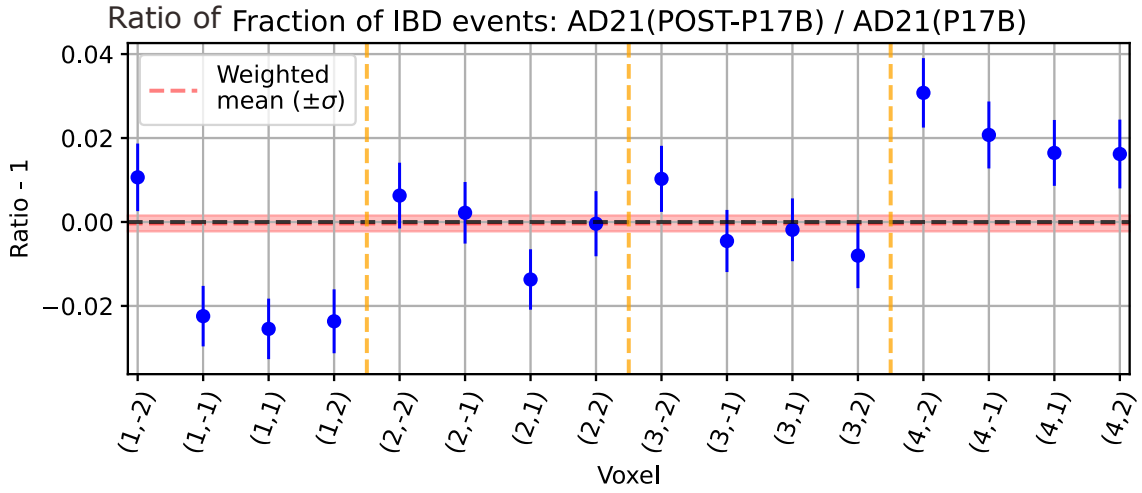
- Для каждой части измерены четыре величины и взято отношение для периодов

  - Доли событий ОБР: $F = N_{\text{ячейка}}/N_{\text{детектор}}$

  - Время захвата нейтрона: подгонка распределения временных интервалов мгновенный-запаздывающий сигнал $ne^{-\Delta t/\tau}$

  - Энергетическая шкала и разрешение: подгонка спектра запаздывающих сигналов двумя пиками захвата на гадолинии

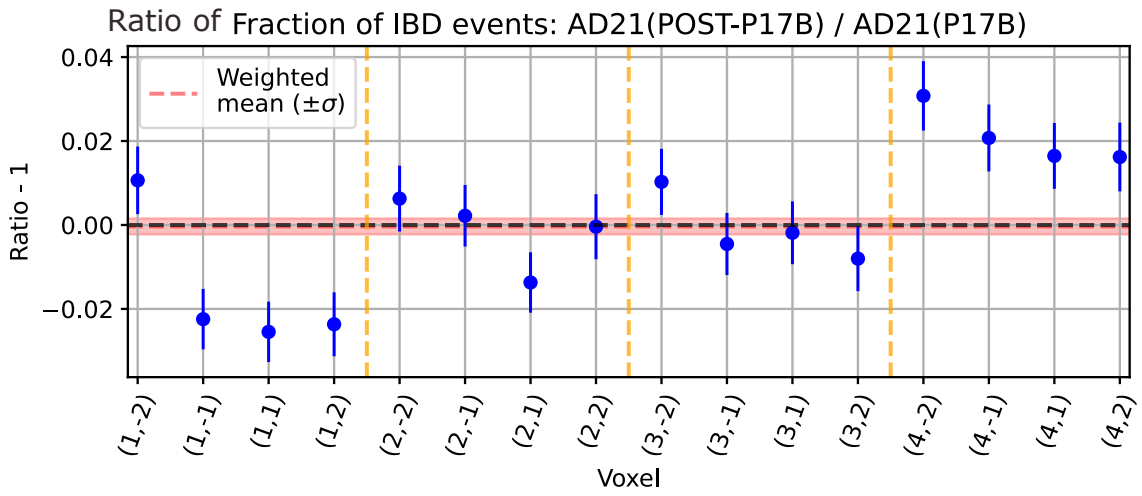
Стабильность: доли событий и время захвата

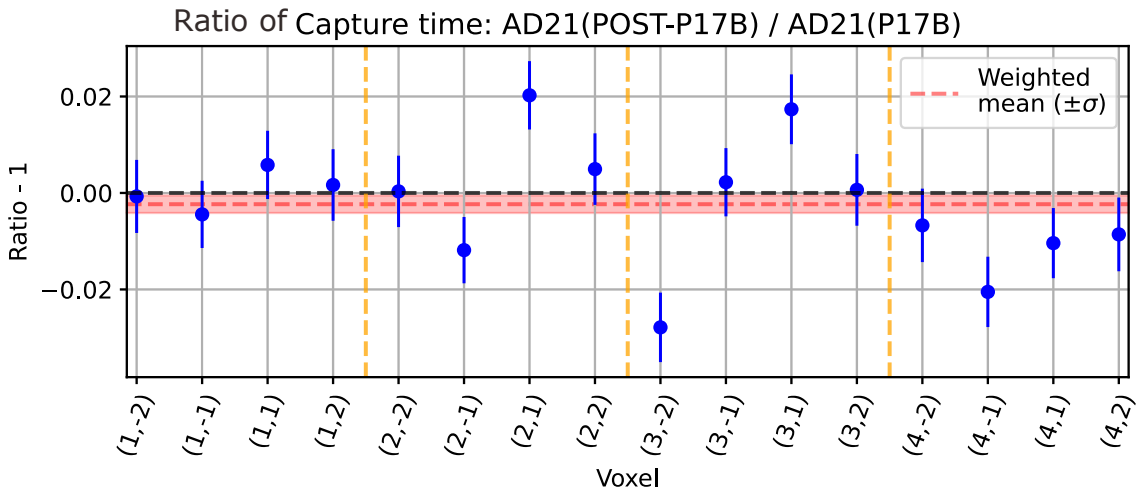


Доли событий ОБР:

- Чувствительна к плотности мишеней и однородности регистрации событий
- Отклонения в ячейках до 4% в ближних детекторах и до 8% в дальних

Стабильность: доли событий и время захвата





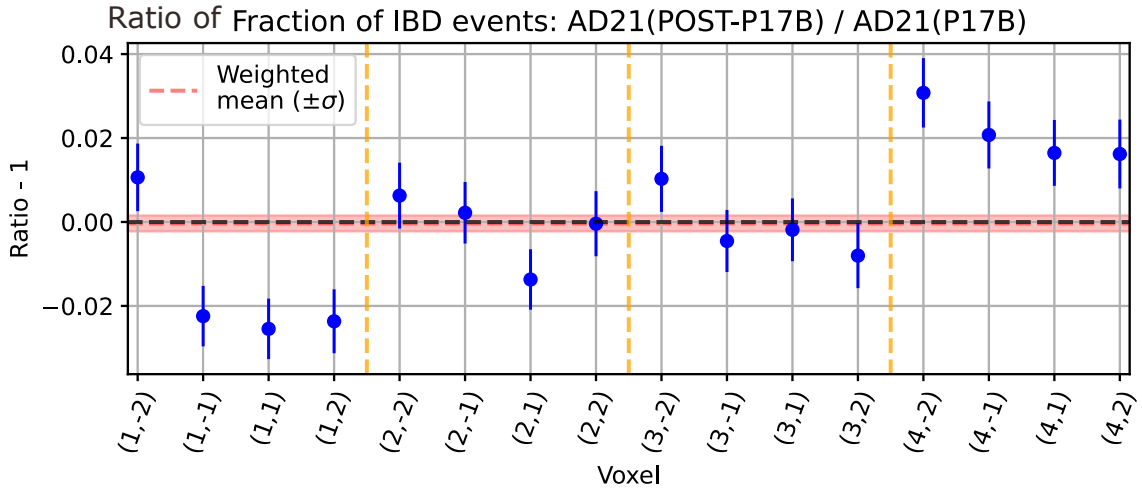
Доли событий ОБР:

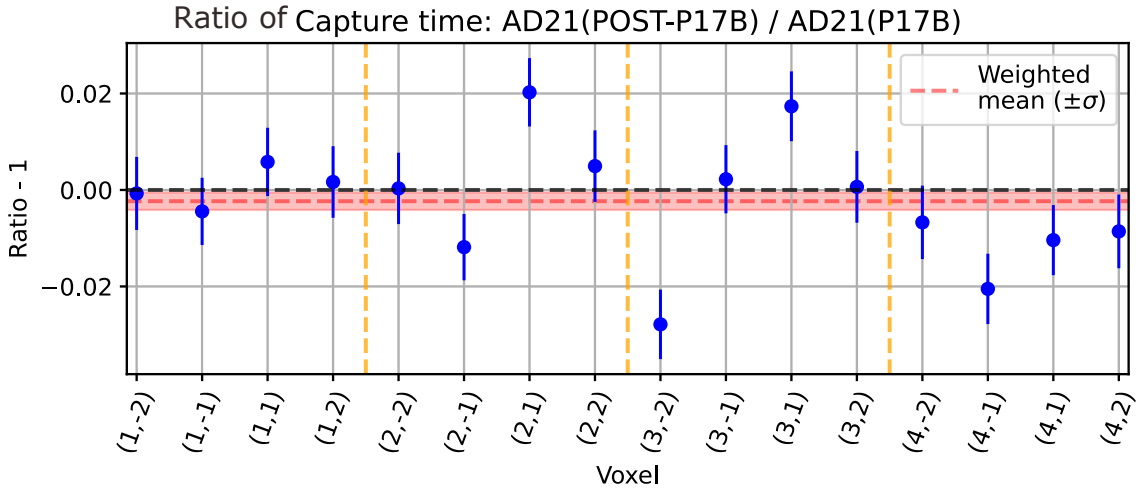
- Чувствительна к плотности мишеней и однородности регистрации событий
- Отклонения в ячейках до 4% в ближних детекторах и до 8% в дальних

Время захвата нейтрона:

- Чувствительно к концентрации гадолиния
- Отклонения в ячейках до 3% в ближних детекторах и до 5% в дальних

Стабильность: доли событий и время захвата





Доли событий ОБР:

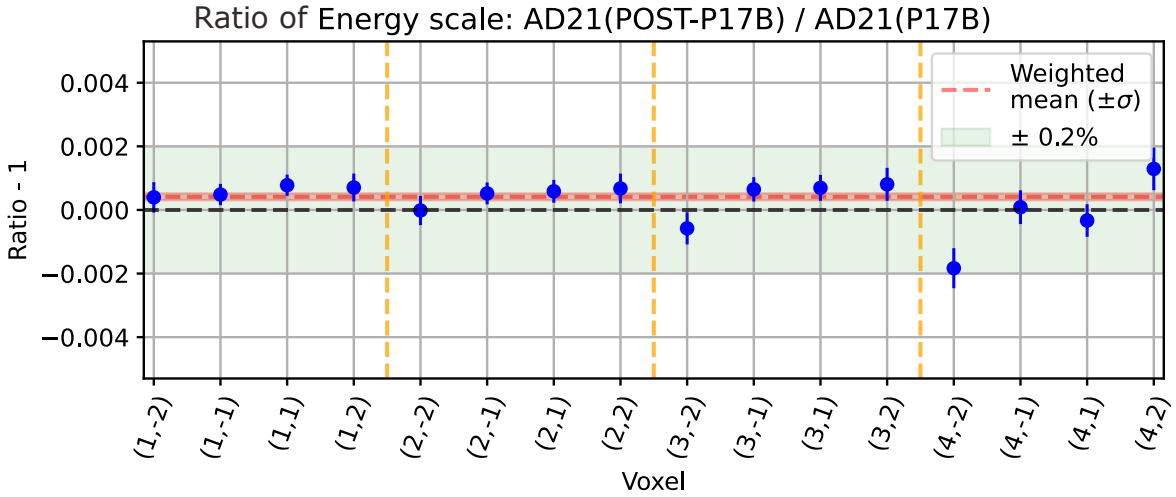
- Чувствительна к плотности мишеней и однородности регистрации событий
- Отклонения в ячейках до 4% в ближних детекторах и до 8% в дальних

Время захвата нейтрона:

- Чувствительно к концентрации гадолиния
- Отклонения в ячейках до 3% в ближних детекторах и до 5% в дальних

Взвешенное среднее отклоняется от единицы в пределах статистической погрешности во всех детекторах для обеих величин → показатели стабильны между периодами

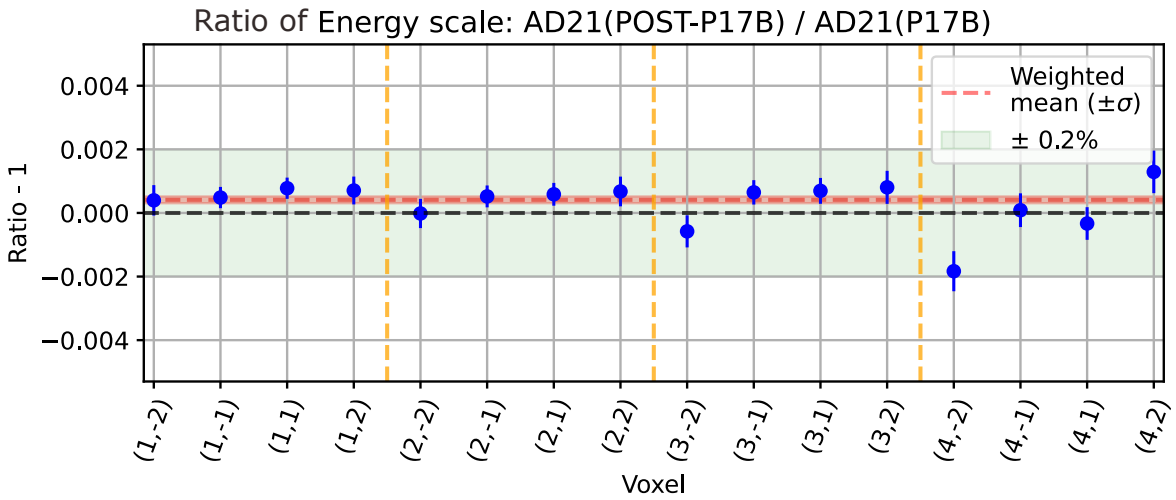
Стабильность: энергетическая шкала и разрешение

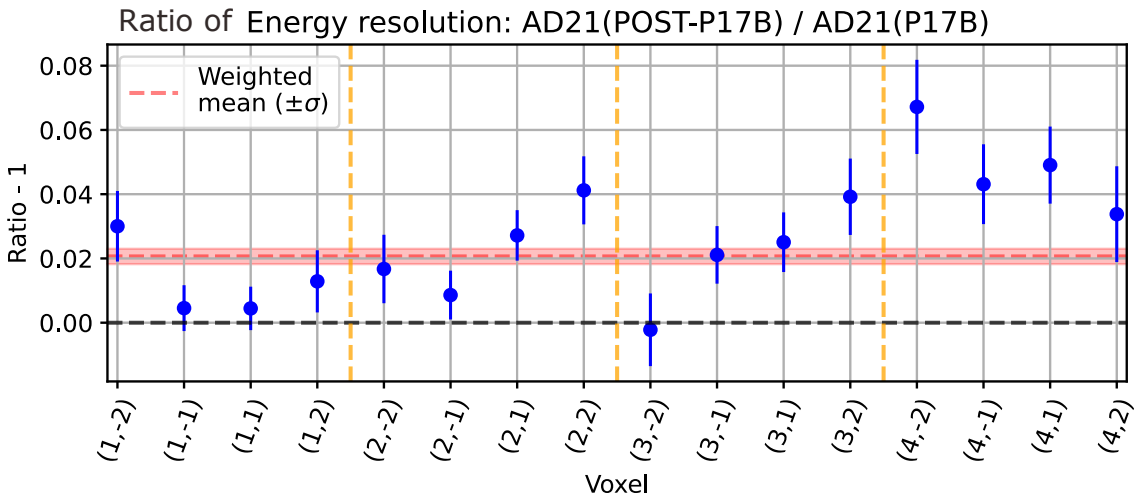


Энергетическая шкала:

- Отклонения в ячейках до 0.2% в ближних детекторах и до 0.5 % в дальних
- Разброс среднего по детекторам не превышает 0.2%

Стабильность: энергетическая шкала и разрешение





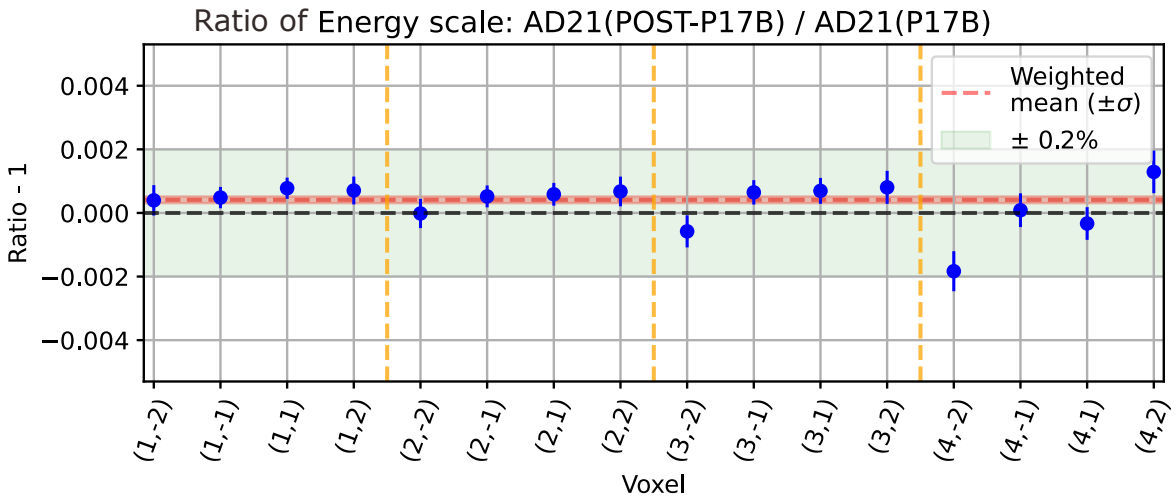
Энергетическая шкала:

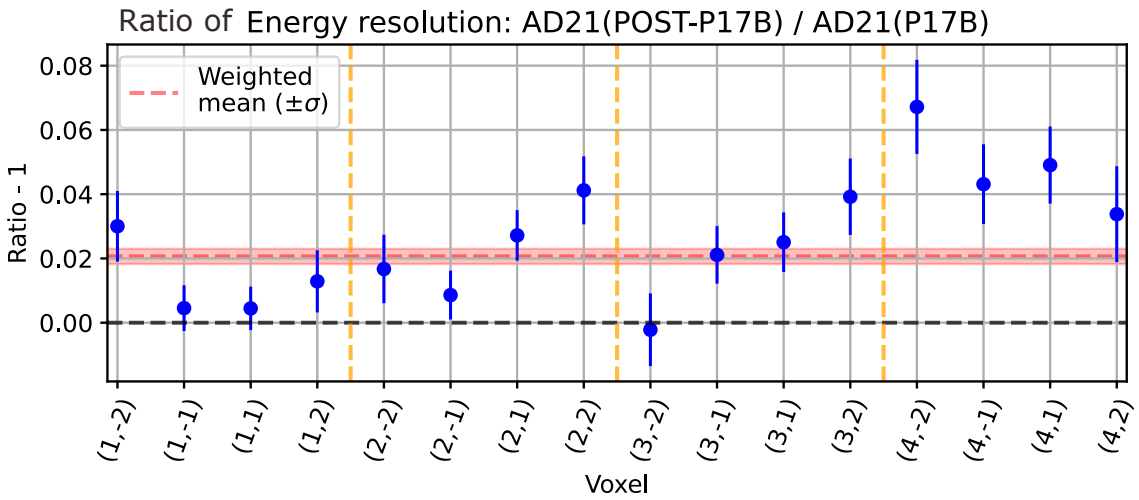
- Отклонения в ячейках до 0.2% в ближних детекторах и до 0.5 % в дальних
- Разброс среднего по детекторам не превышает 0.2%

Энергетическое разрешение:

- Отклонения в ячейках до 8% в ближних детекторах и до 11% в дальних
- Среднее смещено на 2% для всех детекторов

Стабильность: энергетическая шкала и разрешение





Энергетическая шкала:

- Отклонения в ячейках до 0.2% в ближних детекторах и до 0.5 % в дальних
- Разброс среднего по детекторам не превышает 0.2%

Энергетическое разрешение:

- Отклонения в ячейках до 8% в ближних детекторах и до 11% в дальних
- Среднее смещено на 2% для всех детекторов

Разрешение — единственная из четырёх величин с систематически смещённым средним во всех детекторах. Возможная причина — выход из строя ФЭУ и снижение светосбора

Выводы: стабильность детекторов Daya Bay

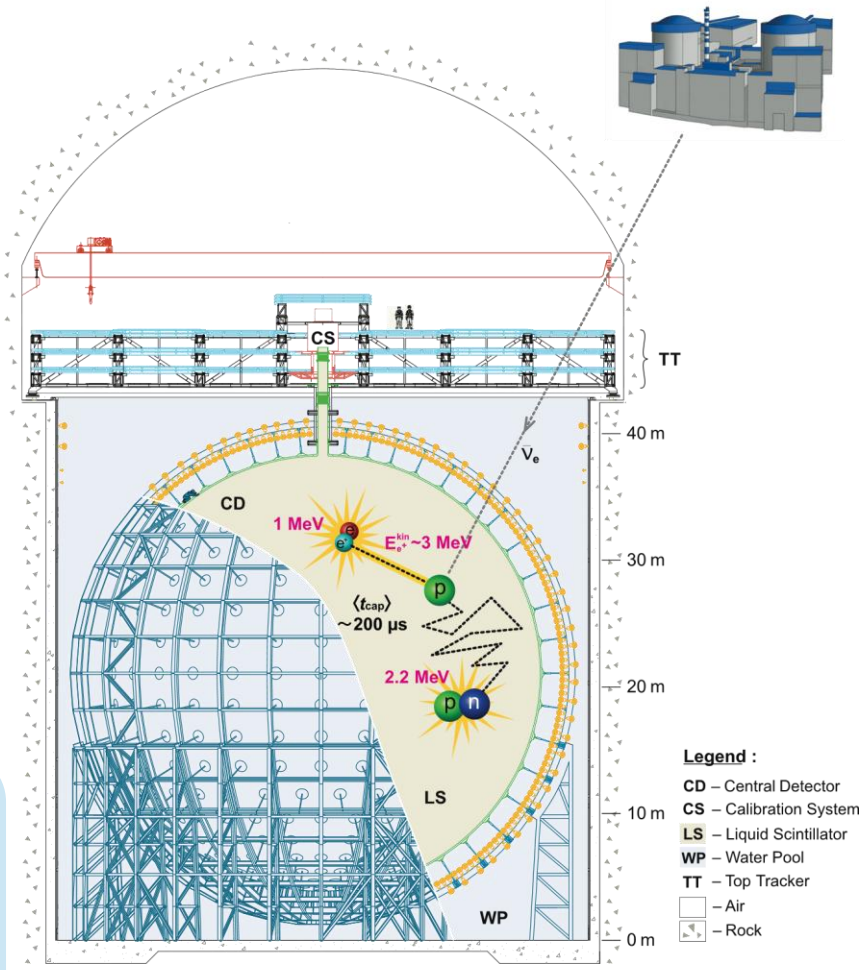
- Для каждого детектора выполнено сравнение характеристик для двух периодов наборов данных — до и после 2017 года
  - Форма спектров мгновенных и запаздывающих сигналов: отношение периодов в пределах статистической погрешности, кроме области пика захвата на Gd в спектре запаздывающих сигналов (связано с ухудшением энергетического разрешения)
  - Доли событий ОБР и время захвата нейтрона: средние значения в пределах стат. погрешности
  - Энергетическая шкала: смещение в большинстве ячеек не более десятых долей процента
  - Энергетическое разрешение: ухудшение на 2%, однородное внутри каждого детектора и заметное в спектре запаздывающих сигналов
- Эта проверка, в отличие от отбора событий и осцилляционного анализа, другими рабочими группами коллаборации не дублировалась
- Показанная стабильность — одно из условий надёжности финального измерения осцилляционных параметров

Эксперимент JUNO

Эксперимент JUNO

Jiangmen **U**nderground **N**eutrino **O**bservatory (**JUNO**) — многоцелевой нейтринный эксперимент, расположенный на юге Китая

- Мишень — 20 килотонн жидкого сцинтиллятора
- Расположен в 52.5 км от 8 ядерных реакторов (26.6 ГВт$_{тепл}$)
- Проектное энергетическое разрешение для e^+ $\sigma \approx 3.0\%$ на 1 МэВ
- Контроль нелинейности энерг. шкалы на уровне $\sim 1\%$
- Ближний детектор TAO для измерения начального потока $\bar{\nu}_e$
- Богатая физическая программа: реакторные, солнечные и атмосферные нейтрино, геонейтрино, нейтрино от сверхновых и поиск распада протона



Ожидаемые результаты с реакторными $\bar{\nu}_e$ за ~7 лет набора данных:

- Определение порядка масс нейтрино (NMO)
- Измерение параметров осцилляций $\sin^2\theta_{12}$, Δm^2_{21} и Δm^2_{31} с точностью $< 1\%$

Оценка чувствительности JUNO к порядку масс нейтрино и осцилляционным параметрам

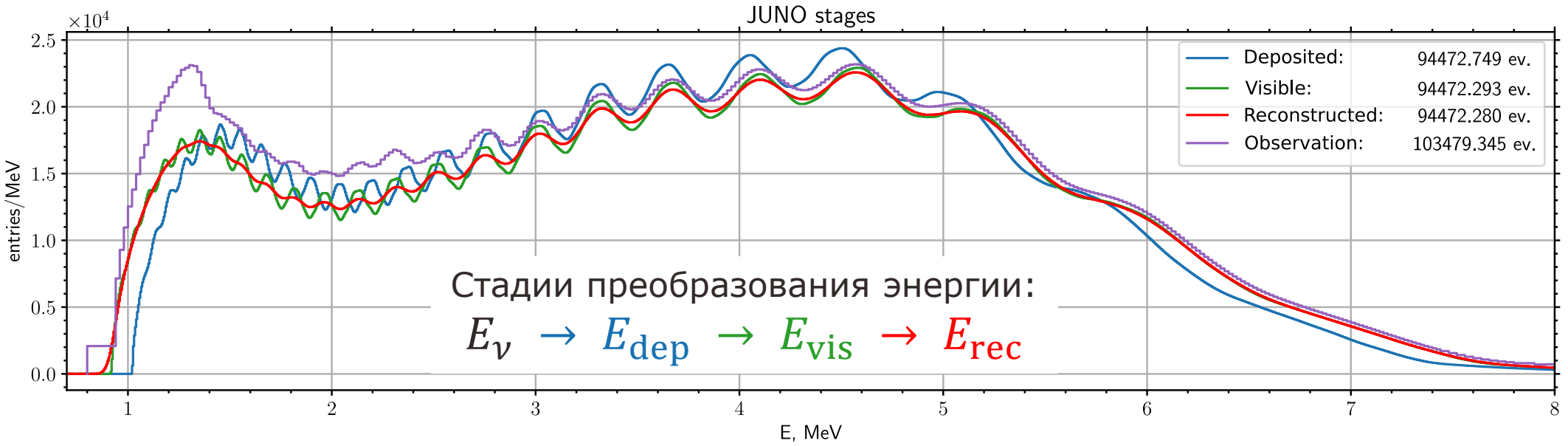
Задачи:

3. Разработать процедуру многопараметрического совместного статистического анализа данных JUNO и TAO на базе программного пакета Global Neutrino Analysis (GNA, разработка ЛЯП)

4. Оценить чувствительность JUNO к порядку масс нейтрино и к осцилляционным параметрам

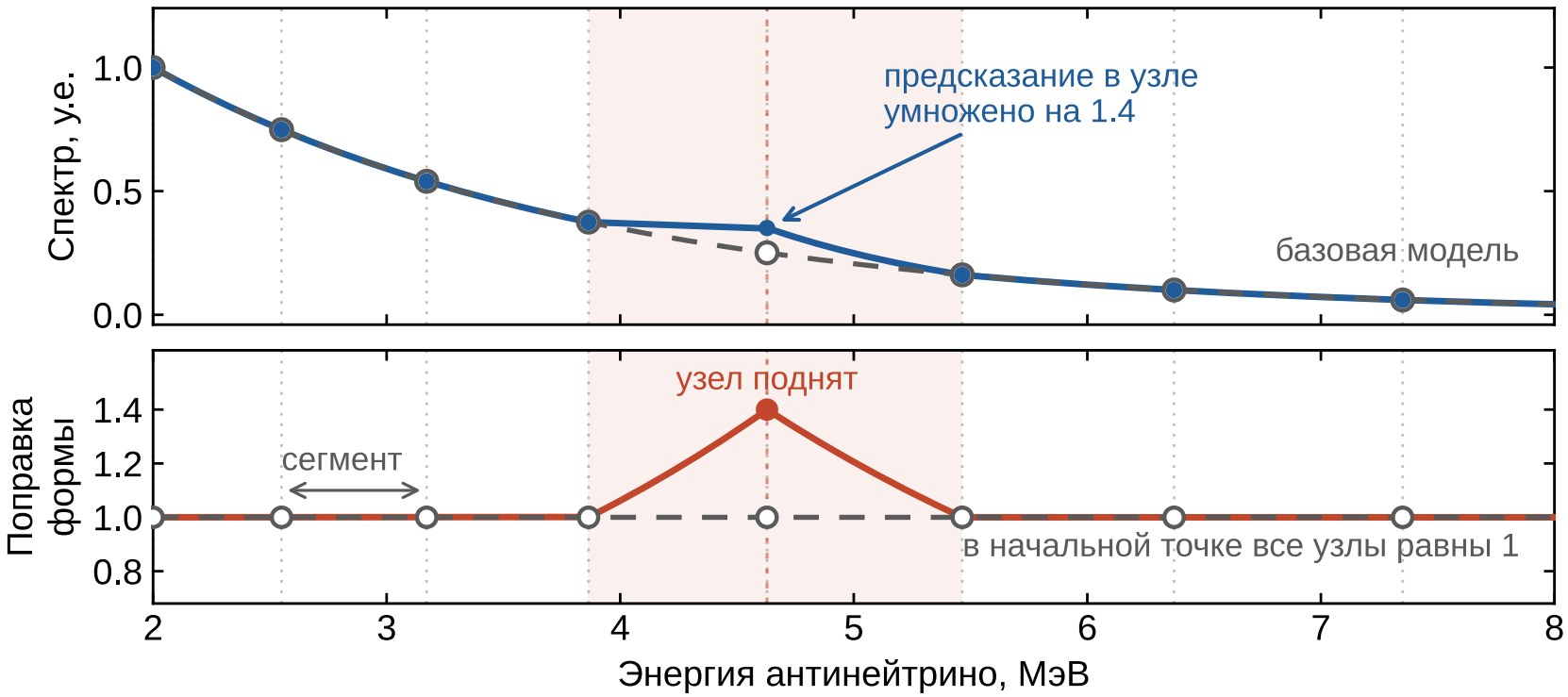
Модель ожидаемого спектра

- Начальный поток $\bar{\nu}_e$: модель Хубера-Мюллера (ХМ) + поправки (ОЯТ, неравновесная поправка)
- Вероятность выживания $\bar{\nu}_e$ в веществе с постоянной плотностью
- Сечение ОБР: приближённая формула Вогеля-Бикома (сечение в первом порядке по $1/M$)
- Нелинейность световыхода (LSNL): гашение, вклад от черенковского излучения
- Энергетическое разрешение e^+ (проектное 3% на 1 МэВ): $\sigma_{\mathrm{E}}/\mathrm{E} = \sqrt{\left(a/\sqrt{E}\right)^2 + b^2 + (c/\mathrm{E})^2}$

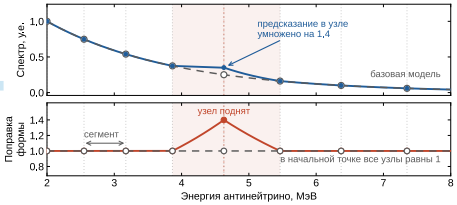


Параметризация начального спектра $\bar{\nu}_e$

- Начальный спектр каждого изотопа (ХМ) умножается на общую кусочно-гладкую кривую
- Свободные параметры подгонки: поправка к значению кривой в узлах энергетической сетки



Параметризация начального спектра $\overline{\nu}_e$



- ❖ Начальный спектр каждого изотопа (ХМ) умножается на общую кусочно-гладкую кривую
- ❖ Свободные параметры подгонки: поправка к значению кривой в узлах энергетической сетки

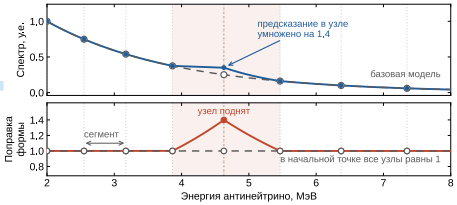
Ширину сегмента сетки ограничивают:

- Энергетическое разрешение ближнего детектора
- Статистика в ближнем детекторе

Роль ближнего детектора:

- Значения поправки общие для JUNO и TAO → от них зависят предсказания в обоих детектора и оба слагаемых χ^2
- Результат перестаёт всецело опираться на модельную форму спектра

Параметризация начального спектра $\bar{\nu}_e$



- ❖ Начальный спектр каждого изотопа (ХМ) умножается на общую кусочно-гладкую кривую
- ❖ Свободные параметры подгонки: поправка к значению кривой в узлах энергетической сетки

Ширину сегмента сетки ограничивают:

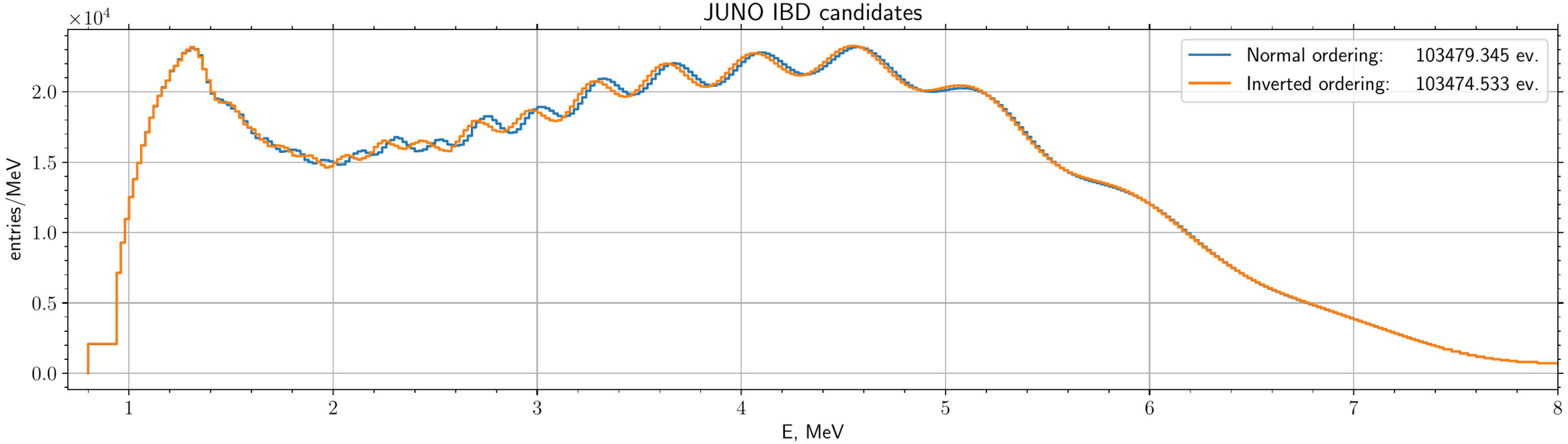
- Энергетическое разрешение ближнего детектора
- Статистика в ближнем детекторе

Роль ближнего детектора:

- Значения поправки общие для JUNO и TAO → от них зависят предсказания в обоих детектора и оба слагаемых χ^2
- Результат перестаёт всецело опираться на модельную форму спектра

- ❖ В данном анализе использовалась сетка из 150 узлов (свободных параметров)
- ❖ Ширина сегмента 30–60 кэВ, растёт с энергией и остаётся не меньше 1.5σ разрешения TAO

Проявление порядка масс в спектре



- В области 1.5–4.0 МэВ максимумы и минимумы быстрых осцилляций смещены для двух гипотез
- Величина смещения меняется с энергией
- Подгонка параметров модели не может полностью скомпенсировать смещение для неверной гипотезы → одна гипотеза описывает спектр хуже другой
- Разность функций χ^2 в минимуме служит мерой чувствительности эксперимента к порядку масс

Статистический анализ

- Анализ проводился в рамках фреквентистского подхода
- Тестовая статистика — функция хи-квадрат Пирсона

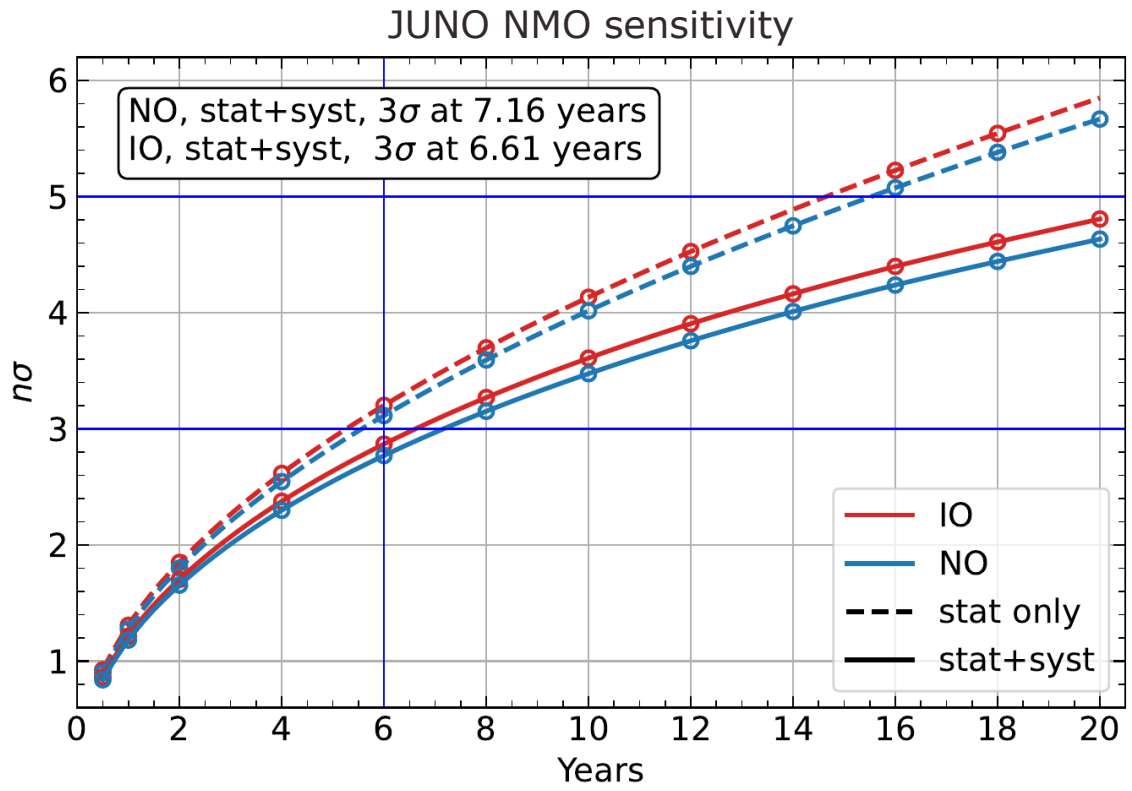
$$\chi^2(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\lambda}) = \chi^2_{\text{JUNO}}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\lambda}) + \chi^2_{\text{TAO}}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\lambda}) + \chi^2_{\text{pull}}(\boldsymbol{\eta})$$

  - $\boldsymbol{\theta}$ – свободные параметры осцилляций (Δm^2_{31}, Δm^2_{21}, $\sin^2\theta_{12}$)
  - $\boldsymbol{\eta}$ – параметры с априорными ограничениями
  - $\boldsymbol{\lambda}$ – значения поправки формы реакторного спектра в узлах сетки

- Медианная чувствительность к порядку масс нейтрино оценивается при помощи набора данных без статистических и систематических флуктуаций и задаётся как:

$$n\sigma = \sqrt{|\Delta\chi^2|} = \sqrt{\left|\min\chi^2_{\text{IO}} - \min\chi^2_{\text{NO}}\right|}$$

Чувствительность к порядку масс

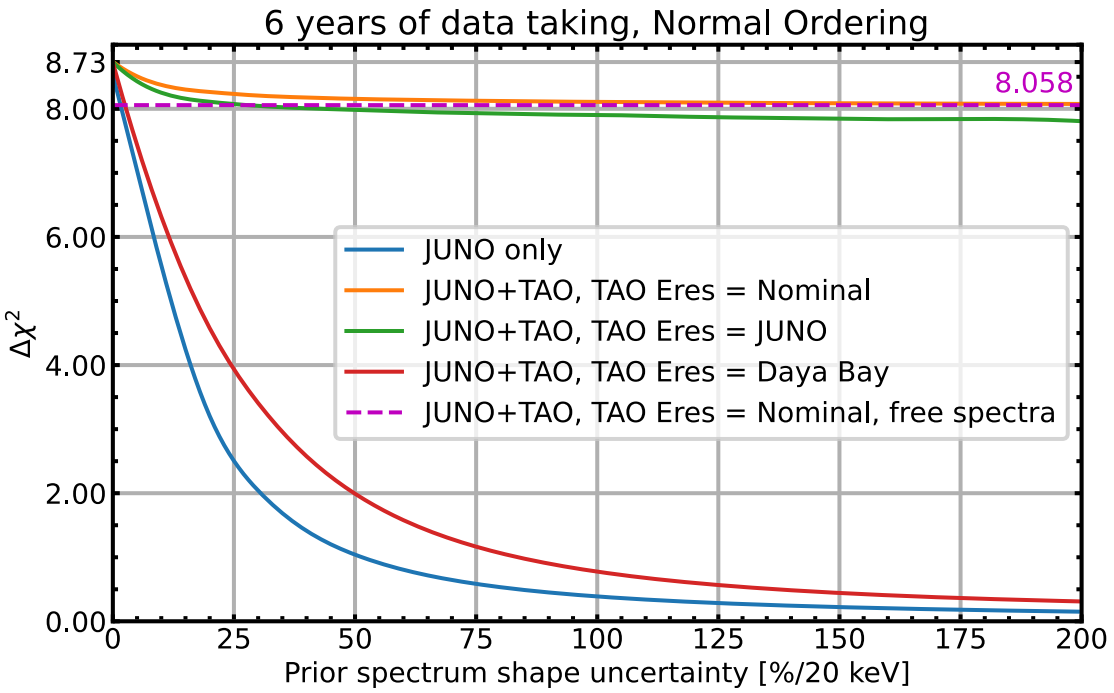


- Чувствительность 3σ достигается за 7.16 (6.61) лет в предположении нормального (обратного) порядка масс
  - Полученная оценка отвечает проектным характеристикам установки
- Основные систематические эффекты, уменьшающие чувствительность:
  - Неопределённость начальной формы $\overline{\nu}_e$
  - Фоновые процессы
  - Нелинейность энергетического отклика
  - Энергетическое разрешение

Роль ближнего детектора TAO

Чувствительность вычислена при априорной погрешности формы спектра от 0 до 200% в пересчёте на сегмент шириной 20 кэВ в нескольких конфигурациях:

- Без TAO – быстрое падение чувствительности при увеличении неопределённости на начальный спектр $\overline{\nu}_e$
- TAO с проектным разрешением – чувствительность сохраняется вне зависимости от неопределённости на начальный спектр
- TAO с энергетическим разрешением как у Daya Bay недостаточно для разрешения начального спектра → быстрое падение чувствительности при увеличении неопределённости на начальный спектр



Чувствительность к осцилляционным параметрам

Ожидаемая точность за 6 лет набора данных

Параметр	Точность	Что ограничивает чувствительность
Δm^2_{31}	2.0‰	Статистика, энергетическая шкала
Δm^2_{21}	3.4‰	Энергетическая шкала, фоны
$\sin^2\theta_{12}$	6.9‰	Нормировка потока, неопределенность эффективности детектирования

- Расщепления масс извлекаются из частоты осцилляций → их точность ограничена неопределённостью энергетической шкалы
- Угол смешивания задаёт амплитуду дефицита → важны абсолютные нормировки

Выводы: чувствительность JUNO

В рамках данной задачи получены следующие результаты:

- ❖ Значимость 3σ для порядка масс нейтрино может быть достигнута за 7.16 (6.61) лет при истинном прямом (обратном) порядке и проектных характеристиках установки
  - Основные факторы, ограничивающие чувствительность: неопределённости связанные с фоновыми процессами и нелинейностью энергетического отклика JUNO
- ❖ Осцилляционные параметры Δm^2_{31}, Δm^2_{21} и $\sin^2\theta_{12}$ будут с точностью <1% за 6 лет набора данных при проектных характеристиках установки
  - Основные факторы, ограничивающие чувствительность:
    - Δm^2_{31}: статистика, неопределённость энергетической шкалы
    - Δm^2_{21}: неопределённость энергетической шкалы, фоны
    - $\sin^2\theta_{12}$: неопределённость нормировки потока и эффективности детектирования
- ❖ Полученный результат был необходим и использован для перекрёстной проверки внутри коллаборации и служит гарантией надёжности опубликованного результата*

*JUNO Collaboration – Potential to identify neutrino mass ordering with reactor antineutrinos at JUNO – *Chin. Phys. C* 49 (2025) 033104

Осцилляционный анализ первых данных эксперимента JUNO

Задачи:

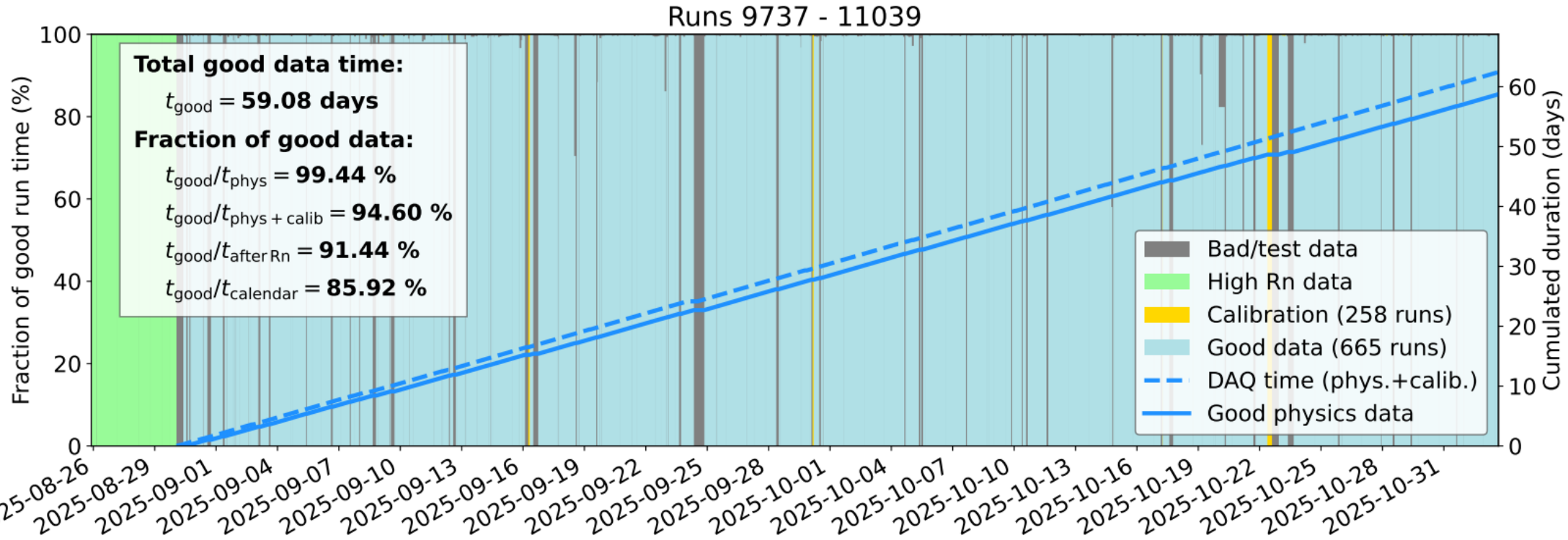
5. Адаптировать разработанный статистический инструментарий для работы с реальными данными и совместной подгонки спектров JUNO и детекторов ближних залов Daya Bay, используемых для опорного измерения формы реакторного спектра

6. Провести осцилляционный анализ первых экспериментальных данных JUNO, набранных за 58.9 дней, и измерить параметры Δm^2_{21} и $\sin^2\theta_{12}$

7. Выполнить независимую перекрёстную проверку официального результата коллаборации

Набор данных

- Продолжительность набора данных: 26 августа 2025 — 2 ноября 2025
- 59.08 дня набора физических данных



Отбор событий и фоны

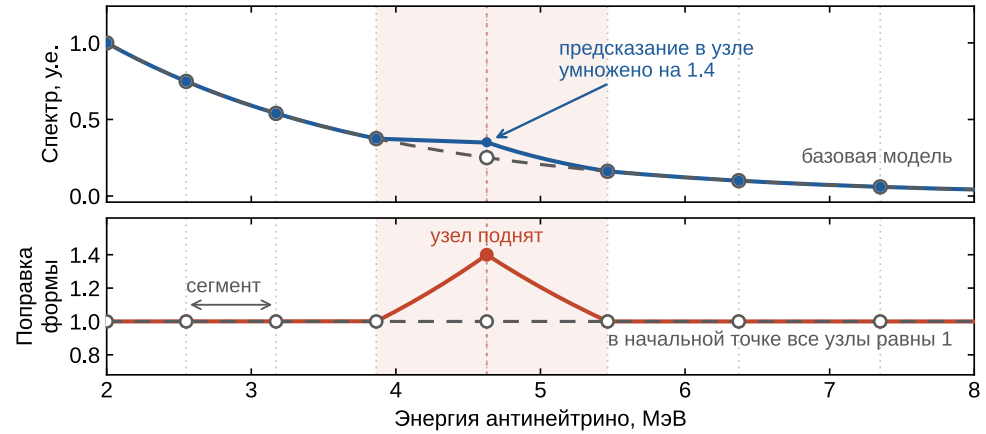
- Отбор событий проводился в рабочей группе докладчика средствами ПО JUNO SNiPER и использовался как входные данные для анализа
- Основные характеристики отбора:

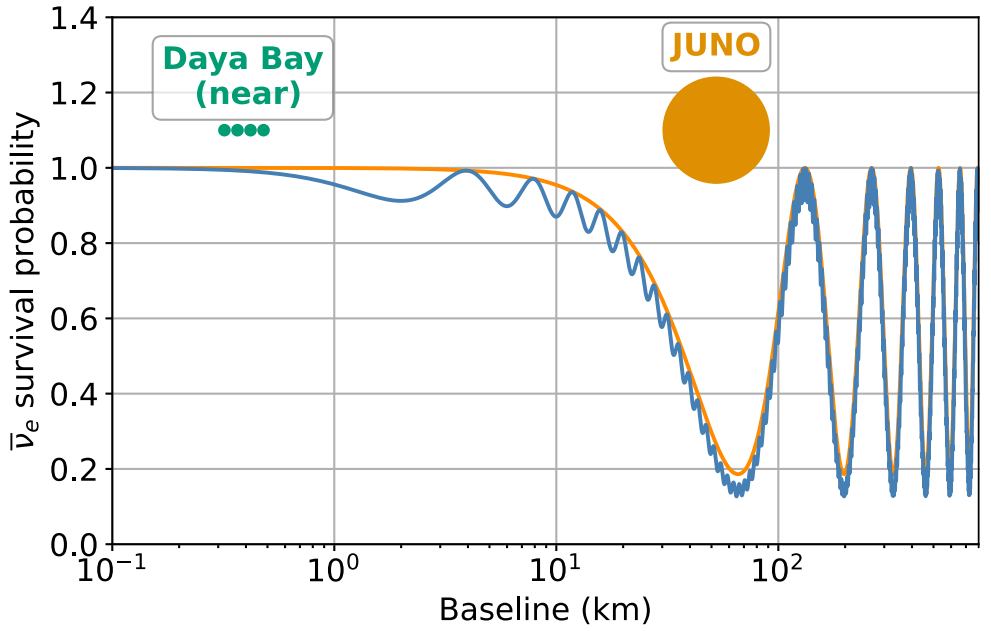
Характеристика	**Значение**
Кандидаты ОБР	2398
Живое время (livetime)	58.9 дня
Доверительный объём	R < 16.5 м
Полная эффективность, %	69.7 ± 1.5
Соотношение сигнал/фон	5.54

- Основные источники фоновых событий: ^{9}Li/^{8}He, геонейтрино, дальние реакторы

Ограничение на начальный спектр $\overline{\nu}_e$

- Совместная подгонка данных JUNO и ближних детекторов Daya Bay
  - Для Daya Bay использовались открытые данные и модель, разработанная в ЛЯП*
- Тот же подход к параметризации, что и в оценке чувствительности
- Поправка к форме начального спектра задана 22 свободными параметрами
  - Энергетическое разрешение Daya Bay хуже, чем у TAO → необходимо использовать меньшее количество сегментов
  - Ширина сегмента от 0.2 до 0.5 МэВ — вдвое больше энергетического разрешения Daya Bay





*Daya Bay Collaboration – (2025) – "Full Data Release of the Daya Bay Reactor Neutrino Experiment" – Zenodo

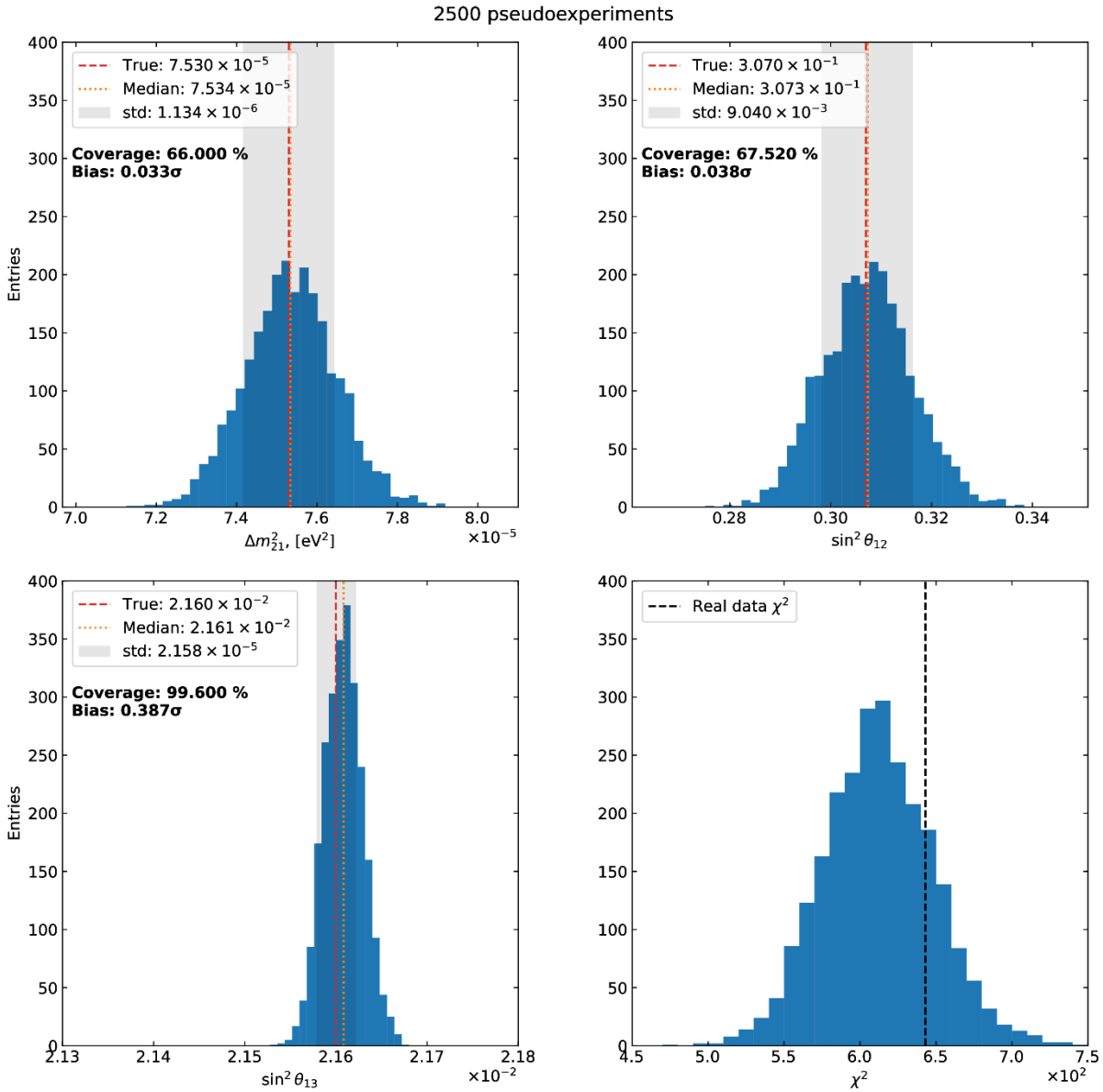
Статистический анализ

- Анализ проводился в рамках фреквентистского подхода
- Тестовая статистика — комбинированная функция хи-квадрат Неймана и Пирсона

$$\chi^2(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\lambda}) = \chi^2_{\text{CNP,JUNO}}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\lambda}) + \chi^2_{\text{CNP,Daya Bay near}}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\lambda}) + \chi^2_{\text{pull}}(\boldsymbol{\eta})$$

  - $\boldsymbol{\theta}$ – свободные параметры осцилляций (Δm^2_{21} и $\sin^2\theta_{12}$)
  - $\boldsymbol{\eta}$ – параметры с априорными ограничениями
  - $\boldsymbol{\lambda}$ – значения поправки формы реакторного спектра в узлах сетки
- Всего 206 параметров подгонки:
  - 24 свободных (Δm^2_{21}, $\sin^2\theta_{12}$, значения поправки начальной формы спектра в 22 узлах сетки)
  - 182 ограниченных (69 у JUNO, 107 у Daya Bay, 6 общих)
    - Δm^2_{31} ограничен измерением коллаборации Daya Bay

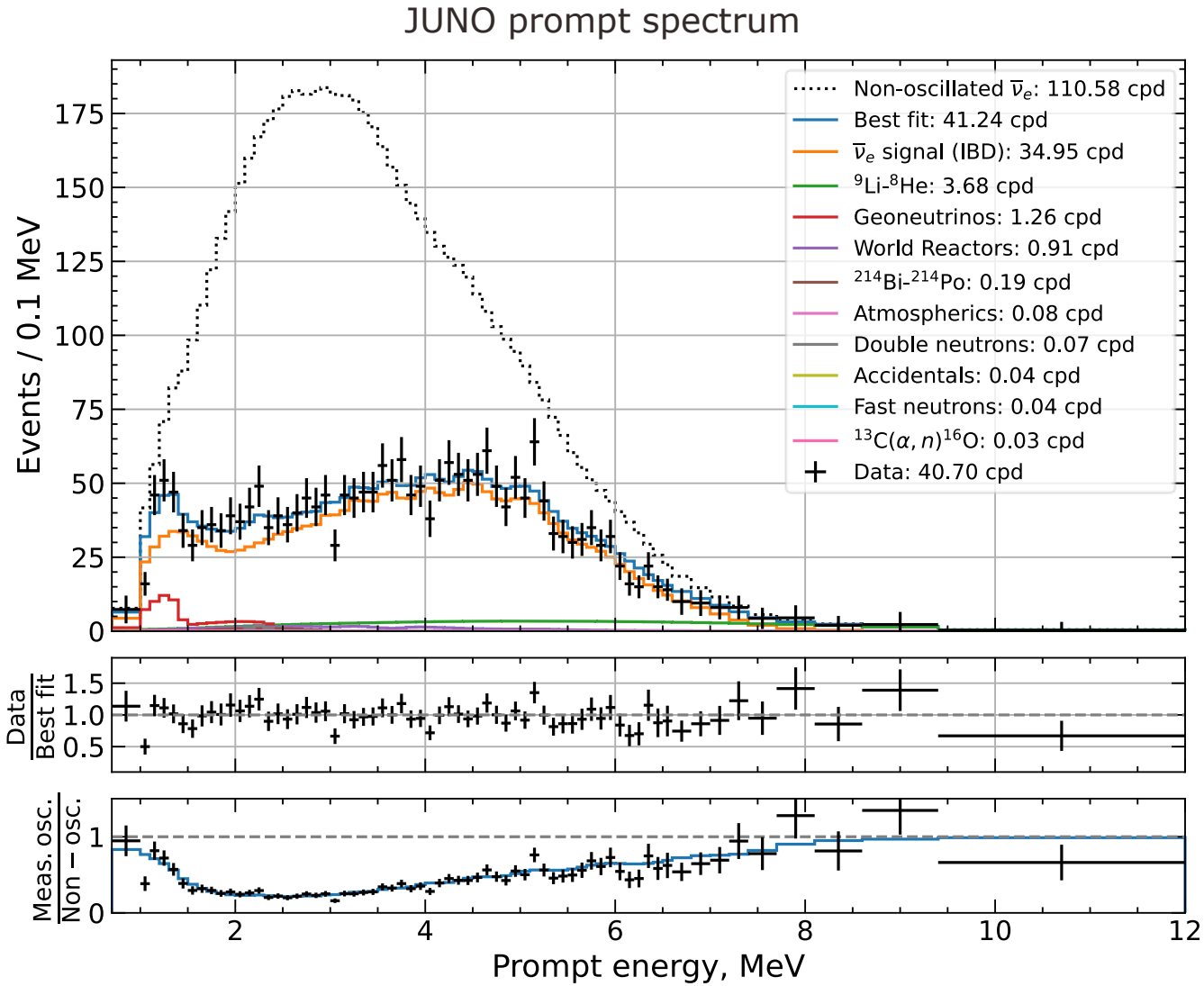
Проверка процедуры стат. анализа



Ансамбль из 2500 псевдоэкспериментов:

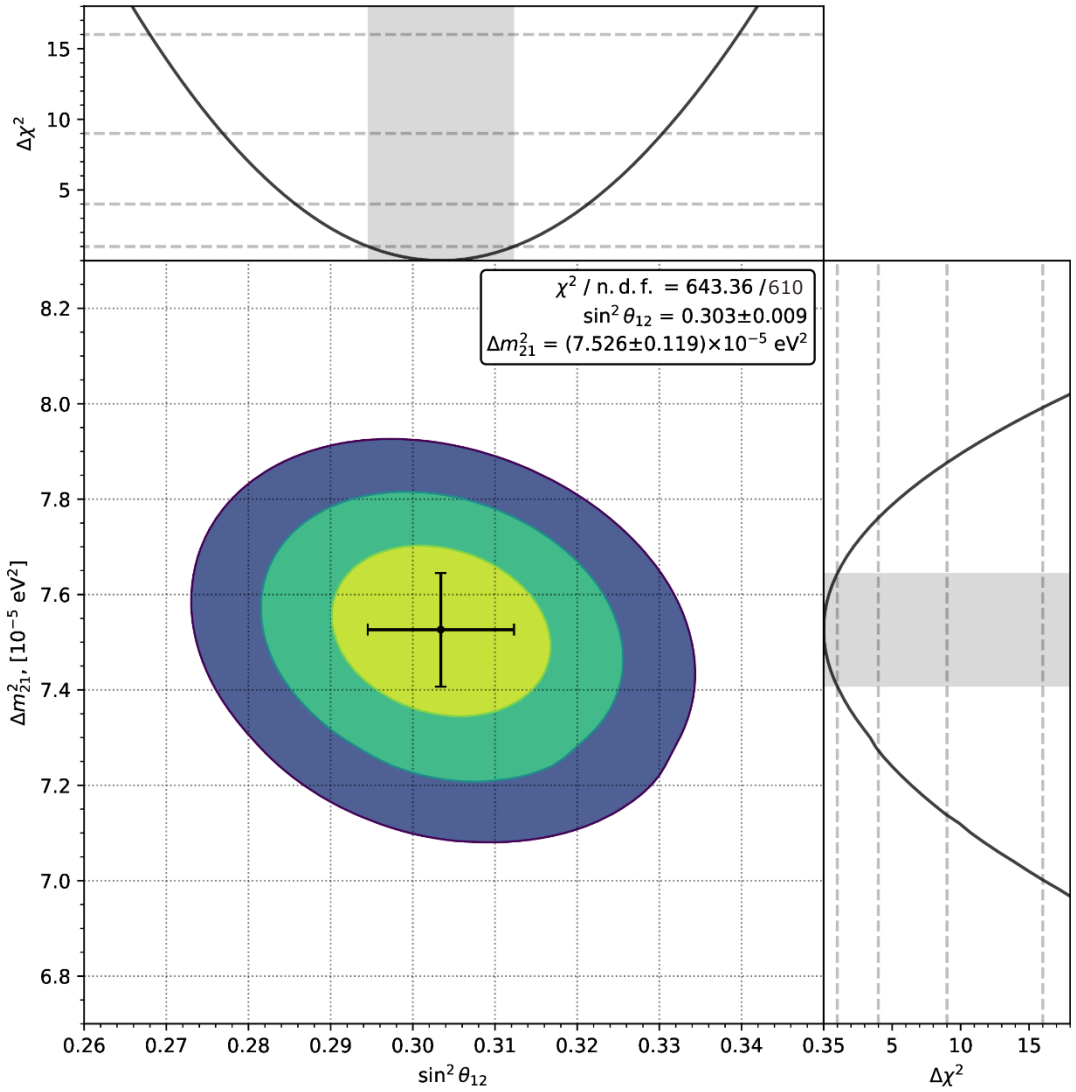
- Систематические и статистические флуктуации разыграны по нормальному распределению
- Медианы подгоночных распределений воспроизводят заложенные значения
- Смещение целевых параметров в пределах 0.04σ
- Статистическое покрытие 66.0% для Δm^2_{21} и 67.5% для $\sin^2\theta_{12}$
  - Незначительное отклонение от номинальных 68.3%
- Покрытие 99.6% для $\sin^2\theta_{13}$
  - Ожидаемо большое, так как $\sin^2\theta_{13}$ ограничен штрафным членом и настоящий анализ к нему не чувствителен

Спектр данных и подогнанная модель



- $\chi^2/\mathrm{n.d.f.} = 643.3/610 = 1.05$
- Скорости счёта:
  - Данные: 40.70 соб./день
  - Подгонка: 41.24 соб./день
- Осцилляционный дефицит достигает наибольшей силы в области 2.0–2.5 МэВ

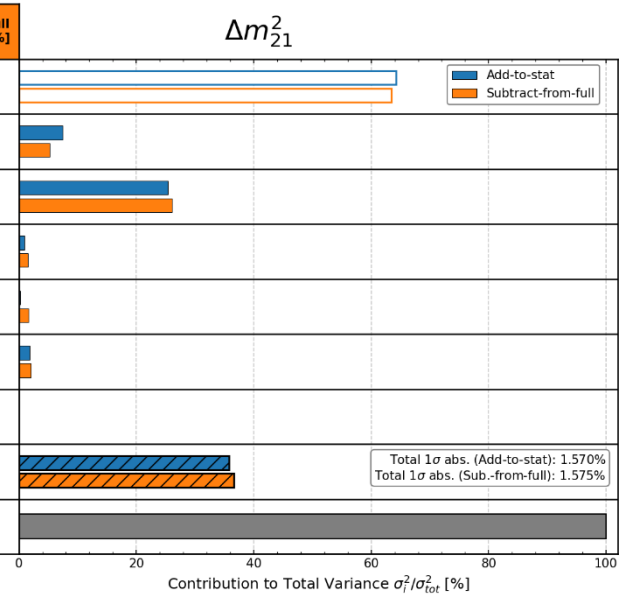
Результаты подгонки



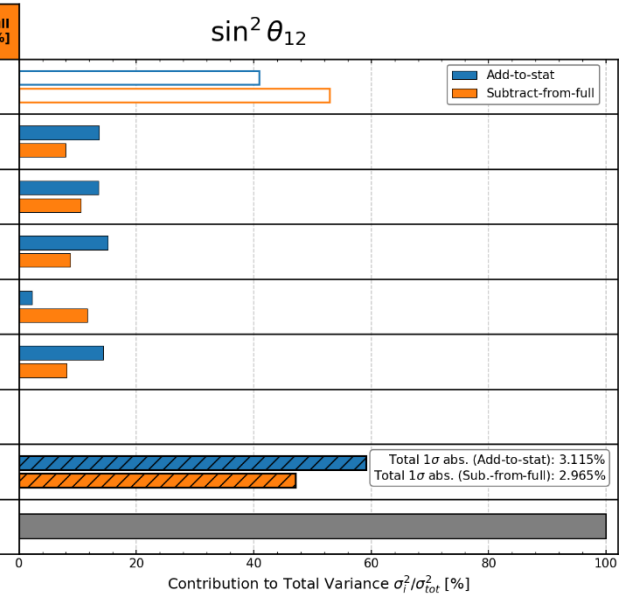
- Полученные осцилляционные параметры в предположении нормального порядка масс нейтрино:
  - $\Delta m^2_{21} = (7.526 \pm 0.119) \times 10^{-5}$ эВ^2 (1.6%)
  - $\sin^2\theta_{12} = 0.303 \pm 0.009$ (3.0%)
- Коэффициент линейной корреляции между Δm^2_{21} и $\sin^2\theta_{12}$: $\rho = -0.17$
- Различие между двумя предположениями о порядке масс пренебрежимо на фоне текущих погрешностей

Вклад систематических неопределённостей

Source	Add-to-stat Variance Frac. [%]	Subtract-from-full Variance Frac. [%]
Statistics	64.19	63.42
Daya Bay (All) & $\bar{\nu}_e$ spectrum shape	7.48	5.23
Backgrounds (JUNO)	25.38	26.05
Selection efficiency (JUNO)	0.94	1.56
Energy Model (JUNO)	0.19	1.68
Reactor (JUNO)	1.81	2.05
MSW Effect (JUNO)	0.01	0.01
Total Syst.	35.81	36.58
Total	**100.00**	

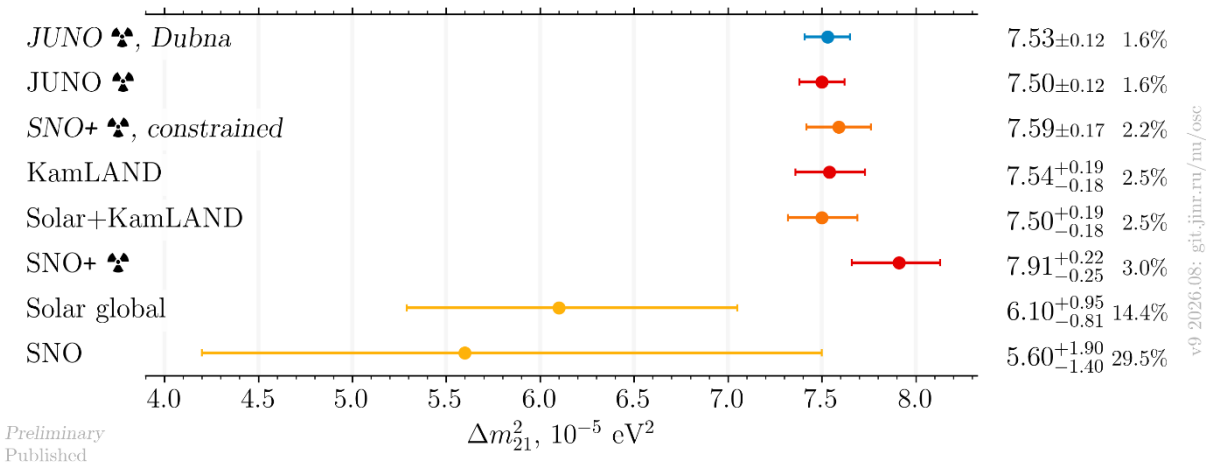


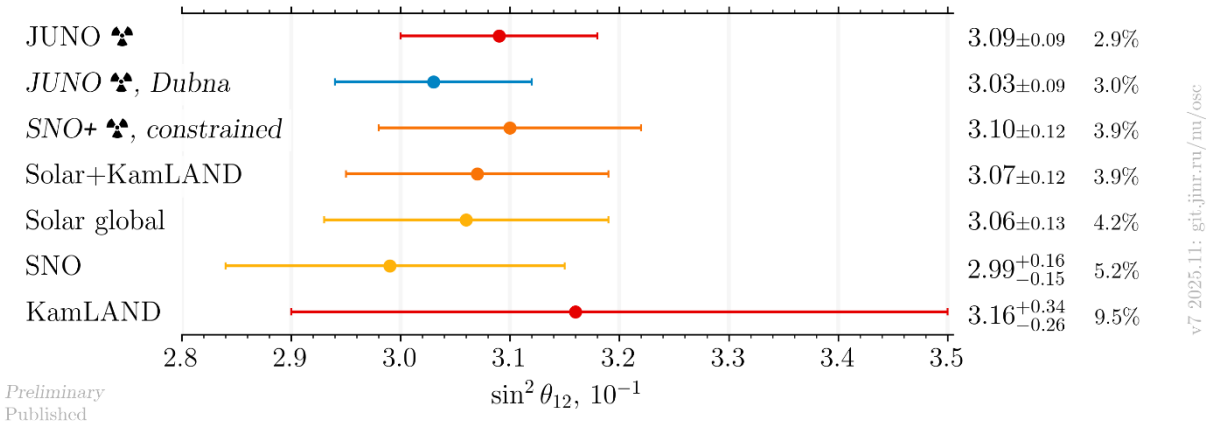
Source	Add-to-stat Variance Frac. [%]	Subtract-from-full Variance Frac. [%]
Statistics	40.91	52.89
Daya Bay (All) & $\bar{\nu}_e$ spectrum shape	13.63	7.92
Backgrounds (JUNO)	13.59	10.55
Selection efficiency (JUNO)	15.20	8.80
Energy Model (JUNO)	2.23	11.66
Reactor (JUNO)	14.39	8.13
MSW Effect (JUNO)	0.04	0.05
Total Syst.	59.09	47.11
Total	**100.00**	



- Точность обоих параметров ограничена статистикой. Её вклад в квадрат ошибки:
  - Около 64% для Δm^2_{21}
  - Около 50% для $\sin^2\theta_{12}$
- Среди систематик для Δm^2_{21} выделяется неопределённость фона JUNO: ~25%
- Дальнейший набор данных будет уменьшать статистическую ошибку

Сравнение с предшествующими измерениями





- Первый результат JUNO обладает наилучшей точностью к Δm^2_{21} и $\sin^2\theta_{12}$ среди экспериментов
- Два маркера JUNO — официальный результат коллаборации и независимая оценка автора
- Отличие между результатом `JUNO` и `JUNO, Dubna` обусловлено различиями в
  - Реконструкции энергии
  - Отборе событий ОБР и фонов
  - Параметризации отклика детектора
- С теми же входными данными, что и в официальном анализе, различие не превышает 0.05σ по обоим параметрам

Выводы: первый осцилляционный анализ JUNO

- Получена независимая оценка на осцилляционные параметры в предположении нормального порядка масс нейтрино:
  - $\Delta m^2_{21} = (7.525 \pm 0.119) \times 10^{-5}\ \mathrm{eV}^2\ (1.6\%)$
  - $\sin^2\theta_{12} = 0.303 \pm 0.009\ (3.0\%)$
- Показано, что статистическая неопределённость вносит доминирующий вклад в полную неопределённость на параметры Δm^2_{21} и $\sin^2\theta_{12}$
- Полученные оценки являются наилучшими среди всех нейтринных экспериментов
- Полученный результат был необходим и использован для перекрёстной проверки внутри коллаборации и служит гарантией надёжности опубликованного результата*

*JUNO Collaboration – Measurement of reactor neutrino oscillation with the first JUNO data – *Nature* 654 (2026) 343–348.

Заключение

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты отбора событий ОБР и оценки фона случайных совпадений на полном наборе данных эксперимента Daya Bay

2. Оценка долговременной пространственной и временной стабильности отклика антинейтринных детекторов Daya Bay

3. Оценка чувствительности эксперимента JUNO к определению порядка масс нейтрино

4. Оценка чувствительности эксперимента JUNO к осцилляционным параметрам Δm^2_{21}, Δm^2_{31}, $\sin^2 2\theta_{12}$ и $\sin^2 2\theta_{13}$

5. Результаты осцилляционного анализа параметров $\sin^2\theta_{12}$ и Δm^2_{21} по первым экспериментальным данным установки JUNO

Публикации по теме диссертации

1. F. P. An, …, **D. Dolzhikov**, … (Daya Bay Collaboration) – "Precision Measurement of Reactor Antineutrino Oscillation at Kilometer-Scale Baselines by Daya Bay" – *Phys. Rev. Lett.* 130 (2023) 161802*

2. A. Abusleme, …, **D. Dolzhikov**, … (JUNO Collaboration) – Potential to identify neutrino mass ordering with reactor antineutrinos at JUNO – *Chin. Phys. C* 49 (2025) 033104*

3. **D. Dolzhikov –** JUNO's Sensitivity to Neutrino Mass Ordering (on behalf of the JUNO Collaboration) – *Phys. Part. Nucl. Lett.* 22 (2025) 1125–1128.

4. A. Abusleme, …, **D. Dolzhikov**, … (JUNO Collaboration) – Measurement of reactor neutrino oscillation with the first JUNO data – *Nature* 654 (2026) 343–348*

* Значительный личный вклад автора, подтверждён письмами руководителей коллабораций JUNO и Daya Bay

Апробация результатов

1. 43rd International Symposium on Physics in Collision (PIC 2024) – “JUNO's Physics with Reactor Antineutrinos” – Athens, Greece – NCSR “Demokritos” – 2024

2. The 28th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024) – “JUNO's Sensitivity to Neutrino Mass Ordering” – Dubna, Russia – JINR – 2024

3. Сессии-конференции секции ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук, посвящённой 70-летию со дня рождения академика РАН Валерия Анатольевича Рубакова – “Эксперимент JUNO: перспективы осцилляционного анализа реакторных антинейтрино” – Москва, Россия – 2024

4. 61st International School of Subnuclear Physics – “GNA Statistical Analysis Software and Its Application in JUNO” – Erice, Italy – 2025

5. XXXI International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2024) – “JUNO’s Sensitivity to Neutrino Mass Ordering” – Milan, Italy – University of Milano-Bicocca, University of Milano, INFN – 2024

6. 57, 59 и 62 сессии ПКК по физике частиц ОИЯИ – Дубна, Россия – 2023, 2024, 2026

7. 139-й сессии Учёного совета ОИЯИ – “First JUNO results on the solar oscillation parameters” – Дубна, Россия – 2026

8. Собрания и рабочие совещания коллабораций Daya Bay и JUNO

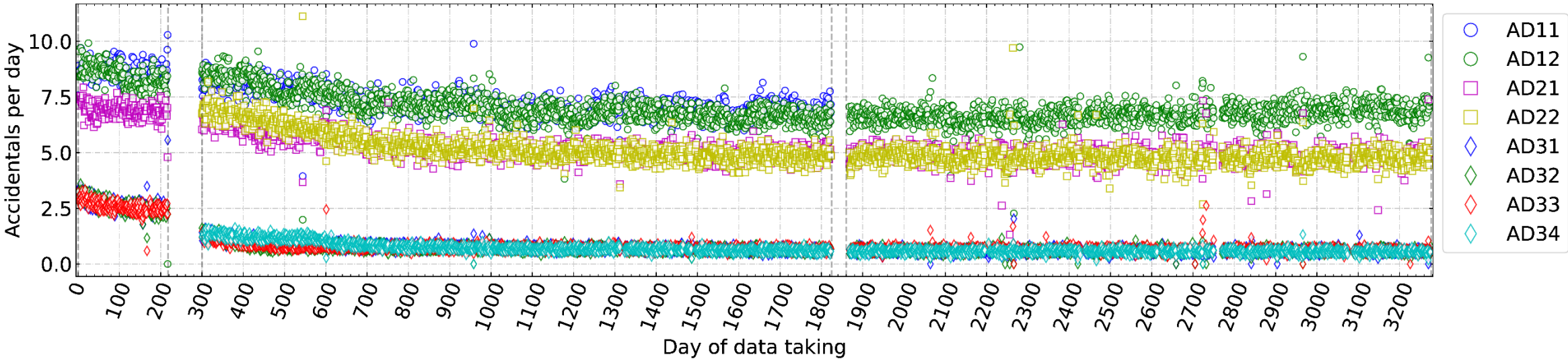
Backup

Отбор в Daya Bay

Скорость счёта фона случайных совпадений

Скорость счёта случайных совпадений:

$$R_{acc} = R_d \cdot \underbrace{P(1, R_p, 200\,\mu s)}_{\text{Один кандидат в мгновенные сигналы в интервале } 200\mu s \text{ перед запаздывающим сигналом}} \cdot \underbrace{P(0, R_{\bar{p}}, 200\,\mu s)}_{\text{Отсутствие в этом } 200\mu s \text{ окне фоновых сигналов}} \cdot \underbrace{P(0\ R_{p+}, 200\,\mu s)}_{\text{Отсутствие дополнительных сигналов в окне от } 400\mu s \text{ до } 200\mu s \text{ перед запаздывающим сигналом}} \cdot \underbrace{P(0, R_h, 200\,\mu s)}_{\text{Отсутствие дополнительных сигналов в окне } 200\mu s \text{ после запаздывающего сигнала}},$$



Сводная таблица по отбору событий ОБР в Daya Bay*

	EH1-AD1	EH1-AD2	EH2-AD1	EH2-AD2	EH3-AD1	EH3-AD2	EH3-AD3	EH3-AD4
N_{all}	818201	1487182	1358706	1246722	197461	197911	195787	183160
N_{IBD}	804103.28	1462296.27	1340540.39	1229943.75	194139.21	194739.58	192602.39	180537.86
N_{bkg}	14097.72	24885.73	18165.61	16778.25	3321.79	3171.42	3184.61	2622.14
Livetime [days]	1535.1178	2686.1111	2689.8774	2502.8135	2689.3807	2689.3807	2689.3807	2501.7441
Effective livetime [days]	1224.6037	2135.6419	2235.5930	2078.1944	2590.5717	2590.5544	2589.9689	2410.1867
ε_μ	0.9779657	0.9784248	0.9792077	0.9791114	0.9794123	0.9794357	0.9793910	0.9794099
ε_{m}	0.8156996	0.8126002	0.8487610	0.8480580	0.9835078	0.9834777	0.9833002	0.9836562
$\varepsilon_\mu \cdot \varepsilon_{\text{m}}$	0.7977262	0.7950682	0.8311133	0.8303433	0.9632596	0.9632531	0.9630354	0.9634026
Effective IBD rate [1/day] (backgrounds subtracted)	656.6233 ± 0.9728	684.7104 ± 0.8793	599.6353 ± 0.6812	591.8329 ± 0.6964	74.9407 ± 0.1798	75.1729 ± 0.1789	74.3647 ± 0.1778	74.9062 ± 0.1837
Accidentals [1/day]	7.3620 ± 0.0736	7.0341 ± 0.0703	5.2330 ± 0.0523	5.0832 ± 0.0508	0.8337 ± 0.0083	0.8059 ± 0.0081	0.8276 ± 0.0083	0.6925 ± 0.0069
Fast neutrons and muon-x [1/day]	0.9330 ± 0.1866	1.4559 ± 0.2912	0.6966 ± 0.1393	0.7779 ± 0.1556	0.1127 ± 0.0225	0.0889 ± 0.0178	0.0734 ± 0.0147	0.0752 ± 0.0150
AmC [1/day]	0.1658 ± 0.0773	0.1362 ± 0.0599	0.1197 ± 0.0563	0.1124 ± 0.0462	0.0454 ± 0.0220	0.0397 ± 0.0163	0.0440 ± 0.0213	0.0308 ± 0.0100
Li9/He8 [1/day]	2.9700 ± 0.5940	2.9700 ± 0.5940	2.0400 ± 0.4080	2.0400 ± 0.4080	0.2540 ± 0.0381	0.2540 ± 0.0381	0.2540 ± 0.0381	0.2540 ± 0.0381
Alpha-N [1/day]	0.0812 ± 0.0400	0.0564 ± 0.0307	0.0364 ± 0.0200	0.0600 ± 0.0300	0.0364 ± 0.0200	0.0357 ± 0.0200	0.0307 ± 0.0157	0.0354 ± 0.0200

*таблица для полного периода набора данных

Доли событий ОБР

- Доли событий ОБР в каждой части детекторов определены как:

$$F_{\text{voxel}}^{\text{ibd}} = \frac{N_{\text{voxel}}^{\text{ibd}}}{N_{\text{total}}^{\text{ibd}}},$$

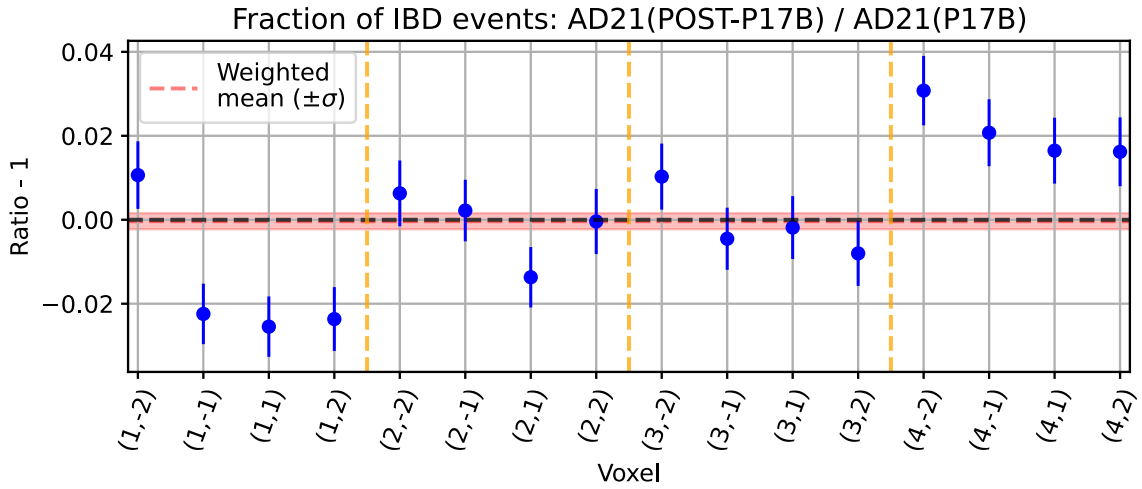
  - $N_{\text{voxel}}^{\text{ibd}}$ – количество событий ОБР в конкретной части детектора
  - $N_{\text{voxel}}^{\text{total}}$ – полное количество событий ОБР в детекторе

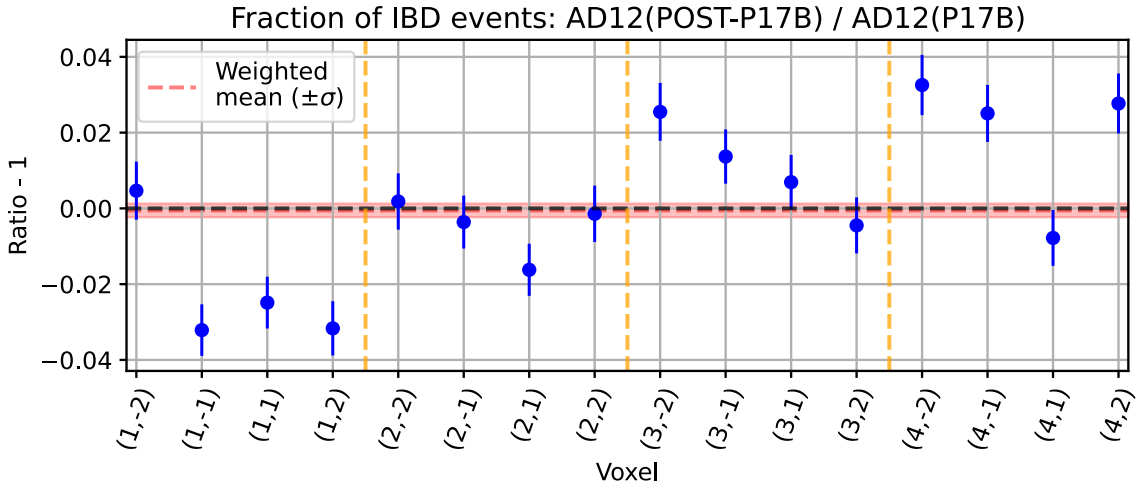
- Исследование данной характеристики позволяет:

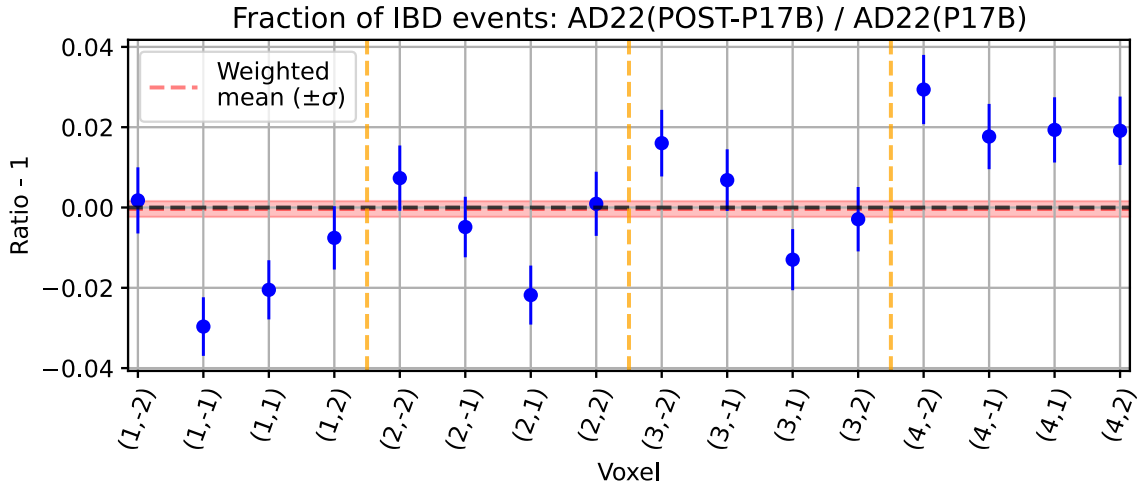
  - Подтвердить пространственную однородность мишени и стабильность алгоритмов реконструкции координат в пределах всего доверительного объема детектора

Доли событий: ближние детекторы

Детектор AD11 не набирал данные в периоде `post-P17B`



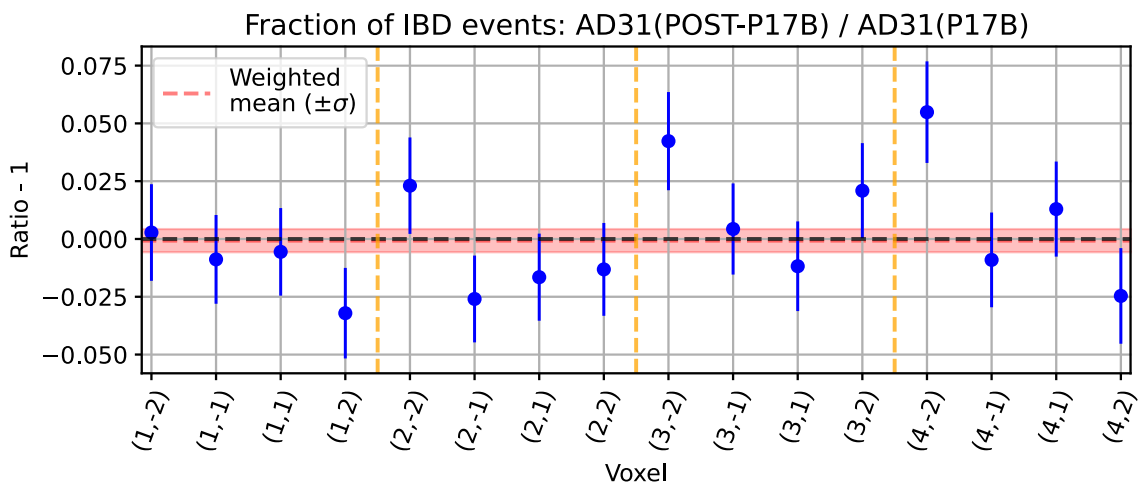


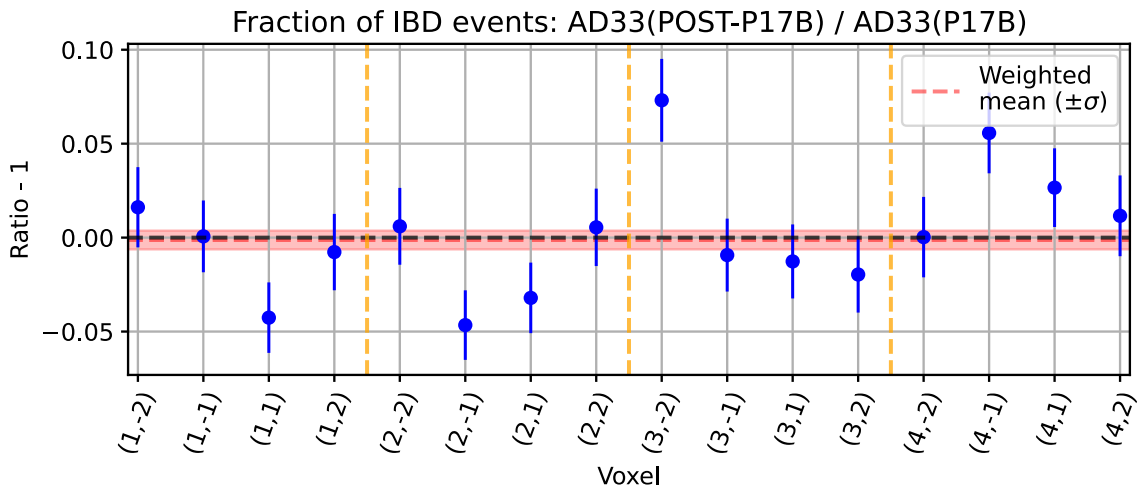


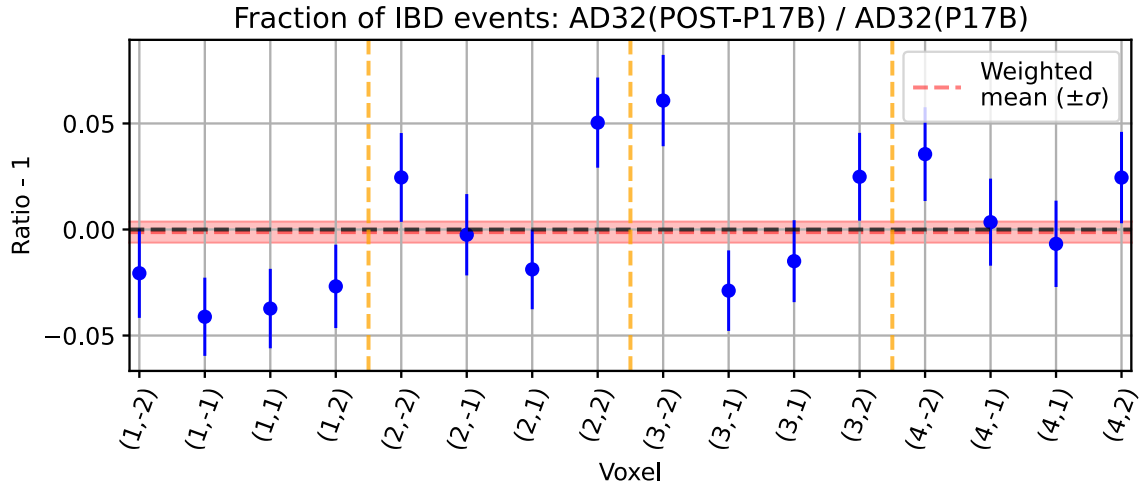
Наблюдаются флуктуации порядка 4%

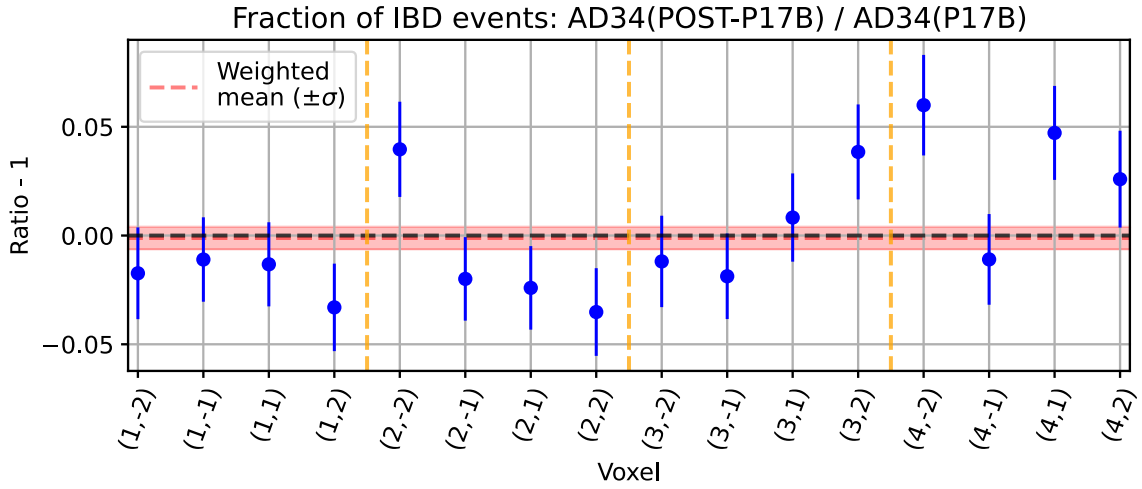
В среднем показатели в пределах статистической неопределённости

Доли событий: дальние детекторы









Наблюдаются флуктуации порядка 8%

В среднем показатели в пределах статистической неопределённости

Время захвата нейтрона на Gd

❖ Для определения времени захвата нейтрона на Gd:

1. Для каждой части детекторов была сформирована гистограмма с временем Δt между мгновенным и отложенным сигналом

2. Полученные гистограммы подгонялись экспоненциальной моделью:

$$f(\Delta t, \tau, n) = ne^{-\Delta t/\tau}$$

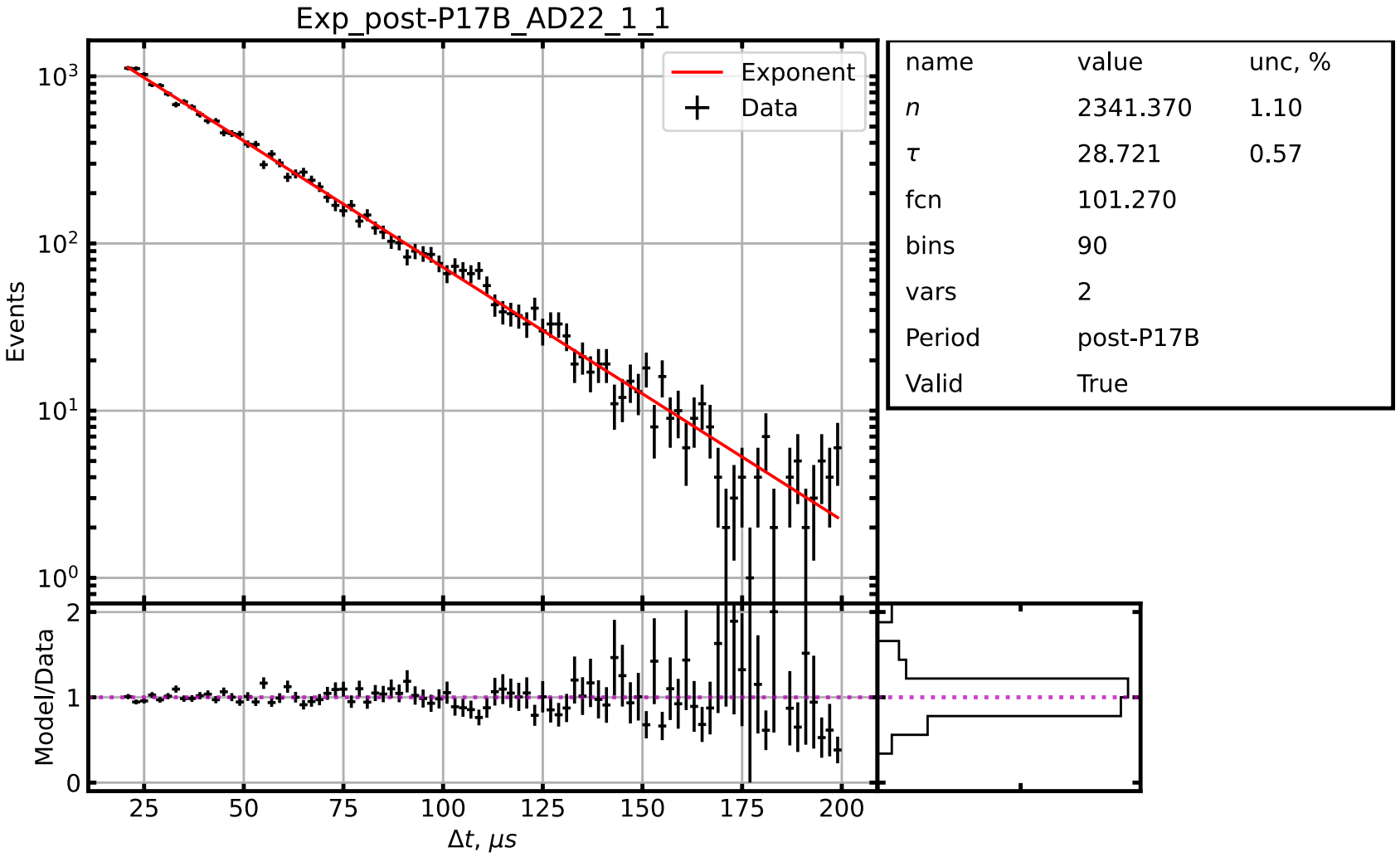
- τ – время захвата нейтрона на Gd
- n – нормировочный множитель

❖ Исследование данной характеристики позволяет:

- Проконтролировать стабильность концентрации гадолиния по всему объему мишени
- Исключить влияние локальных процессов старения на систематическую погрешность измерений

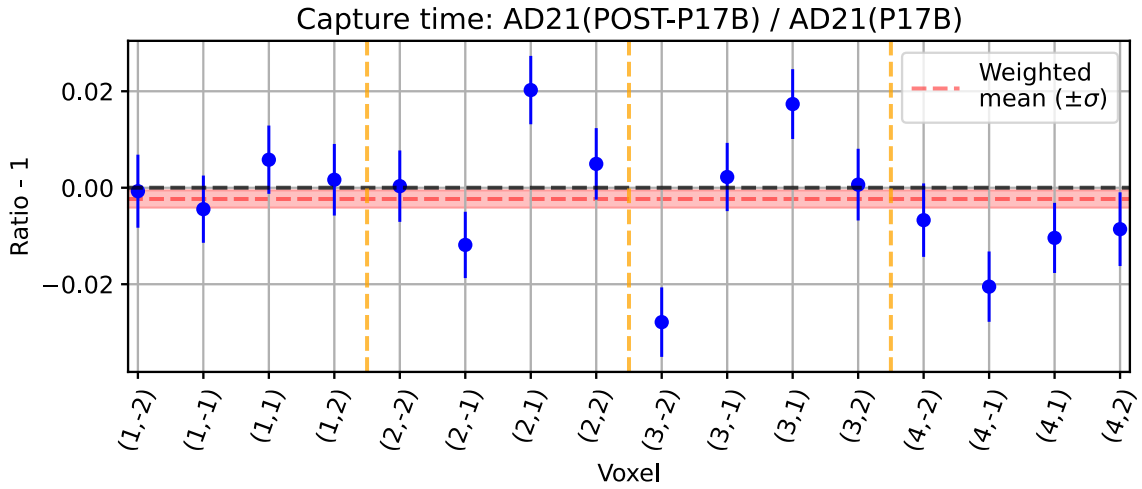
Захват нейтрона: пример

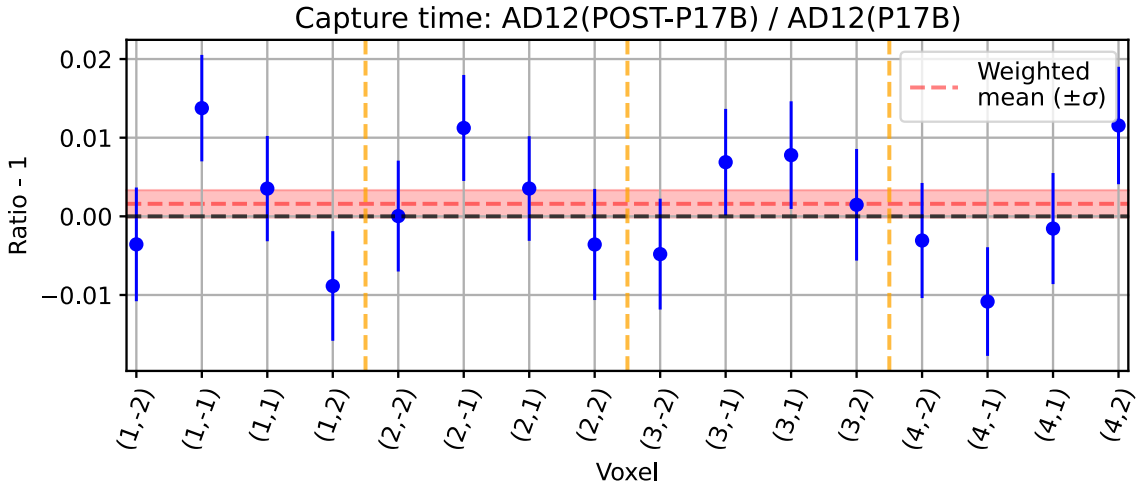
Пример гистограммы и подогнанной функции

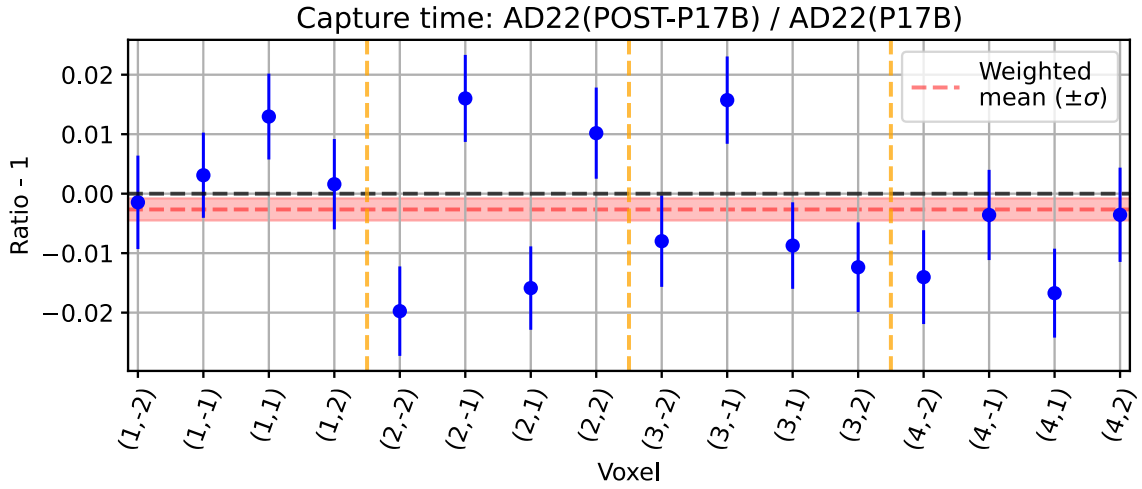


Захват нейтрона: ближние детекторы

Детектор AD11 не набирал данные в периоде `post-P17B`



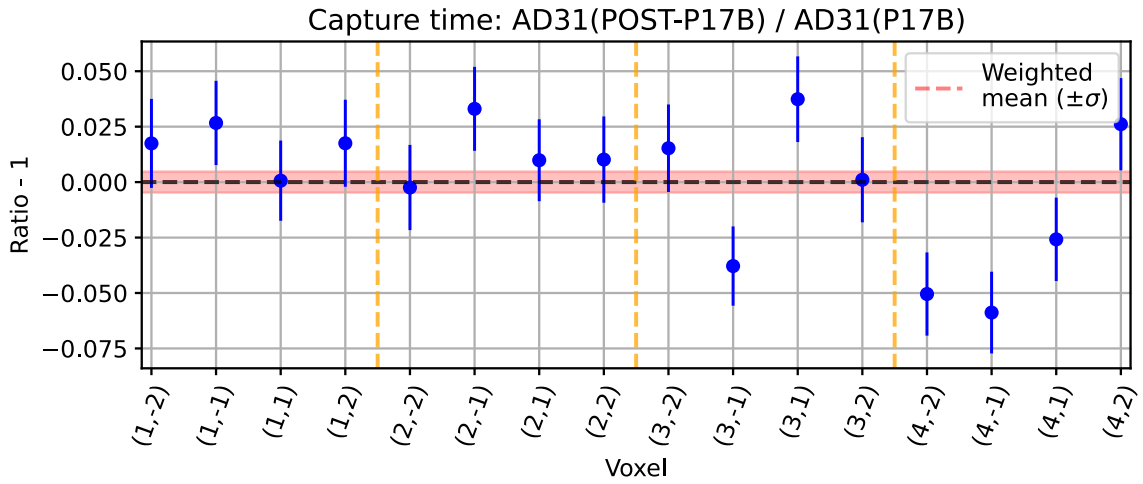


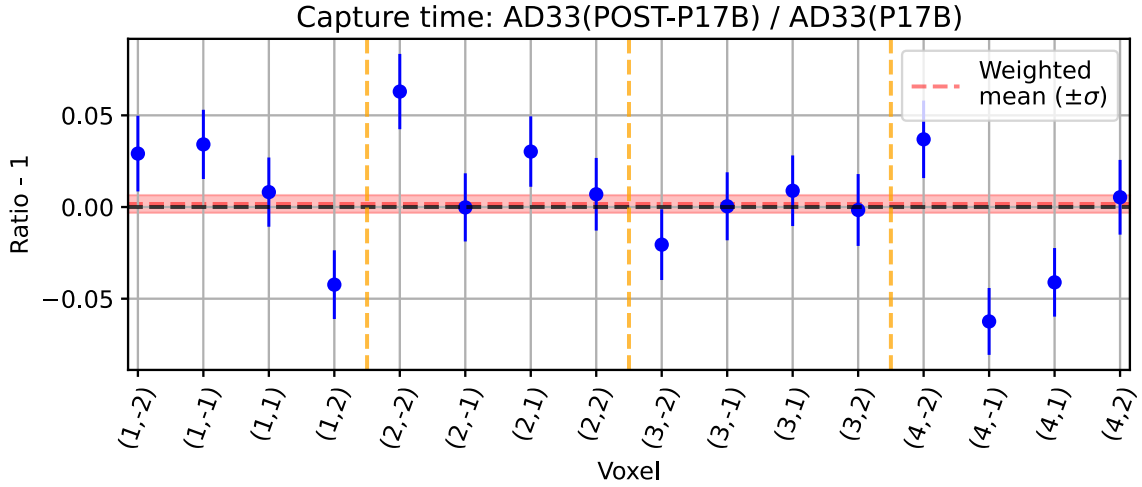


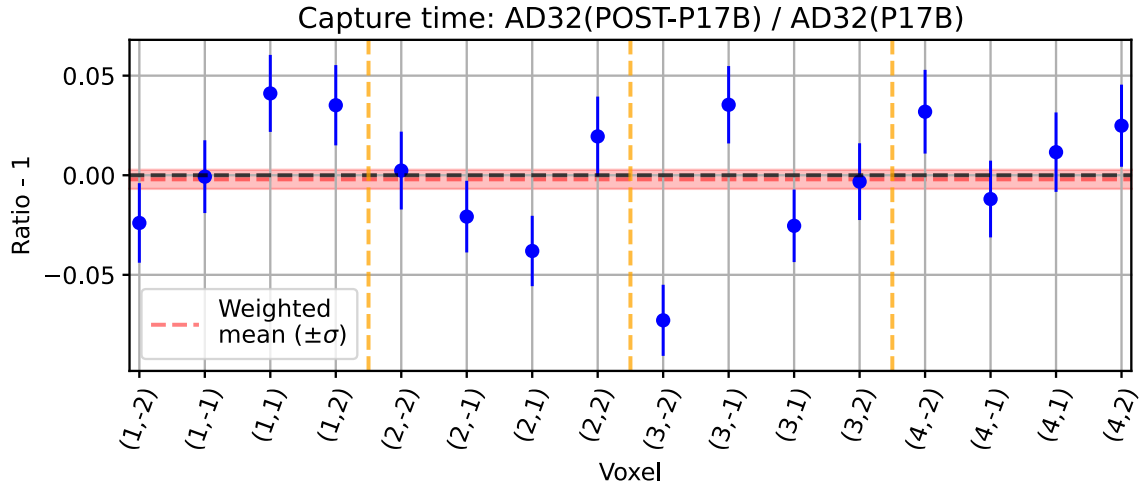
Наблюдаются флуктуации порядка 3%

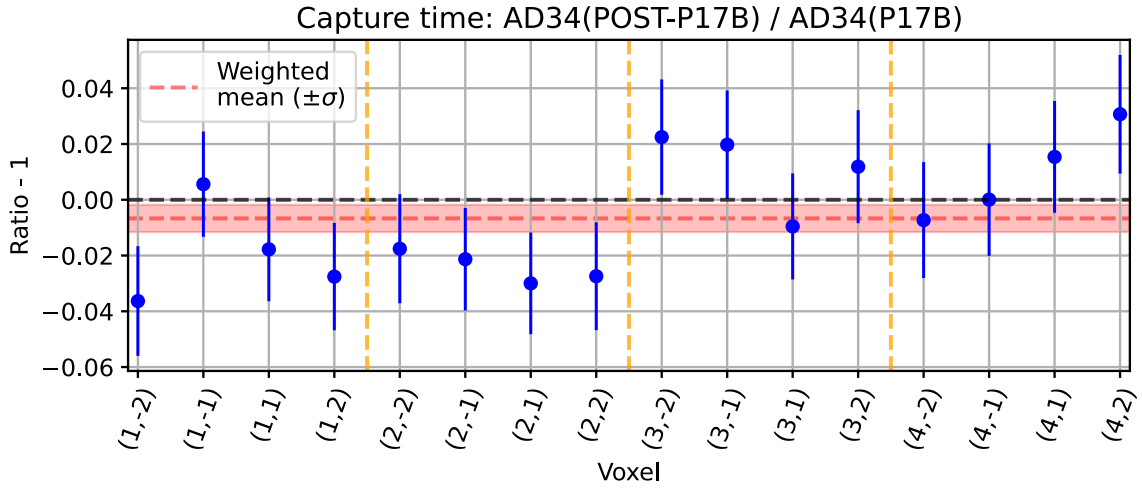
В среднем наблюдается незначительная сдвижка порядка 0.2%

Захват нейтрона: дальние детекторы







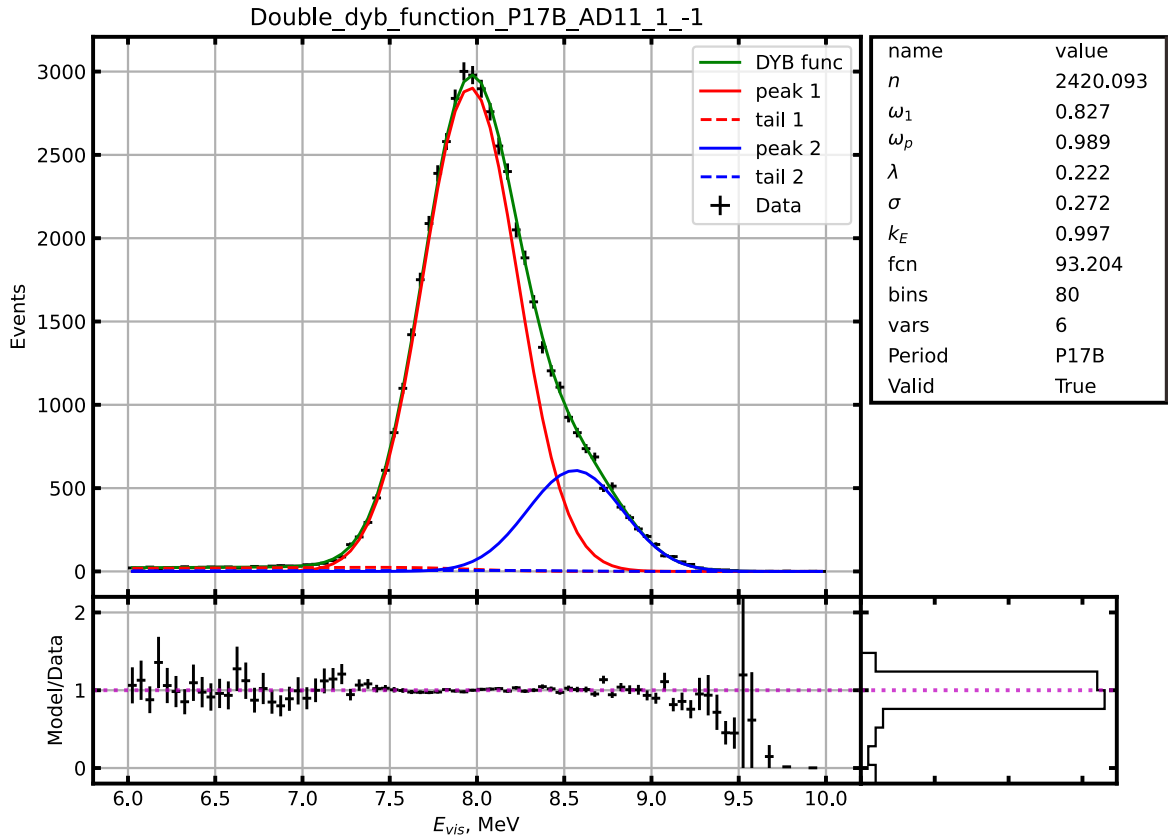


Наблюдаются флуктуации порядка 5%

Для AD34 в среднем наблюдается сдвижка порядка 0.7%

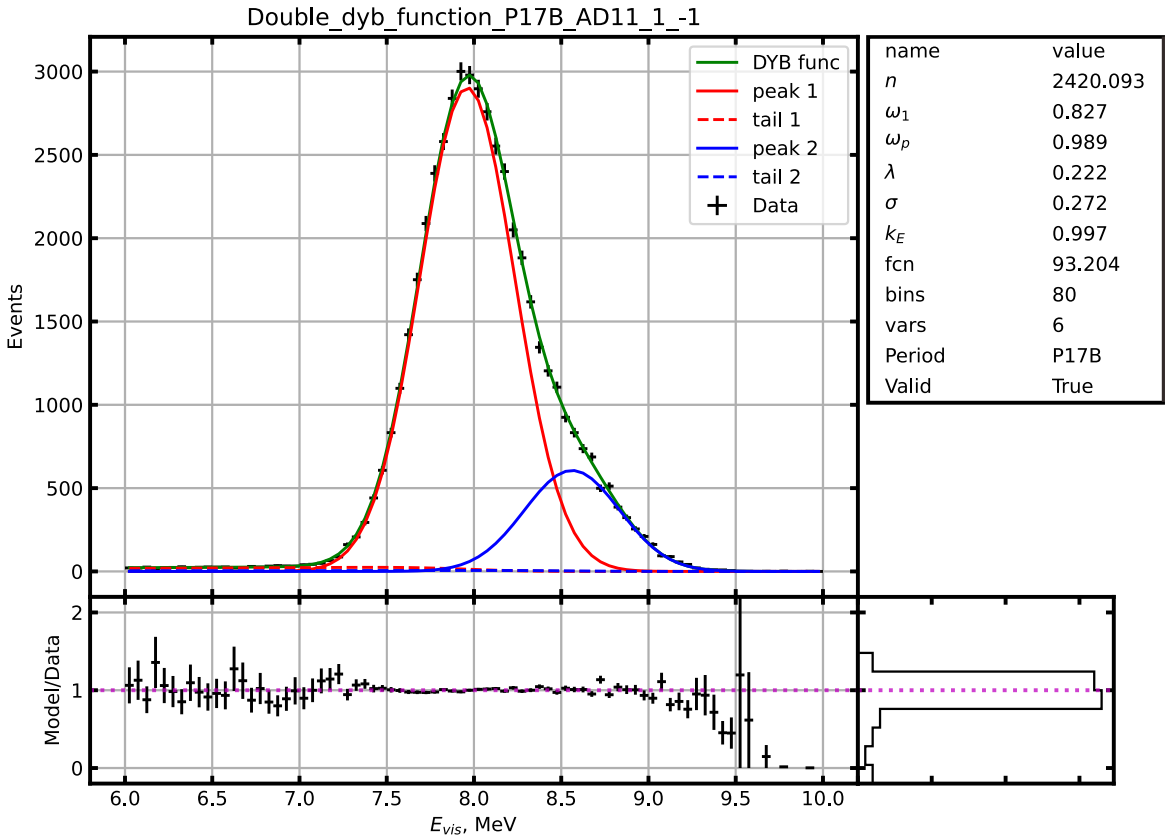
Энергетическая шкала и разрешение

- Для определения энергетической шкалы и разрешения:
  - Для каждой части детектора строилась гистограмма реконструированной энергии запаздывающих событий E_{vis} (в диапазоне от 6 до 12 МэВ)
  - Распределения подгонялись моделью отклика: суперпозицией сигналов от ^{157}Gd (7.94 МэВ) и ^{155}Gd (8.54 МэВ)
  - Полное поглощение энергии в сцинтилляторе описывалось гауссовыми пиками
  - Утечка энергии (рассеяние γ-квантов в материале акрилового сосуда) моделируется экспонентой



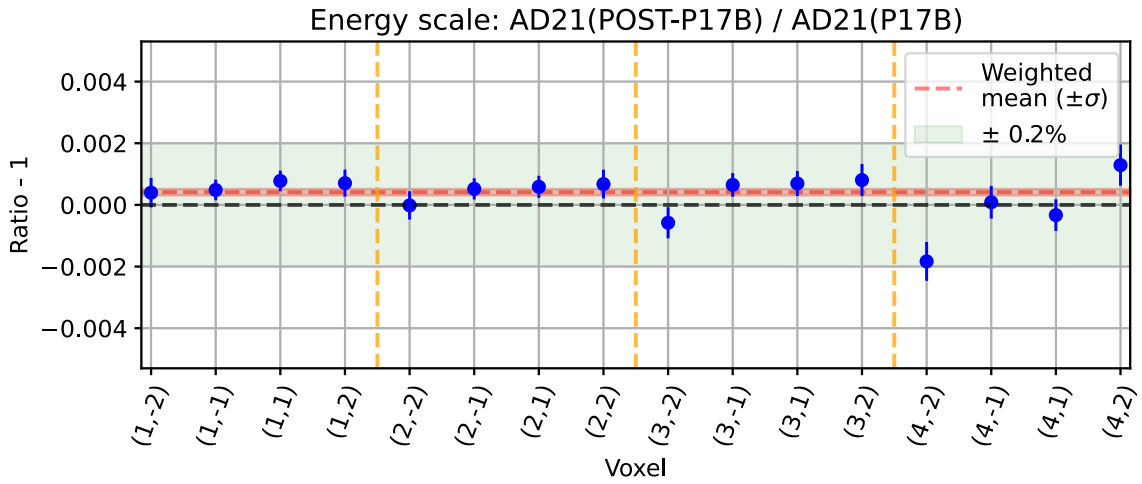
Энергетическая шкала и разрешение

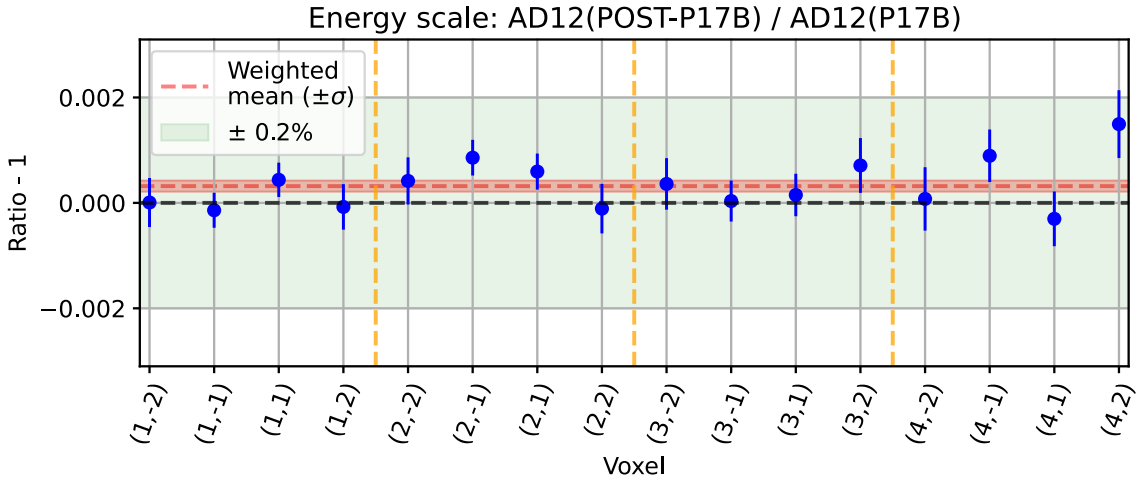
- Целевые извлекаемые параметры:
  - k_E – параметр сдвига энергетической шкалы ($E_{\text{true}} = k_E E_{\text{vis}}$)
  - σ – локальное энергетическое разрешение
- Исследование энергетической шкалы и разрешения:
  - Оценить стабильность оптических свойств среды (в первую очередь, прозрачности сцинтиллятора) с течением времени
  - Отслеживать пространственную однородность светосбора и стабильность вклада электронных шумов

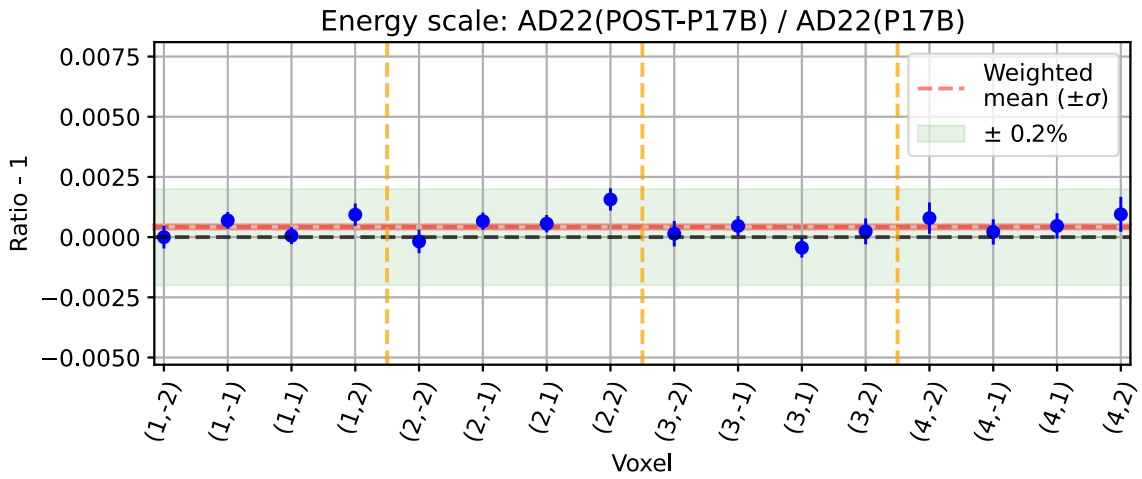


Энергетическая шкала: ближние детекторы

Детектор AD11 не набирал данные в периоде `post-P17B`

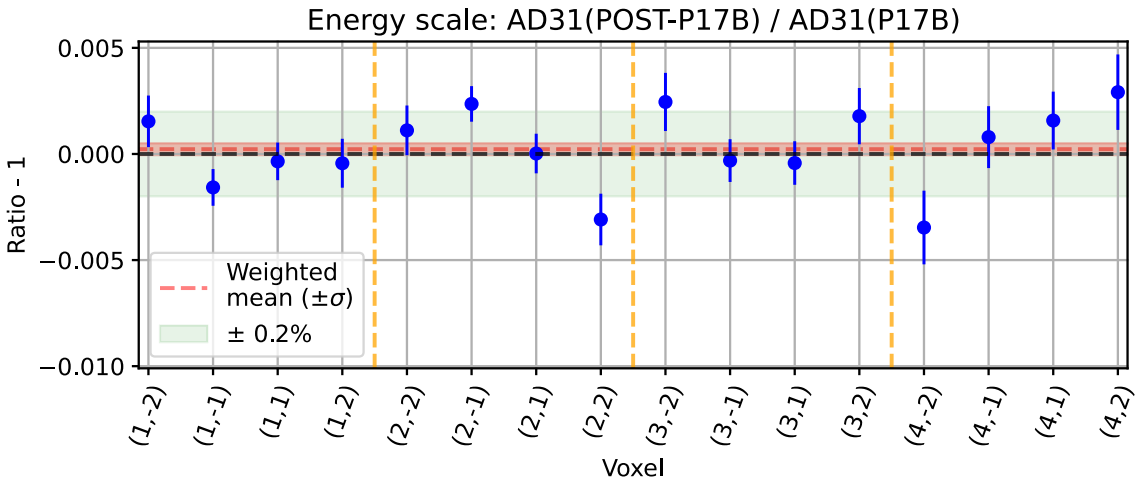


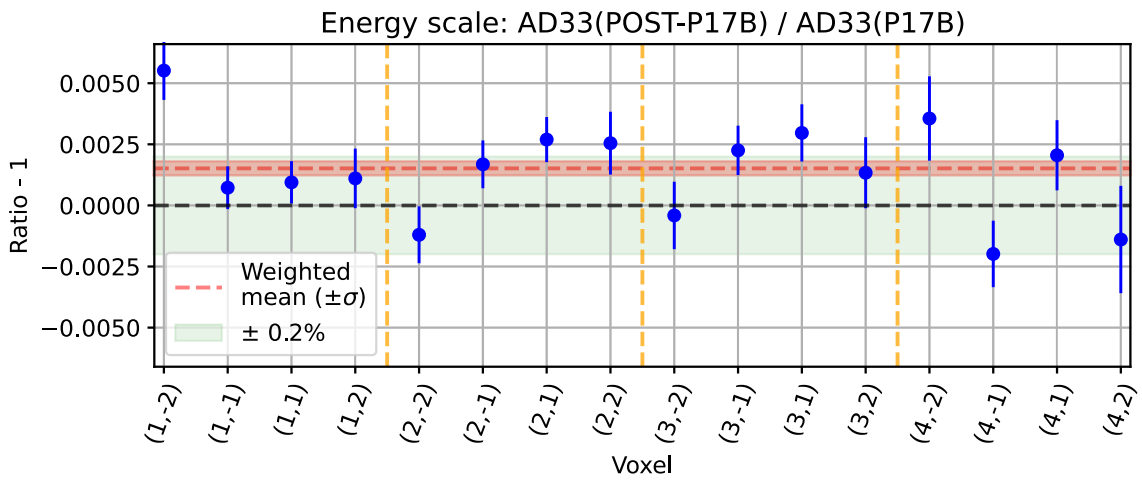


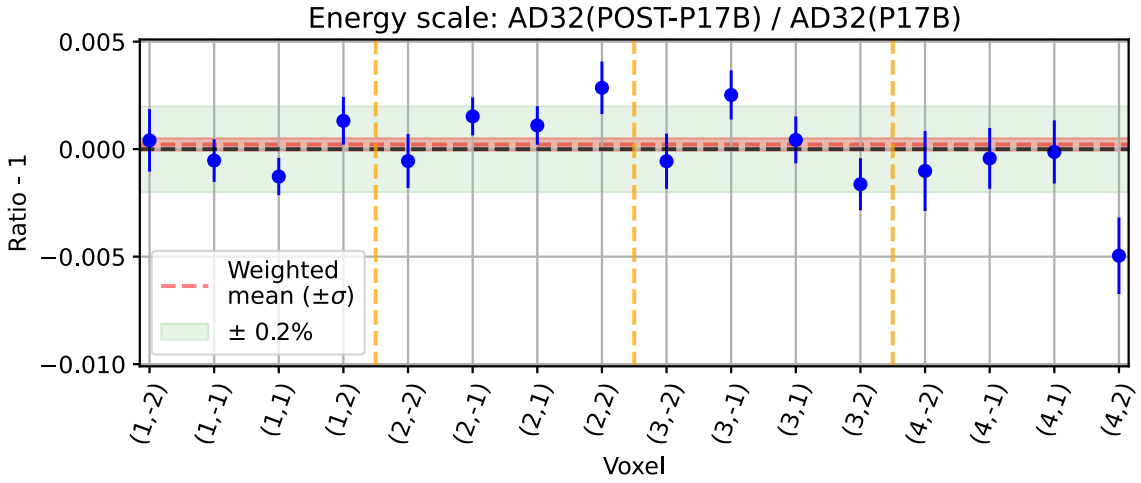


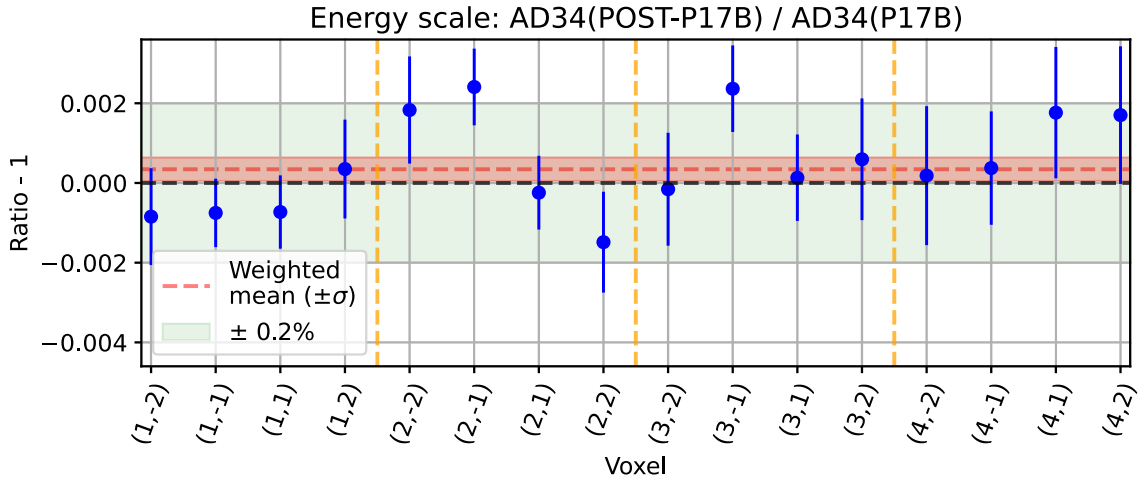
Изменение энергетической шкалы в среднем в пределах 0.2%

Энергетическая шкала: дальние детекторы





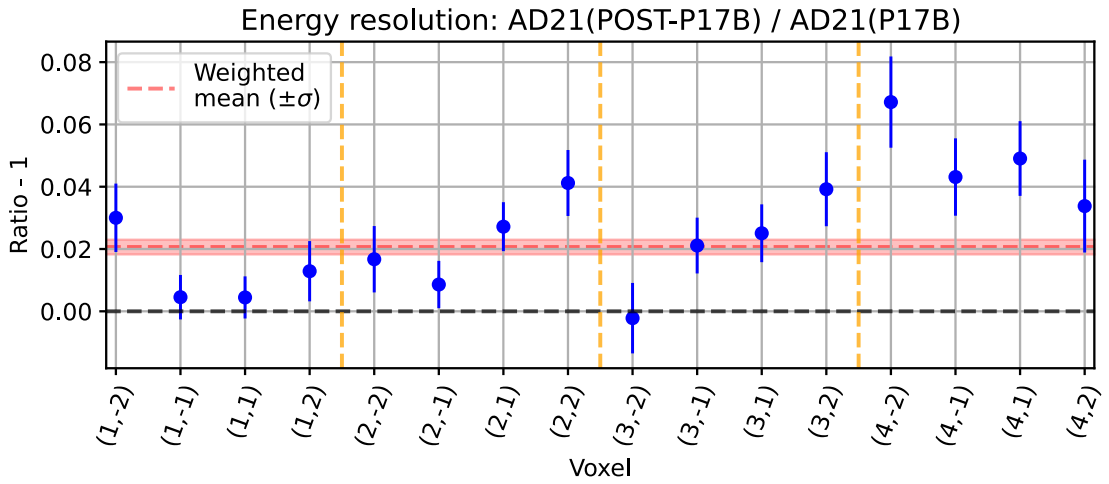


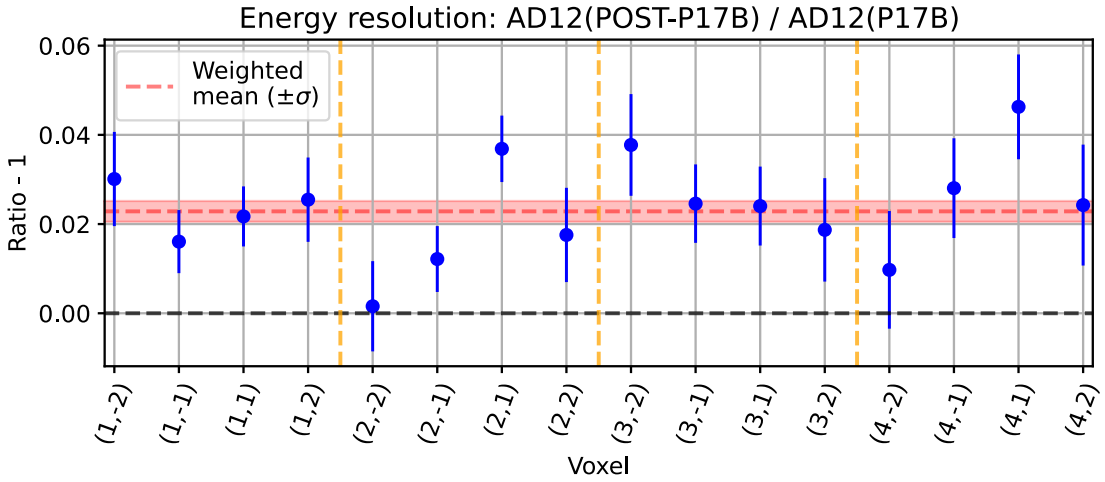


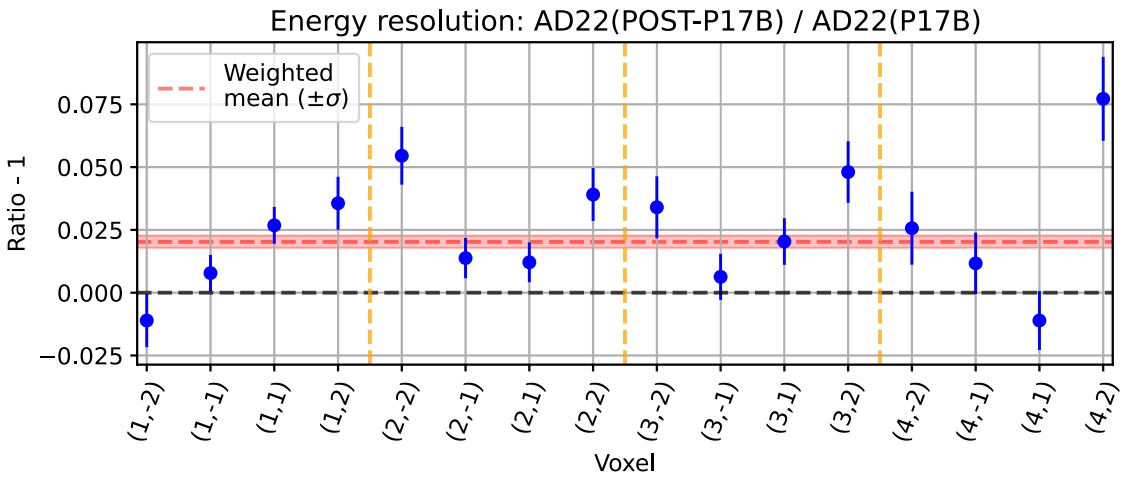
Изменение энергетической шкалы в среднем в пределах 0.2%

Энергетическое разрешение: ближние детекторы

Детектор AD11 не набирал данные в периоде `post-P17B`



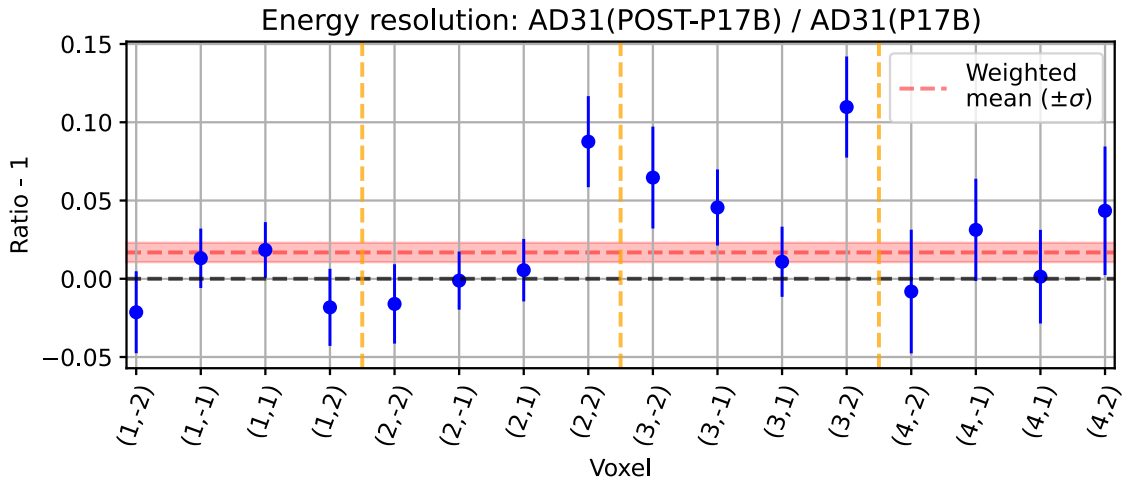


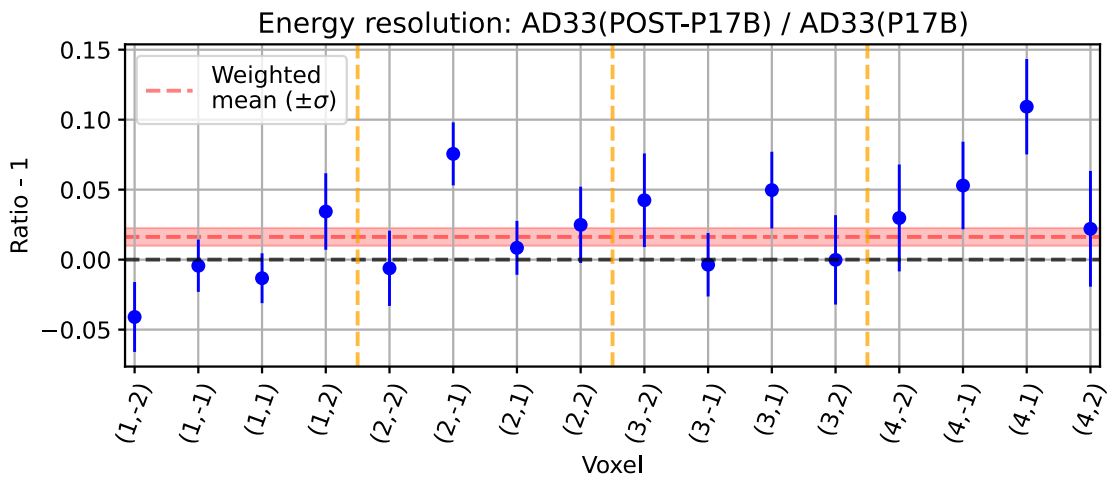


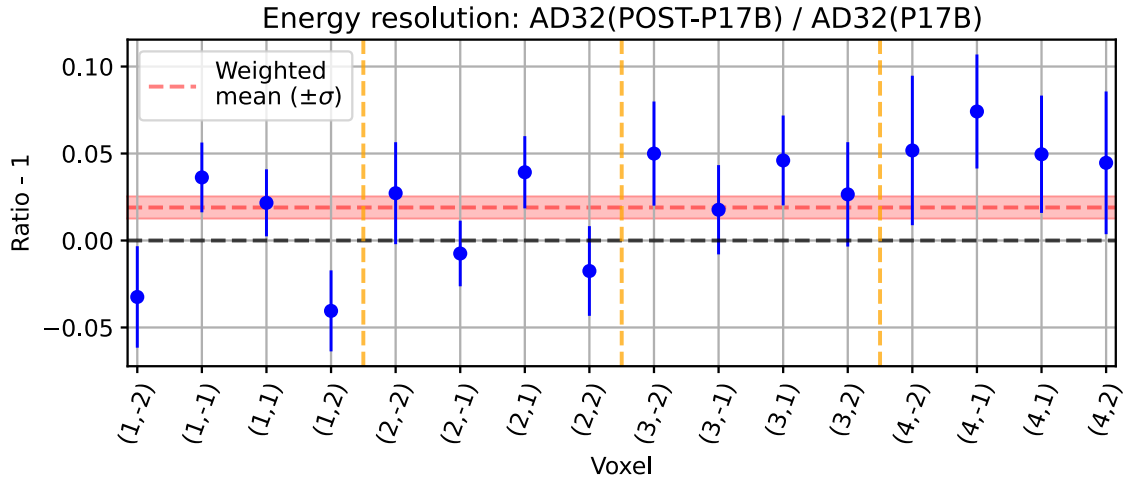
В среднем энергетическое разрешение ухудшилось на относительные ~2%

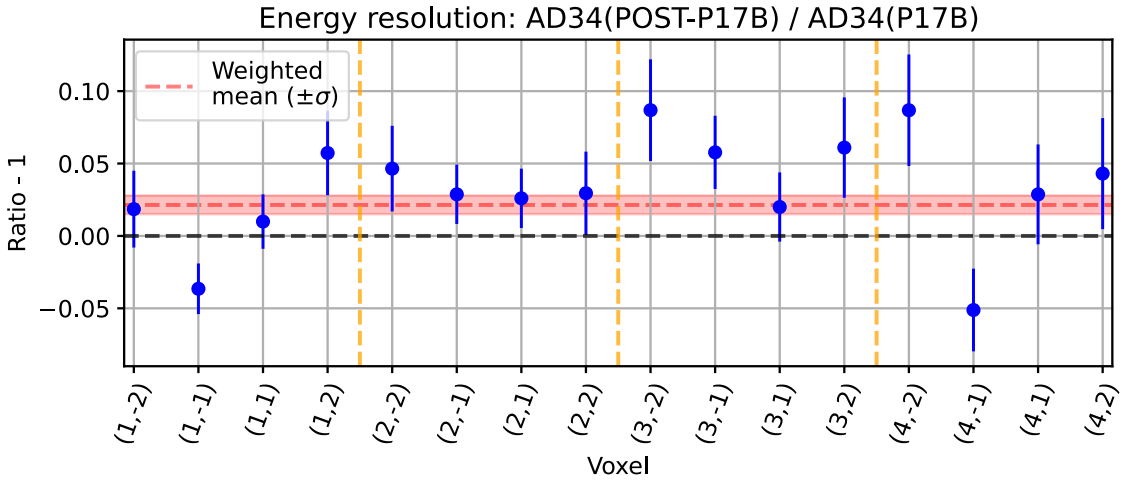
Вероятно, это связано с выходом из строя части ФЭУ

Энергетическое разрешение: дальние детекторы







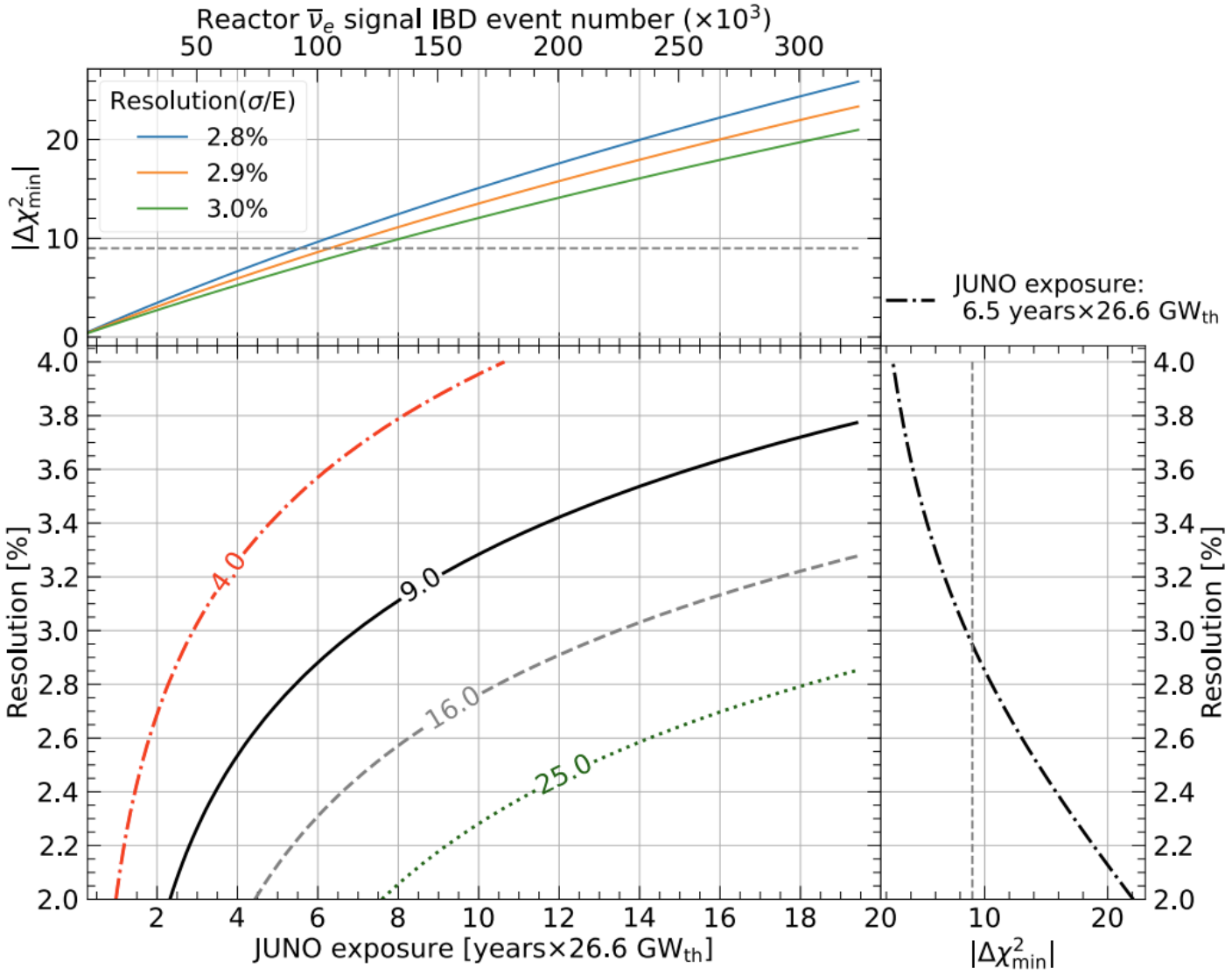


В среднем энергетическое разрешение ухудшилось на относительные ~2%

Вероятно, это связано с выходом из строя части ФЭУ

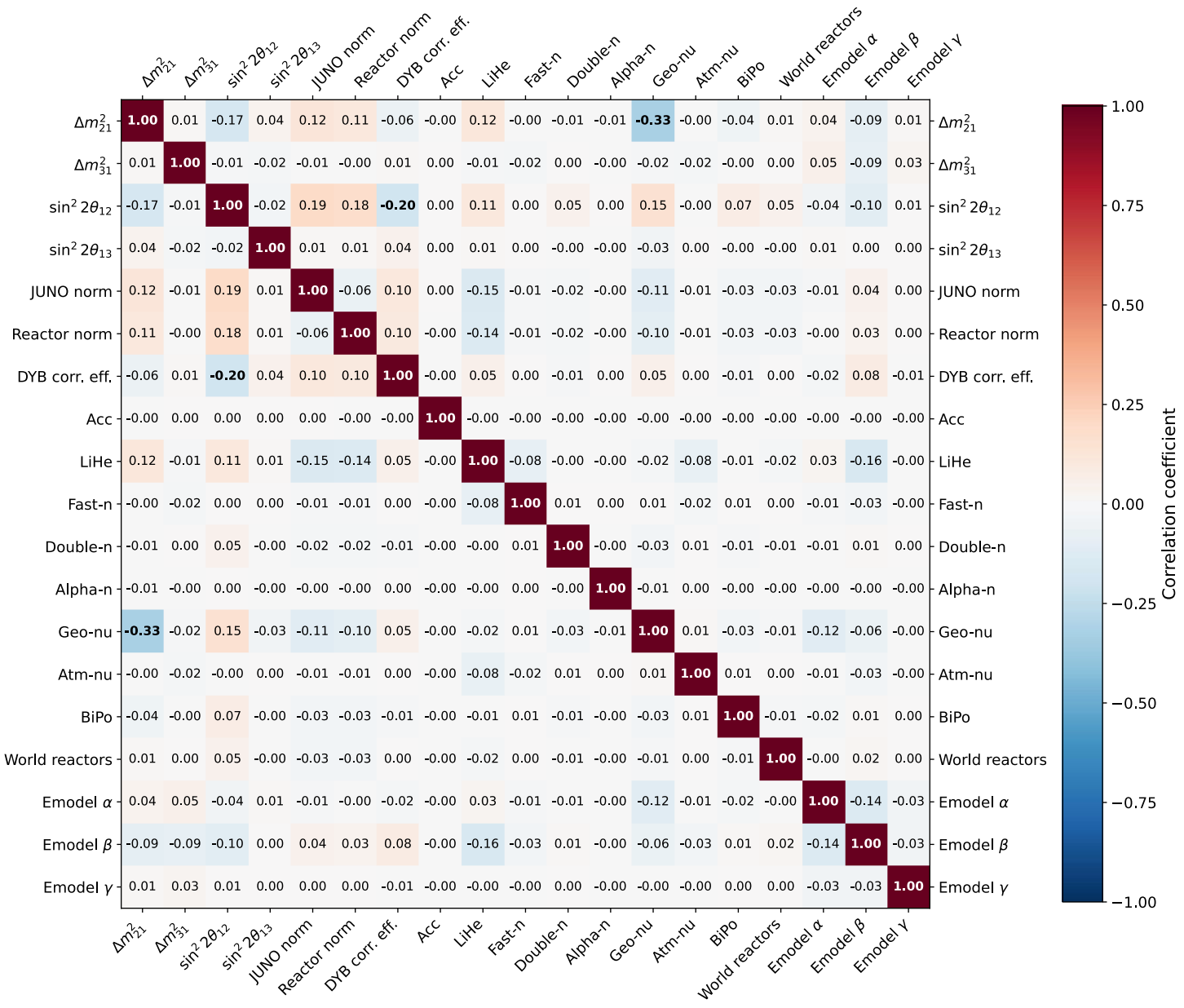
Осц. анализ в JUNO

Чувствительность к NMO: энерг. разрешение и экспозиция

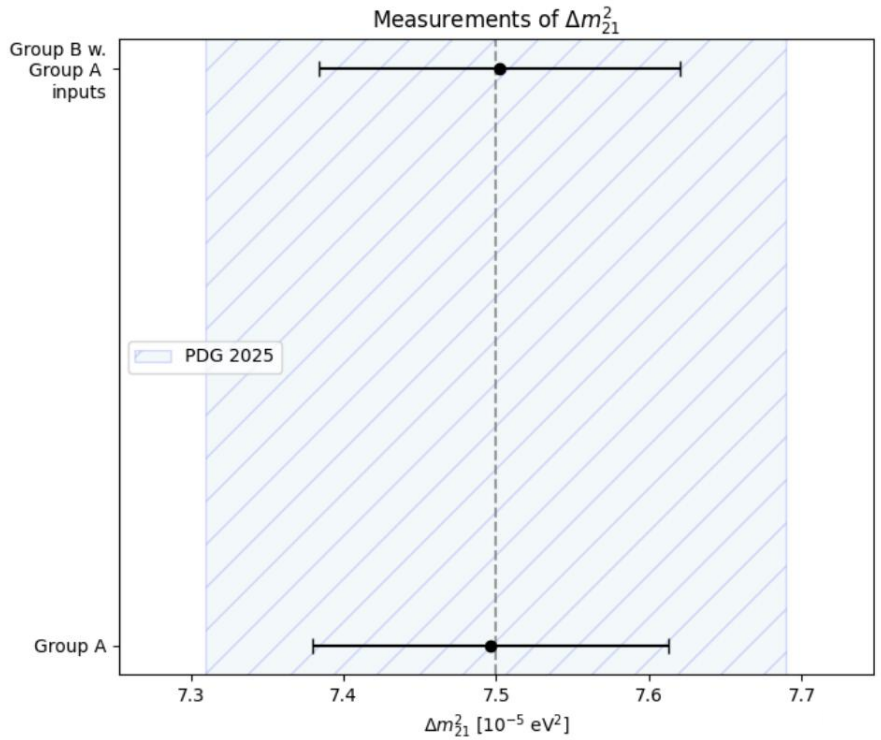


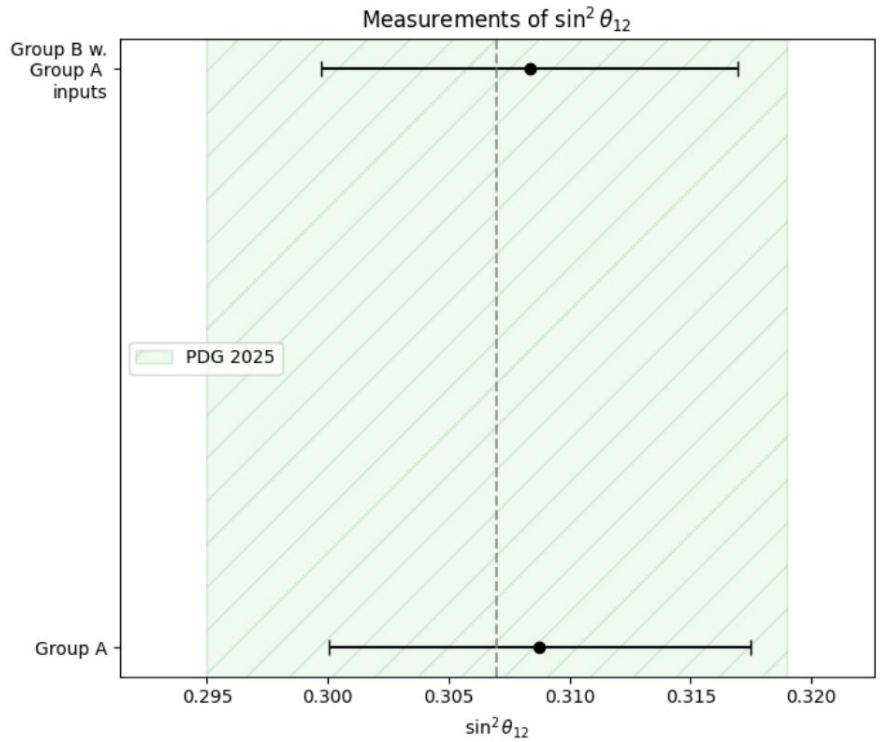
JUNO Collaboration – Potential to identify neutrino mass ordering with reactor antineutrinos at JUNO – *Chin. Phys. C* 49 (2025) 033104

Корр. матрица основных параметров подгонки



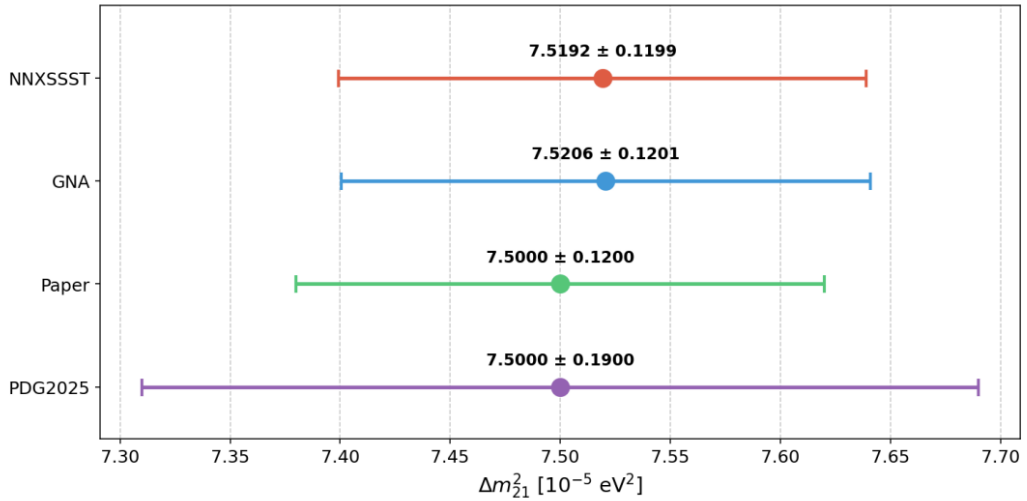
Результаты осц. анализа с офф. входными данными

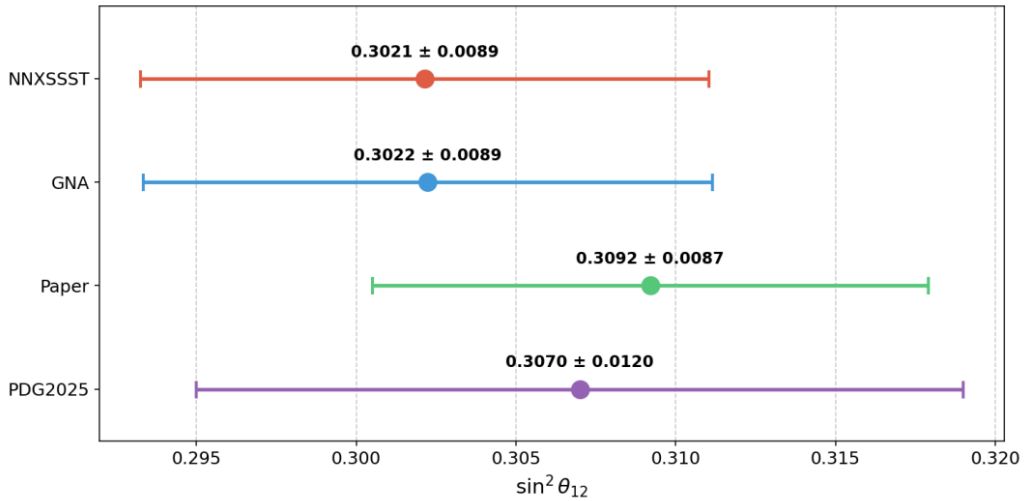




При использовании одинаковых входных данных, результат автора (`Group B w. Group A inputs`) согласуется с официальным (`Group A`) на уровне 0.05σ для обоих параметров

Результаты осц. анализа с входными данными группы автора





- Внутри группы автора использовалось два ПО для подгонки:
  - GNA: разработка с участием автора в ЛЯП
  - NNXSSST: разработка Шанхайского университета Цзяотун (SJTU)
- На одинаковых входных данных было достигнуто согласие на уровне
  - 0.04σ для Δm^2_{21}
  - 0.07σ для $\sin^2\theta_{12}$