



Измерение угла смешивания θ_{13} и расщепления масс
нейтрино Δm_{32}^2 в эксперименте Daya Bay

(по материалам кандидатской диссертации)

Максим Гончар

Руководитель: к. ф.-м. н. Наумов Д. В.

Лаборатория Ядерных Проблем ОИЯИ

ИЯИ, 19 июня 2017

Содержание

- 1 Введение
 - Осцилляции
 - Реакторные $\bar{\nu}_e$
- 2 Эксперимент Daya Bay
 - Детектор
 - Данные
- 3 Осцилляционный анализ
 - dybOscar
 - Реактор
 - Детектор
 - Систематика
- 4 Результаты
- 5 Положения
- 6 Приложение

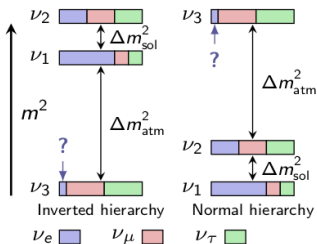


Содержание

- 1 Введение
 - Осцилляции
 - Реакторные $\bar{\nu}_e$
- 2 Эксперимент Daya Bay
 - Детектор
 - Данные
- 3 Осцилляционный анализ
 - dybOscar
 - Реактор
 - Детектор
 - Систематика
- 4 Результаты
- 5 Положения
- 6 Приложение



Смешивание нейтрино



Флейворные состояния нейтрино не имеют определённой массы:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$

α — флейворные состояния

i — массовые состояния

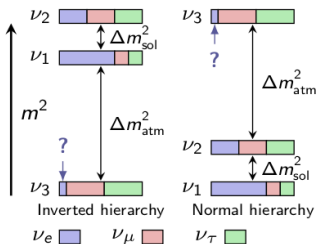
Матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты (ПМНС):

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta_{CP}} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- $\theta_{23} \approx 45^\circ$ из ускорительных и атмосферных экспериментов.
- $\theta_{12} \approx 34^\circ$ совместный анализ данных **солнечных** экспериментов и KamLAND.
- $\theta_{13} \approx 8^\circ$ **реакторные** (средняя база) и ускорительные эксперименты:
 - ↪ **Daya Bay**, RENO, Double CHOOZ, T2K.



Смешивание нейтрино



Флейворные состояния нейтрино не имеют определённой массы:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$

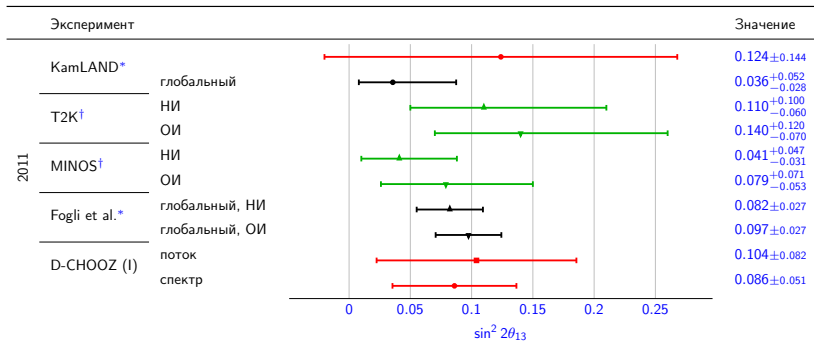
α — флейворные состояния

i — массовые состояния

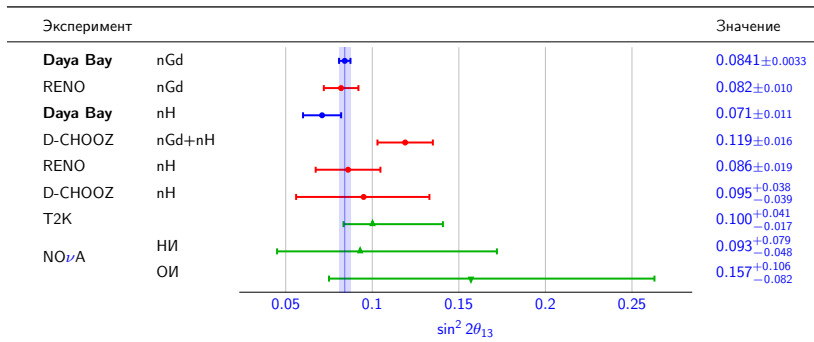
Матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты (ПМНС):

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta_{CP}} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- $\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ эВ}^2$ из совместного анализа данных **KamLAND**, солнечных и атмосферных экспериментов.
- $\Delta m_{32}^2 = (-2.52 \pm 0.05) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2 \longleftrightarrow (2.45 \pm 0.05) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2 = \Delta m_{32}^2$
 из реакторных, ускорительных и атмосферных экспериментов
 \hookrightarrow **Daya Bay**, T2K, MINOS, NO ν A, SuperK, IceCube

Измерение угла смешивания θ_{13} 

- 1980–1995 — реакторные эксперименты с короткой базой: нет следов осцилляций.
- 1995–2000 — реакторные эксперименты со средней базой CHOOZ и Palo Verde: $\sin^2 2\theta_{13} < 0.1$ @90% C.L.
- 2010–2011 — указание на ненулевое значение θ_{13} от атмосферных, реакторных и ускорительных экспериментов.
- 2012–н.в. — прецизионное измерение θ_{13} .

Измерение угла смешивания θ_{13} 

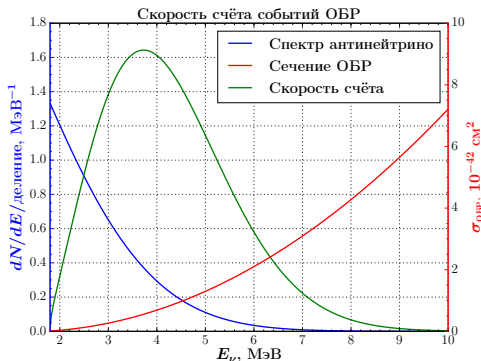
- 1980–1995 — реакторные эксперименты с короткой базой:
нет следов осцилляций.
- 1995–2000 — реакторные эксперименты со средней базой CHOOZ и Palo Verde:
 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.1$ @90% C.L.
- 2010–2011 — указание на ненулевое значение θ_{13} от атмосферных, реакторных и ускорительных экспериментов.
- 2012–н.в. — прецизионное измерение θ_{13} .



Осцилляции реакторных электронных антинейтрино

Реактор как источник $\bar{\nu}_e$:

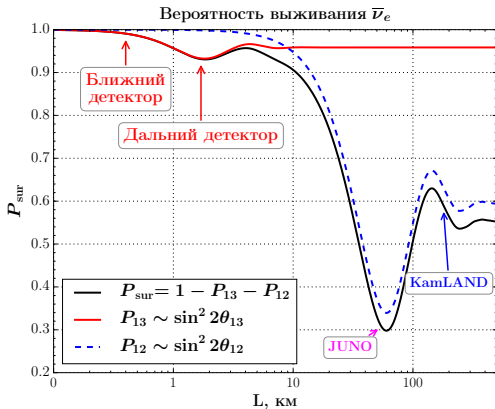
- **Мощность:**
выход $\sim 10^{20} \bar{\nu}_e/s/GW_{th}$.
- **Чистота:**
исключительно $\bar{\nu}_e$.
- **Простые осцилляции:**
нет эффекта вещества,
нет зависимости от δ_{CP} .
- **Разделение:**
можно использовать
существующие АЭС.



- Источник. Распад продуктов деления: $\sim 6 \bar{\nu}_e$ на деление.
- Детектор. Обратный бета-распад (ОБР) в сцинтилляторе $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$.



Осцилляции реакторных электронных антинейтрино

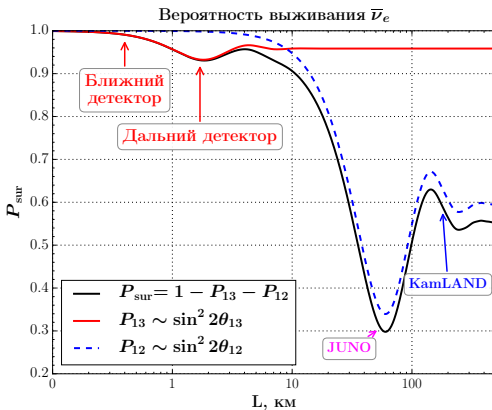


$$1 - P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} \approx \frac{\sin^2 2\theta_{13}}{\sin^2 \Delta_{32}} \sin^2 \Delta_{32} + \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta_{21}$$

$$\Delta_{jk} = 1267 \cdot \frac{\Delta m_{jk}^2}{\text{эВ}^2} \frac{L}{E} \left[\frac{\text{МэВ}}{\text{км}} \right]$$



Осцилляции реакторных электронных антинейтрино



$$\frac{N_f}{N_n} = \left(\frac{N_{p,f}}{N_{p,n}} \right) \left(\frac{L_n}{L_f} \right)^2 \left(\frac{\epsilon_f}{\epsilon_n} \right) \left(\frac{P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(E, L_f)}{P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(E, L_n)} \right)$$



Содержание

- 1 Введение
 - Осцилляции
 - Реакторные $\bar{\nu}_e$
- 2 Эксперимент Daya Bay
 - Детектор
 - Данные
- 3 Осцилляционный анализ
 - dybOscar
 - Реактор
 - Детектор
 - Систематика
- 4 Результаты
- 5 Положения
- 6 Приложение

4 x 20 tons target mass at far site

Far site (Hall 3)
 1615 m from Ling Ao
 1985 m from Daya
 Overburden: 350 m

Ling Ao Near site (Hall 2)
 481 m from Ling Ao
 526 m from Ling Ao II
 Overburden: 112 m

Daya Bay: Powerful reactor by mountains

Water hall

Liquid Scintillator hall

entrance

SAB

295 m

810 m

Construction tunnel

465 m

1006 m

Daya Bay Near site (Hall 1)
 363 m from Daya Bay
 Overburden: 98 m

Ling Ao-II NPP
 2x2.9 GW

Ling Ao NPP, 2x2.9 GW

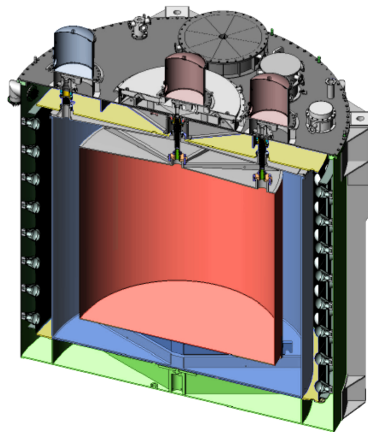
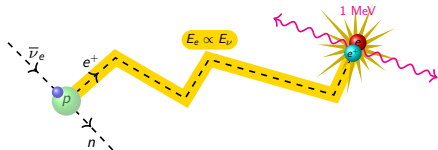
Daya Bay NPP, 2x2.9 GW

Total Tunnel length
 ~ 3000 m

Антинейтринный детектор

3-зонный детектор антинейтрино (АД):

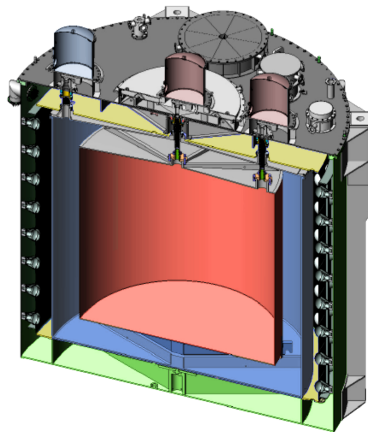
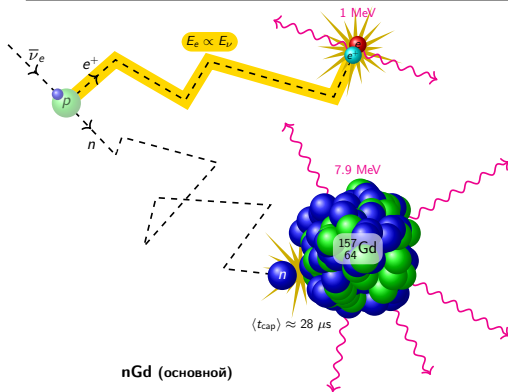
Внутренняя зона	20 т	ЖС (Gd)
Средняя зона	20 т	ЖС
Внешняя зона	40 т	Минер. масло



Антинейтринный детектор

3-зонный детектор антинейтрино (АД):

Внутренняя зона	20 т	ЖС (Gd)
Средняя зона	20 т	ЖС
Внешняя зона	40 т	Минер. масло



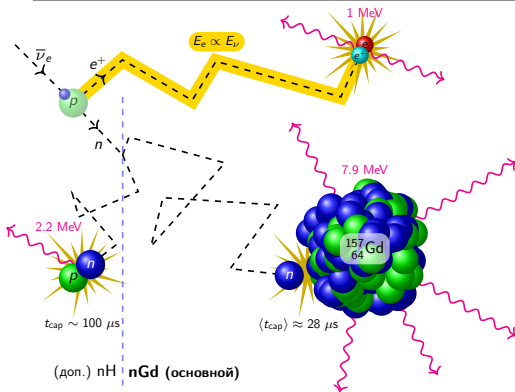
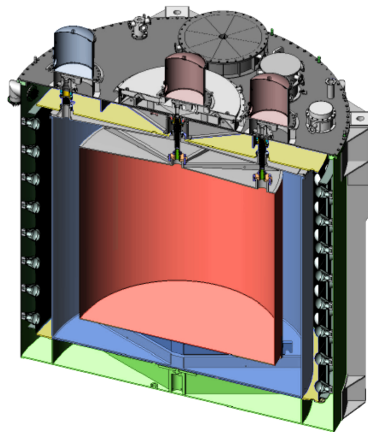
Антинейтринный детектор

3-зонный детектор антинейтрино (АД):

Внутренняя зона 20 т ЖС (Gd)

Средняя зона 20 т ЖС

Внешняя зона 40 т Минер. масло



Калибровочная система

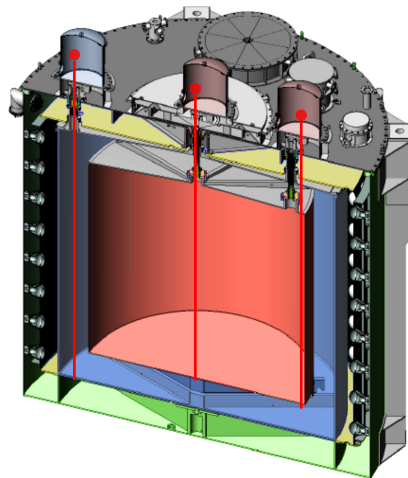
3 автоматических калибровочных устройства (АКУ):

- Центр мишени (АКУ-А):
неоднородность, эн. шкала, нелинейность.
- Граница мишени (АКУ-В):
неоднородность, эффективность.
- Средняя зона (АКУ-С):
неоднородность, эффективность.

Источники АКУ:

- LED:
временной отклик, усиление, QE.
- Нейтронный источник ^{241}Am ^{13}C :
время захвата нейтрона.
- ^{68}Ge γ (2×511 кэВ):
порог, нелинейность.
- ^{60}Co γ ($1.17 + 1.33$ МэВ):
энергетическая шкала.

АКУ-С АКУ-А АКУ-В



Система мюонного вето

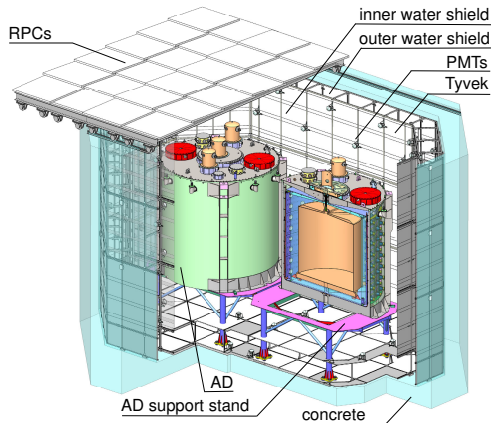
■ Бассейн с водой:

- ▶ Защита от внешней радиоактивности и космогенного фона.
- ▶ Черенковский детектор.
- ▶ 288 8" ФЭУ (ближние).
- ▶ 384 8" ФЭУ (дальняя).
- ▶ Внешний бассейн (1 м).
- ▶ Внутренний бассейн (>2.5 м).

■ 4 слоя РПК:

- ▶ Мюонный трекер.
- ▶ 54 модуля (ближние).
- ▶ 81 модуль (дальние).

- Эффективность 99.5%,
неопределённость < 0.25%.





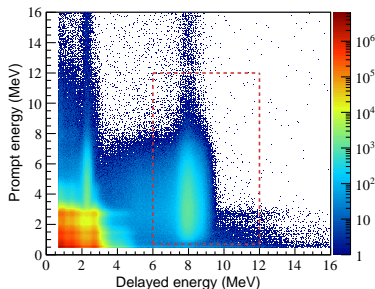
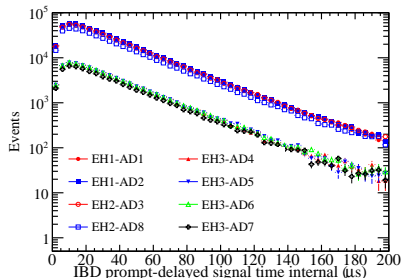
Отбор событий обратного бета-распада

Реакция ОБР:

- $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$
- $\langle \tau_{\text{зах}} \rangle \approx 28 \text{ мкс}$:
 $n + \text{Gd} \rightarrow \text{Gd}^* \rightarrow \text{Gd} + \sum \gamma (8 \text{ МэВ})$

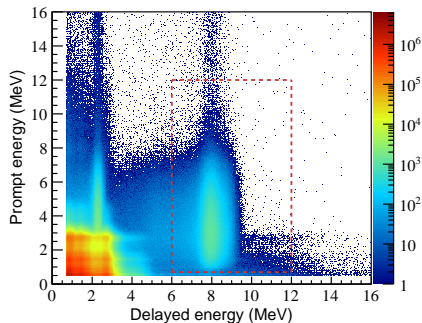
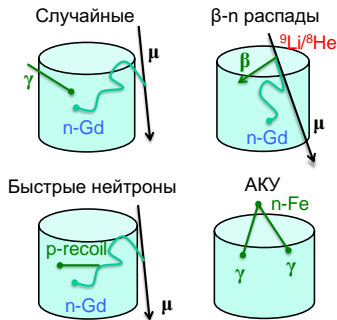
Отбор. **Одно событие — два сигнала:**

- 1 Исклечение событий спонтанного излучения ФЭУ (99.98%).
- 2 Отбор мгновенной энергии (позитрон):
 $0.7 \text{ МэВ} < E_p < 12 \text{ МэВ}$ (99.88%).
- 3 Отбор запаздывающей энергии (захват нейтрона):
 $6 \text{ МэВ} < E_d < 12 \text{ МэВ}$ (90.9%).
- 4 Время захвата нейтрона:
 $1 \text{ мкс} < \Delta t < 200 \text{ мкс}$ (98.6%).
- 5 Мюонное вето:
 - ▶ Сигнал в бассейне $N_{\text{hits}} > 12$: 0.6 мс
 - ▶ Сигнал в АД $E > 12 \text{ МэВ}$: 1 мс
 - ▶ Ливень в АД $E > 2.5 \text{ ГэВ}$: 1 с
- 6 Множественность: нет сигналов
 $E > 0.7 \text{ МэВ}$ в окне $\pm 200 \text{ мкс}$.



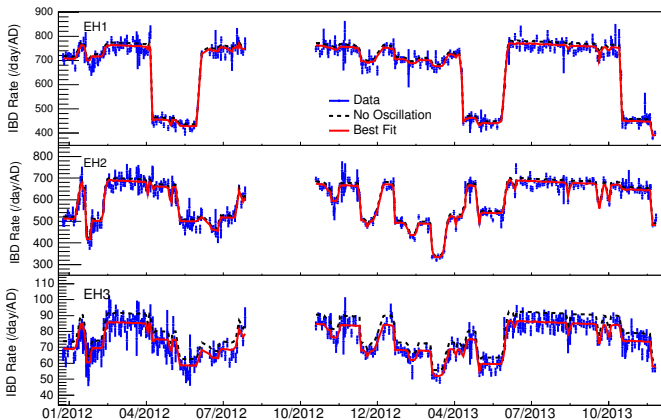
Фоновые события

	Ближние С/Ш, %	Дальняя С/Ш, %	Ошибка	Методика оценки
Случайные	1.3	1.6	1%	Расчёт: измеренная частота независимых сигналов
$^8\text{He}/^9\text{Li}$	0.3	0.2	44%	Измерение: события после мюонов
Быстрые нейтроны	0.08	0.07	$\lesssim 17\%$	Измерение: события после мюонов
$^{241}\text{Am } ^{13}\text{C}$	0.03	0.07	45%	МК. Проверено калибровочными данными
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$	0.01	0.07	50%	Расчёт: измеренная радиоактивность





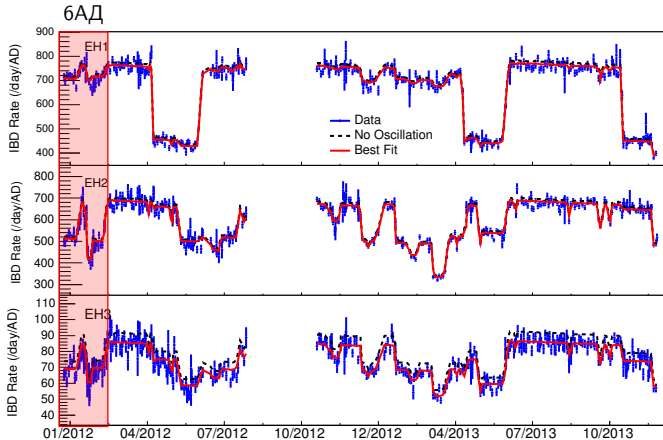
Периоды набора данных



- | | | | |
|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| ■ 50 дней | ■ 139 дней | ■ 621 день | ■ 1230 дней |
| ■ 10K/80K событий | ■ 30K/200K событий | ■ 150K/1M событий | ■ 300K/2.5M событий |
| ■ данные: поток | ■ данные: поток | ■ данные: спектр | ■ данные: спектр |
| ■ параллельный | ■ параллельный | ■ параллельный | ■ официальный |



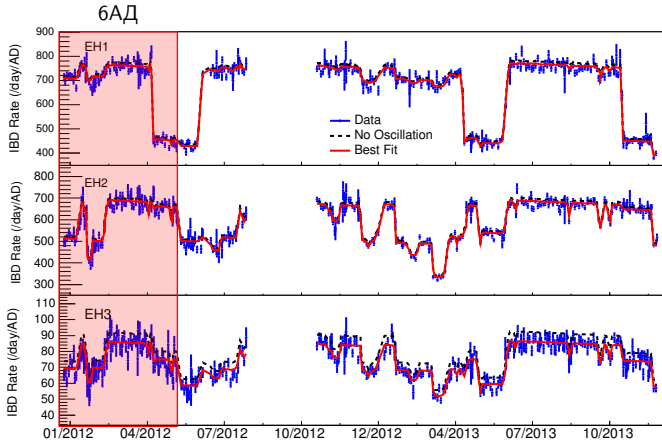
Периоды набора данных



- | | | | |
|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| ■ 50 дней | ■ 139 дней | ■ 621 день | ■ 1230 дней |
| ■ 10K/80K событий | ■ 30K/200K событий | ■ 150K/1M событий | ■ 300K/2.5M событий |
| ■ данные: поток | ■ данные: поток | ■ данные: спектр | ■ данные: спектр |
| ■ параллельный | ■ параллельный | ■ параллельный | ■ официальный |



Периоды набора данных

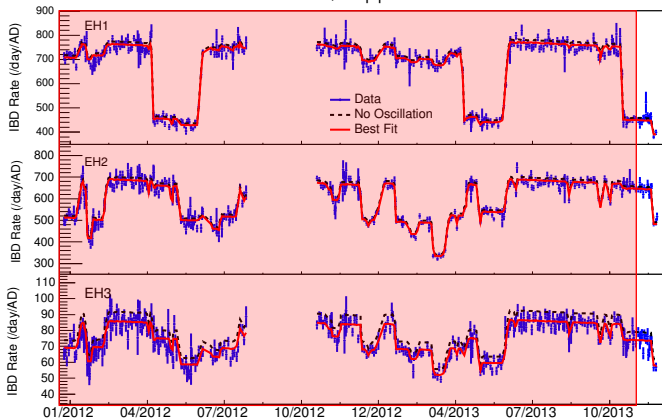


- | | | | |
|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| ■ 50 дней | ■ 139 дней | ■ 621 день | ■ 1230 дней |
| ■ 10K/80K событий | ■ 30K/200K событий | ■ 150K/1M событий | ■ 300K/2.5M событий |
| ■ данные: поток | ■ данные: поток | ■ данные: спектр | ■ данные: спектр |
| ■ параллельный | ■ параллельный | ■ параллельный | ■ официальный |



Периоды набора данных

6+8АД



■ 50 дней

■ 10K/80K событий

■ данные: поток

■ параллельный

■ 139 дней

■ 30K/200K событий

■ данные: поток

■ параллельный

■ 621 день

■ 150K/1M событий

■ данные: спектр

■ параллельный

■ 1230 дней

■ 300K/2.5M событий

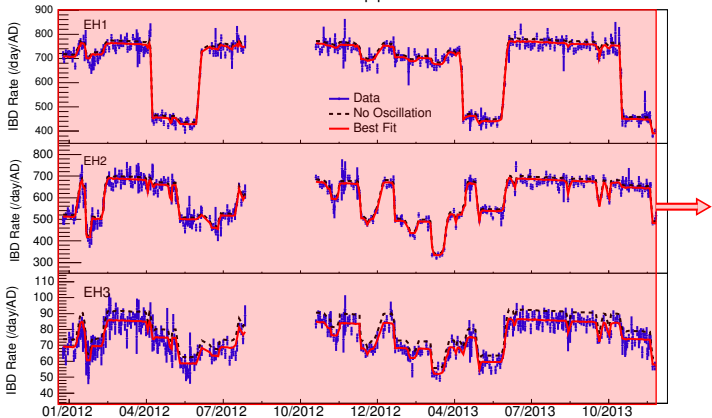
■ данные: спектр

■ официальный



Периоды набора данных

6+8АД



- | | | | |
|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| ■ 50 дней | ■ 139 дней | ■ 621 день | ■ 1230 дней |
| ■ 10K/80K событий | ■ 30K/200K событий | ■ 150K/1M событий | ■ 300K/2.5M событий |
| ■ данные: поток | ■ данные: поток | ■ данные: спектр | ■ данные: спектр |
| ■ параллельный | ■ параллельный | ■ параллельный | ■ официальный |



Содержание

- 1 Введение
 - Осцилляции
 - Реакторные $\bar{\nu}_e$
- 2 Эксперимент Daya Bay
 - Детектор
 - Данные
- 3 Осцилляционный анализ
 - dybOscar
 - Реактор
 - Детектор
 - Систематика
- 4 Результаты
- 5 Положения
- 6 Приложение



Анализ данных в эксперименте Daya Bay

Параллельный анализ

Все исследования проводятся по крайней мере 2-я независимыми группами.

В осцилляционном анализе участвует 5 групп:

- Общие данные на входе
- Различные подходы к:
 - ▶ Реконструкция энергии
 - ▶ Калибровка энергетической шкалы
 - ▶ Отбор событий
 - ▶ Оценка вкладов фоновых событий
 - ▶ Осцилляционный анализ
- Проверки и сравнения между группами:
 - ▶ Слепой анализ
 - ▶ Обмен модельными данными

Слепой анализ

Номинальные значения для:

- Тепловая мощность
- Масса мишени
- Координаты реакторов и детекторов



Анализ данных в эксперименте Daya Bay

Параллельный анализ

Все исследования проводятся по крайней мере 2-я независимыми группами.

В осцилляционном анализе участвует 5 групп:

- Общие данные на входе
- Различные подходы к:
 - ▶ Реконструкция энергии
 - ▶ Калибровка энергетической шкалы
 - ▶ Отбор событий
 - ▶ Оценка вкладов фоновых событий
 - ▶ Осцилляционный анализ
- Проверки и сравнения между группами:
 - ▶ Слепой анализ
 - ▶ Обмен модельными данными

Слепой анализ

Номинальные значения для:

- Тепловая мощность
- Масса мишени
- Координаты реакторов и детекторов



ПО dubOscar

ПО dubOscar разработано группой из Дубны для анализа данных Daya Bay.

Особенности

■ Модульность. Альтернативные модели и подходы:

- ▶ Модели и параметризации спектра антинейтрино
- ▶ Вероятность осцилляций
- ▶ Сечение ОБР и кинематика взаимодействия
- ▶ Модели отклика детектора
- ▶ Функции подгонки:
 - функция хи-квадрат со штрафными членами и/или ковариационной матрицей
- ▶ Методика и точность вычисления ковариационной матрицы:
 - дифференцирование, интегрирование, МК
- ▶ Интерфейсы к ПО минимизации: MINUIT, scipy.optimize

■ Проработка:

- ▶ Унифицированный подход к работе с модельными параметрами
- ▶ Оптимизация времени работы для вариации параметров осцилляций
- ▶ Предварительная настройка точности интегрирования
- ▶ Отслеживание состояния промежуточных вычислений
- ▶ Кеширование промежуточных вычислений с возможностью интерполяции по одному или двум произвольным параметрам
- ▶ Тщательное тестирование, демонстрация несмещённости оценок параметров и адекватности определения ошибок

[▶ подробности](#)[▶ Тестирование](#)



ПО dybOscar разработано группой из Дубны для анализа данных Daya Bay.

Текущие задачи

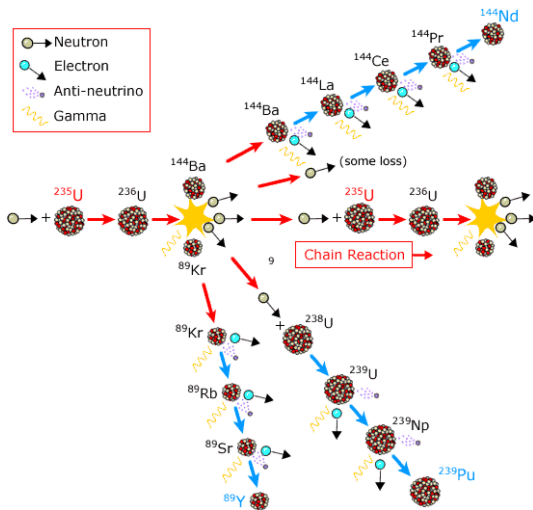
- **Осцилляционный анализ данных (nGd)**
- Исследование подхода с волновыми пакетами на основе данных Daya Bay и KamLAND [1608.01661 EPJC]
- Исследование спектра реакторных антинейтрино и его эволюции

1203.1669	PRL
1210.6327	PRL
1407.7259	PRL
1505.03456	PRL
1608.01661	EPJC
1610.04802	PRD



Суммарный спектр реакторных антинейтрино

99% реакторных антинейтрино рождаются в процессах распада продуктов деления*
изотопов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu .

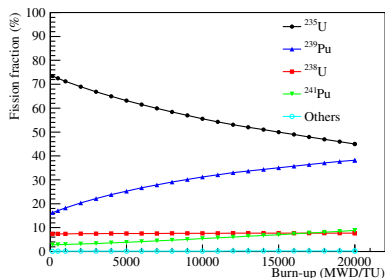




Суммарный спектр реакторных антинейтрино

99% реакторных антинейтрино рождаются в процессах распада продуктов деления*
 изотопов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu .

$$\frac{dR_\nu}{dE_\nu} = \frac{W^{\text{th}}}{\sum_{i'} f_{i'} \langle e \rangle_{i'}} \sum_i f_i S_i(E_\nu) C_i(E_\nu) + F(E_\nu),$$



- $\langle e \rangle_i$ — средняя тепловая энергия, выделяемая в цепочке на один акт деления:
 - ▶ Копейкин et al., [hep-ph/0410100].
 - ▶ Xu Bo Ma et al., [Doc9838].
- F — отработавшее ядерное топливо, C_i — поправка на неравновесность.

Информация от АЭС о ежедневном состоянии реакторов:

- W — тепловая мощность.
- f_i — относительный вклад делящегося изотопа в полное число делений.



Электронные антинейтрино от реактора

^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu

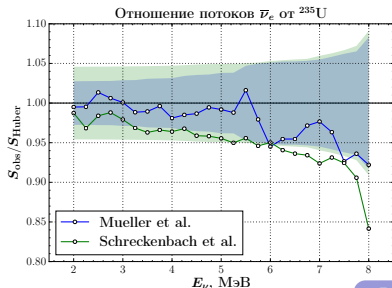
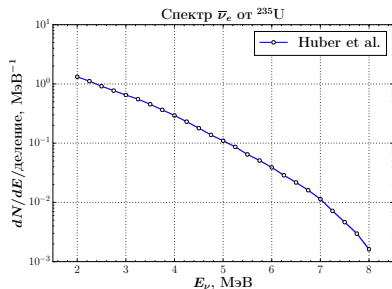
- Захват медленных нейтронов
- Экспериментальные данные
- Schreckenbach et al. (ILL),
PLB: [160], [115], [218].
- Mueller et al., (ILL), [1101.2663]
- Huber, (ILL), [1106.0687]

+ ^{238}U

- Захват быстрых нейтронов
- Теоретические расчёты (в основном)
- Mueller et al., [1101.2663]
- Fallot et al., [1208.3877]
- Dwyer&Langford, [1407.1281]
- Haag et al. (только ^{238}U), [1312.5601]

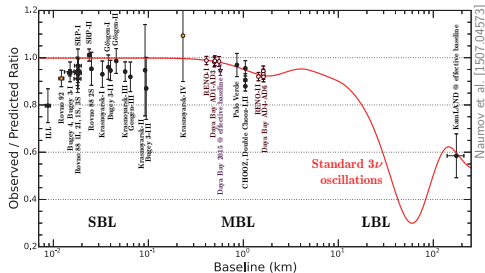
Учитываются так же

- Неравновесная поправка (спектры ILL)
- Вклад ОЯТ

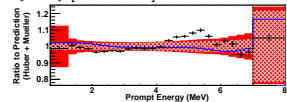




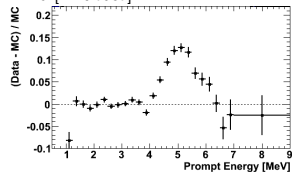
Аномалия и эксцесс



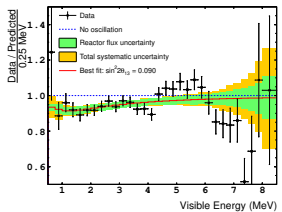
Daya Bay [1505.03456]



RENO [1410.7987]



Double CHOOZ [1406.7763]



- Спектры Huber/Mueller предсказывают на $\sim 3\%$ больше нейтрино, чем ILL.
- Реакторные эксперименты наблюдают дефицит $\sim 5\%$ относительно предсказания Huber/Mueller.
- Новые реакторные эксперименты наблюдают эксцесс в области $E_\nu \sim 6$ МэВ.
- Указания на связь с ^{235}U [1704.02276], [1704.01082].

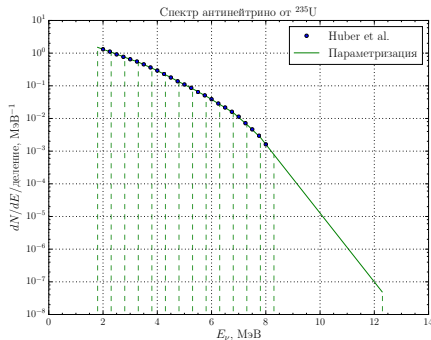


Параметризация спектра антинейтрино

Спектр $\bar{\nu}_e$ от каждого изотопа параметризуется кусочно-гладкой функцией:

$$S_{ij}(E_\nu) = n_j S_{ij}^{\text{tot}} e^{-b_{ij}(E_\nu - E_j^\nu)},$$

$$E_\nu \in (E_j^\nu, E_{j+1}^\nu).$$



- S_{ij}^{tot} — модельный спектр от изотопа i в E_j^ν .
- n_j — коррелированная поправка для интервала j .
- n_j — отношение наблюдаемого среднего спектра антинейтрино к ожидаемому:

$$n(E) = \frac{\langle S(E) \rangle_{\text{obs}}}{\langle S(E) \rangle_{\text{Huber+Mueller}}}.$$



Параметризация спектра антинейтрино

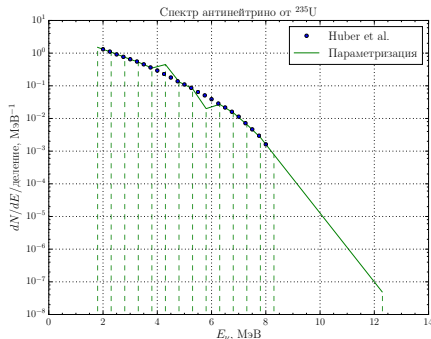
Спектр $\bar{\nu}_e$ от каждого изотопа параметризуется кусочно-гладкой функцией:

$$S_{ij}(E_\nu) = n_j S_{ij}^{\text{tot}} e^{-b_{ij}(E_\nu - E_j^\nu)},$$

$$E_\nu \in (E_j^\nu, E_{j+1}^\nu).$$

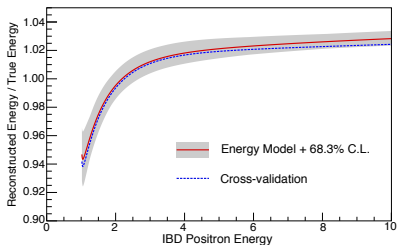
- S_{ij}^{tot} — модельный спектр от изотопа i в E_j^ν .
- n_j — коррелированная поправка для интервала j .
- n_j — отношение наблюдаемого среднего спектра антинейтрино к ожидаемому:

$$n(E) = \frac{\langle S(E) \rangle_{\text{obs}}}{\langle S(E) \rangle_{\text{Huber+Mueller}}}.$$



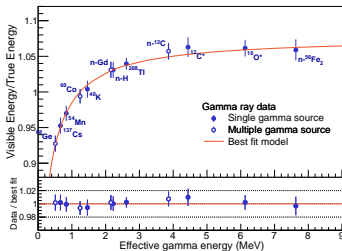
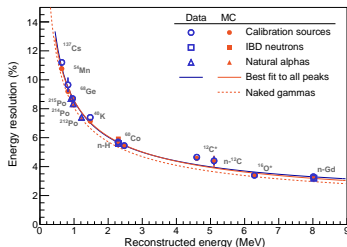


Эффекты детектора



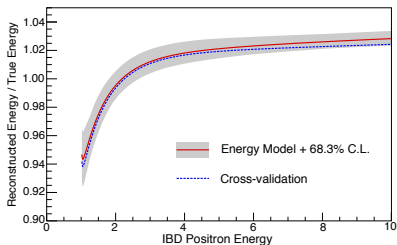
- Поправка на потерю энергии в нецинтиллирующих материалах.
- Полу-эмпирическая модель нелинейности энергетического отклика ($\sigma < 1\%$).
- Энергетическое разрешение $9\% @ 1$ МэВ.

▶ Эффективность



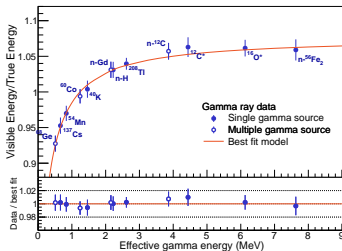
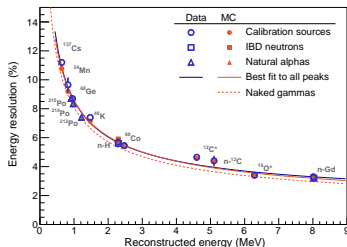


Эффекты детектора



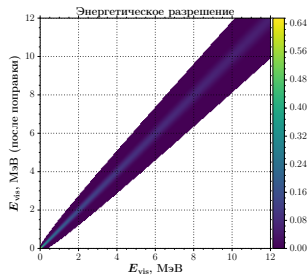
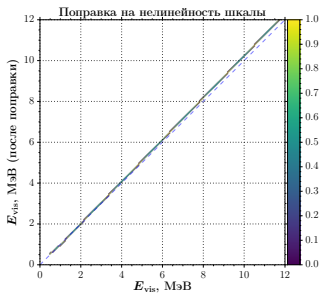
- Поправка на потерю энергии в нескинтиллирующих материалах.
- Полу-эмпирическая модель нелинейности энергетического отклика ($\sigma < 1\%$).
- Энергетическое разрешение $9\% @ 1$ МэВ.

▶ Эффективность



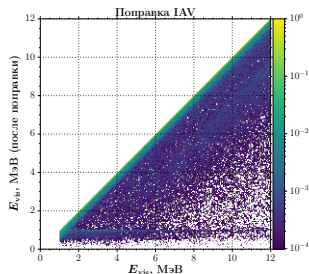


Эффекты детектора



- Поправка на потерю энергии в несцинтиллирующих материалах.
- Полу-эмпирическая модель нелинейности энергетического отклика ($\sigma < 1\%$).
- Энергетическое разрешение 9%@1 МэВ.

▶ Эффективность





Систематические неопределённости

	Параметры	Кол-во.	Некорр.	Ошибка	Комментарий
Свободн.	Параметры осцилляций (реакт.)	2	П		
	Параметры спектра антинейтрино	15	П		
Реактор	Параметры осцилляций (сол.)	2	П		(мал.)
	Тепловая мощность	6	Р	0.5%	
	Доля распадов	6×4	РИ*	5%	
	Средняя энергия деления	4	И	0.12% – 0.25%	
	Неравновесный вклад	6×3	РИ	30%	
	Вклад ОЯТ	6	Р	50%	
Детектор	Спектры $\bar{\nu}_e$	4×28	ИЭ	2% – 30%	
	Относительная эффективность	8	Д	0.13%	отн. шкала.*
	Относительная энергетическая шкала	8	Д	0.2%	отн. эфф.*
	Нелинейность энергетической шкалы	4	П	<1%	
	Энергетическое разрешение	3	П	30%	(мал.)
	Поправка IAV	8	Д	4%	
	Случайные совпадения	8	Д	0.4%	
	Вклад $^8\text{He}/^9\text{Li}$	3	С	32% – 38%	
Доля ^9Li в $^8\text{He}/^9\text{Li}$	1		5%	(мал.)	
Фон	Вклад быстрых нейтронов	3	С	10% – 17%	
	Форма спектра быстрых нейтронов	3	С	8% – 11%	(мал.)
	Вклад $^{241}\text{Am } ^{13}\text{C}$	8	Д	40% – 45%	
	Вклад $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$	8	Д	50%	
	Форма спектра ^9Li			нет	(мал.)
	Форма спектра $^{241}\text{Am } ^{13}\text{C}$			нет	(мал.)
	Форма спектра $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$			нет	(мал.)
	Спектр случайных совпадений			нет	(мал.)

■ В общей сложности **17** свободных и **237** ограниченных параметров.



Функция подгонки

Хи-квадрат со штрафными членами

- Ограниченные параметры
- Свободные параметры
- Модель
- Данные

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(x_i - \mu_i(\theta, \eta))^2}{\sigma_i^2} + \sum_j \frac{(\eta_j - \eta_j^0)^2}{\sigma_{\eta,j}^2}$$

- Статистические ошибки (Пирсона)
- Штрафные члены
- Систематические неопределённости



Функция подгонки

Хи-квадрат со штрафными членами

- Ограниченные параметры
- Свободные параметры
- Модель
- Данные

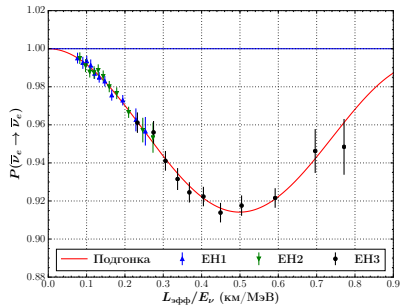
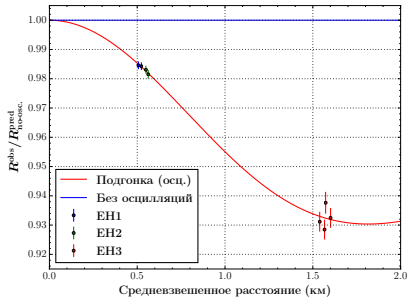
$$\chi^2 = (x - \mu(\theta, \eta))^T V_{\text{stat}}^{-1} (x - \mu(\theta, \eta)) + (\eta - \eta^0)^T V_{\eta}^{-1} (\eta - \eta^0)$$

- Статистические ошибки (Пирсона)
- Штрафные члены
- Систематические неопределённости

Содержание

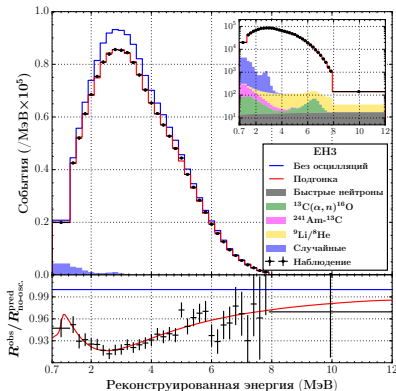
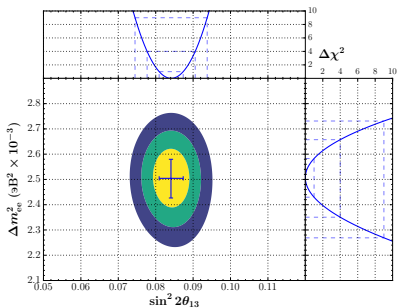
- 1 Введение
 - Осцилляции
 - Реакторные $\bar{\nu}_e$
- 2 Эксперимент Daya Bay
 - Детектор
 - Данные
- 3 Осцилляционный анализ
 - dybOscar
 - Реактор
 - Детектор
 - Систематика
- 4 Результаты
- 5 Положения
- 6 Приложение

Результаты спектрального анализа: 1230 дней



▶ EH1&EH2

Результаты спектрального анализа: 1230 дней



- 280 интервалов данных, 17 свободных параметров, 237 ограниченных
- Свободный усреднённый спектр реакторных антинейтрино

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0841 \pm 0.0027 \text{ (stat)} \pm 0.0019 \text{ (syst)},$$

$$\frac{\chi^2}{\text{n.d.f.}} = \frac{232.6}{280 - 17} = 0.88.$$

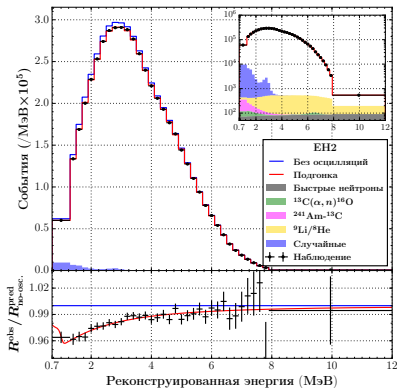
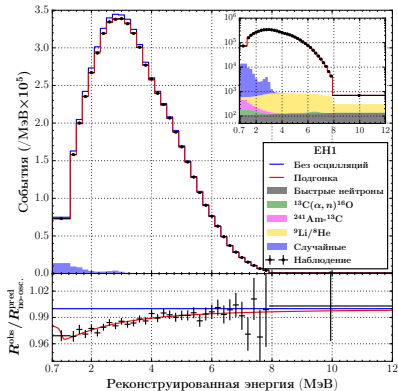
$$\left| \Delta m_{ee}^2 \right| = [2.50 \pm 0.06 \text{ (stat)} \pm 0.06 \text{ (syst)}] \times 10^{-3} \text{ эВ}^2,$$

$$\Delta m_{32}^2 \text{ (НИ)} = [2.45 \pm 0.06 \text{ (stat)} \pm 0.06 \text{ (syst)}] \times 10^{-3} \text{ эВ}^2,$$

▶ EH1&EH2

Результаты спектрального анализа: 1230 дней

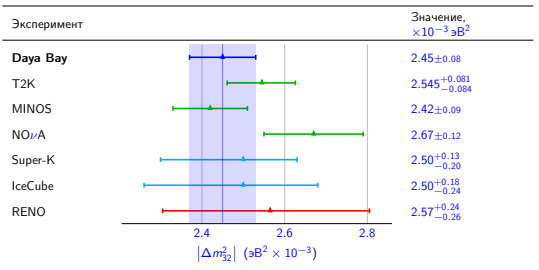
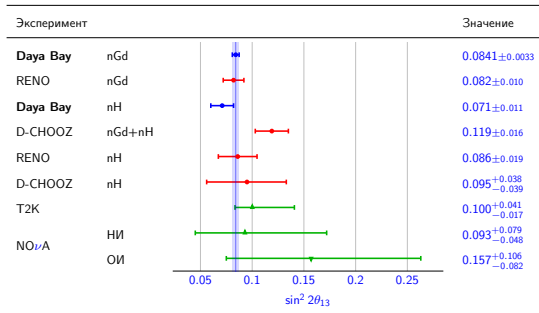
Наблюдаемый спектр на ближних площадках



- Согласованные между отдельными детекторами результаты
- Ближние площадки также чувствительны к осцилляциям

Сравнение

- Наиболее точное измерение θ_{13} .
- Значение $\theta_{13} = 0$ исключается с доверительностью $> 25\sigma$.
- Наиболее точное измерение Δm_{32}^2 .
- Пренебрежимая корреляция между $\sin^2 2\theta_{13}$ и Δm_{32}^2 .



Содержание

- 1 Введение
 - Осцилляции
 - Реакторные $\bar{\nu}_e$
- 2 Эксперимент Daya Bay
 - Детектор
 - Данные
- 3 Осцилляционный анализ
 - dybOscar
 - Реактор
 - Детектор
 - Систематика
- 4 Результаты
- 5 Положения
- 6 Приложение



Положения, выносимые на защиту

- 1 Разработка ПО для анализа данных реакторных нейтринных экспериментов и, в частности, эксперимента Daya Bay.
- 2 Результат измерения амплитуды осцилляций нейтрино $\sin^2 2\theta_{13}$ на основе данных о полном числе событий в детекторах эксперимента Daya Bay.
- 3 Результат измерения амплитуды осцилляций нейтрино $\sin^2 2\theta_{13}$ на основе спектра и потока реакторных антинейтрино в эксперименте Daya Bay.
- 4 Результат измерения расщепления масс нейтрино Δm_{32}^2 в эксперименте Daya Bay.

Личный вклад автора

- Разработка `dybOscar`: определяющий вклад
 - ▶ Аналитическая модель детектора
 - ▶ Методика учёта систематических погрешностей
 - ▶ Тщательное тестирование и проверка несмещённости оценок
- Участие в параллельном анализе данных эксперимента Daya Bay
 - ▶ Проверка методик отбора событий и оценки фона
 - ▶ Кросс-проверка моделей детектора, результатов слепого и открытого анализа
- Участие в сменах на установке Daya Bay
- Доклады на телефонных и рабочих совещаниях и собраниях коллаборации Daya Bay

Апробация I

Выступления на международных конференциях

- 1 **“Precise $\sin^2 2\theta_{13}$ measurement by the Daya Bay reactor neutrino experiment”**,
DAE Symposium on Nuclear Physics, 7–11 December 2012, New-Delhi, India
↪ пленарный доклад
- 2 **“Recent measurement of θ_{13} from Daya Bay and a future project Daya Bay II”**,
The international workshop on non accelerator new physics NANPino-2013,
24–29 June 2013, Valday, Russia
↪ пленарный доклад
- 3 **„Осцилляционный анализ в эксперименте Daya Bay“**, VIII международная
научная конференция объединения молодых учёных и специалистов ОИЯИ,
24–28 февраля 2014, Дубна, Россия
↪ секционный доклад
- 4 **„Осцилляционный анализ в эксперименте Daya Bay“**, XIX международная
научная конференция объединения молодых учёных и специалистов ОИЯИ,
16–20 февраля 2015, Дубна, Россия
↪ секционный доклад
- 5 **“Recent results from Daya Bay experiment”**,
Международная Сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН,
12–15 апреля 2016, Дубна
↪ секционный доклад
- 6 **“Oscillation analysis in Daya Bay experiment”**, Neutrino 2016,
4–9 July 2016, London
↪ постер

Апробация II

Семинары

- 1 **“Precise $\sin^2 2\theta_{13}$ measurement of the Daya Bay experiment”**,
научный совет ОИЯИ, 21—22 февраля 2013, Дубна \rightarrow постер (1 премия), доклад
- 2 **“Recent results from Daya Bay experiment and JUNO project”**,
Форум Индия-ОИЯИ, 16—20 июня 2014, Дубна \rightarrow семинар
- 3 **„Измерение параметров смешивания нейтрино амплитуды осцилляций $\sin^2 2\theta_{13}$ и расщепления масс Δm_{32}^2 в эксперименте Daya Bay“**,
ЛЯП, 7 октября 2015, Дубна \rightarrow семинар
- 4 **„Новые результаты в эксперименте Daya Bay“**,
ЛЯП, 10 ноября 2016, Дубна \rightarrow семинар
- 5 **“JINR neutrino programme. Daya Bay and JUNO: precision measurements with reactor neutrinos”**, 46 сессия ПКК по физике частиц ОИЯИ,
16—17 января 2017, Дубна \rightarrow доклад

Апробация III

Премии

- **Первая премия ОИЯИ 2012** за измерение угла смешивания нейтрино $\sin^2 2\theta_{13}$ в эксперименте Daya Bay (в составе группы)
- **Breakthrough Prize in Fundamental Physics 2016**
(в составе коллаборации Daya Bay)
- Стипендия имени Бруно Максимовича Понтекорво 2016, ЛЯП ОИЯИ
- **Первая премия Лаборатория Ядерных Проблем ОИЯИ 2016**
(в составе группы)

Список публикаций I

1. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay. /. — F. An [и др.] // Phys.Rev.Lett. — 2012. — Т. 108. — С. 171803. — arXiv: [1203.1669](#) [hep-ex].
2. Improved Measurement of Electron Antineutrino Disappearance at Daya Bay. /. — F. An [и др.] // Chin.Phys. — 2013. — Т. C37. — С. 011001. — arXiv: [1210.6327](#) [hep-ex].
3. A new measurement of antineutrino oscillation with the full detector configuration at Daya Bay. /. — F. P. An [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2015. — Т. 115, № 11. — С. 111802. — arXiv: [1505.03456](#) [hep-ex].
4. Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment. /. — F. P. An [и др.] // Phys. Rev. — 2017. — Т. D95. — С. 072006. — arXiv: [1610.04802](#) [hep-ex].
5. *Gonchar M.* — Precise $\sin^2 2\theta_{13}$ measurement by the Daya Bay reactor neutrino experiments, — // DAE Symp. Nucl. Phys. — 2012. — Т. 57. — С. 54–59.
6. A side-by-side comparison of Daya Bay antineutrino detectors. /. — F. An [и др.] // Nucl.Instrum.Meth. — 2012. — Т. A685. — С. 78–97. — arXiv: [1202.6181](#) [physics.ins-det].



Список публикаций II

7. Spectral measurement of electron antineutrino oscillation amplitude and frequency at Daya Bay. /. — F. An [и др.] // Phys.Rev.Lett. — 2014. — Т. 112. — С. 061801. — arXiv: [1310.6732](#) [hep-ex].
8. Independent measurement of the neutrino mixing angle θ_{13} via neutron capture on hydrogen at Daya Bay. /. — F. An [и др.] // Phys.Rev. — 2014. — Т. D90, № 7. — С. 071101. — arXiv: [1406.6468](#) [hep-ex].
9. The muon system of the Daya Bay Reactor antineutrino experiment. /. — F. An [и др.] // Nucl.Instrum.Meth. — 2015. — Т. A773. — С. 8—20. — arXiv: [1407.0275](#) [physics.ins-det].
10. Search for a Light Sterile Neutrino at Daya Bay. /. — F. An [и др.] // Phys.Rev.Lett. — 2014. — Т. 113. — С. 141802. — arXiv: [1407.7259](#) [hep-ex].
11. The Detector System of The Daya Bay Reactor Neutrino Experiment. /. — F. P. An [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. — 2016. — Т. A811. — С. 133—161. — arXiv: [1508.03943](#) [physics.ins-det].
12. Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay. /. — F. P. An [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Т. 116. — С. 061801. — arXiv: [1508.04233](#) [hep-ex].

Список публикаций III

13. New measurement of θ_{13} via neutron capture on hydrogen at Daya Bay. /. — F. P. An [и др.] // Phys. Rev. — 2016. — Т. D93, № 7. — С. 072011. — arXiv: [1603.03549](https://arxiv.org/abs/1603.03549) [hep-ex].
14. Improved Search for a Light Sterile Neutrino with the Full Configuration of the Daya Bay Experiment. /. — F. P. An [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Т. 117, № 15. — С. 151802. — arXiv: [1607.01174](https://arxiv.org/abs/1607.01174) [hep-ex].
15. Improved Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay. /. — F. P. An [и др.] // Chin. Phys. — 2017. — Т. C41, № 1. — С. 013002. — arXiv: [1607.05378](https://arxiv.org/abs/1607.05378) [hep-ex].
16. Limits on Active to Sterile Neutrino Oscillations from Disappearance Searches in the MINOS, Daya Bay, and Bugey-3 Experiments. /. — P. Adamson [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Т. 117, № 15. — С. 151801. — arXiv: [1607.01177](https://arxiv.org/abs/1607.01177) [hep-ex]. — [Addendum: Phys. Rev. Lett.117,no.20,209901(2016)].

Научный руководитель

- **Наумов Дмитрий Вадимович**,
кандидат физико-математических наук,
заместитель директора Лаборатории Ядерных Проблем, **ОИЯИ**, Дубна.

Официальные оппоненты

- **Дербин Александр Владимирович**,
доктор физико-математических наук,
заведующий отделом полупроводниковых ядерных детекторов, Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Федеральное государственное бюджетное учреждение **Петербургский Институт Ядерной Физики** им. Б. П. Константинова, Санкт-Петербург.
- **Семикоз Виктор Борисович**,
доктор физико-математических наук,
заведующий теоретическим отделом, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт Земного Магнетизма, Ионосферы и Распространения Радиоволн** им. Н. В. Пушкова Российской Академии Наук, Москва.

Ведущая организация:

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт Ядерных Исследований** Российской Академии Наук.

Спасибо за внимание!

Дополнительные материалы...



Содержание

- 7 Other results
- 8 Selection and uncertainties
- 9 Antineutrino detector
- 10 Backgrounds
- 11 The model and fitting



Содержание

7 Other results

8 Selection and uncertainties

9 Antineutrino detector

10 Backgrounds

11 The model and fitting

Independent nH oscillation analysis

621 days, arXiv:1603.03549, PRD

Key points:

- ✓ Additional statistics (+20 ton/AD)
- ✓ Largely independent systematics
- ✗ Lower delayed energy (~ 2.2 MeV)
- ✗ More accidentals
- ✗ Loosely defined fiducial volume

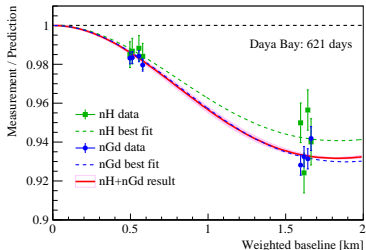
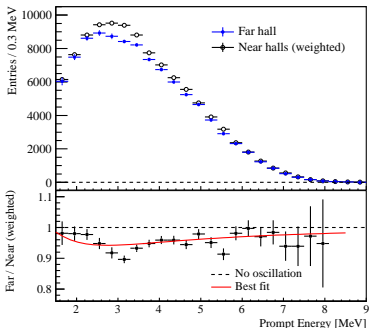
nH

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.071 \pm 0.011$$

nH+nGd

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.082 \pm 0.004$$

- Observed significant rate deficit.
- Spectral distortion consistent with oscillations.
- Third world precise measurement after Daya Bay (nGd) and RENO (nGd).



Absolute reactor antineutrino flux

621 days, arXiv:1607.05378, CPC

- Consistent between ADs
- Consistent with world average
- Supports reactor anomaly existence

Huber+Mueller

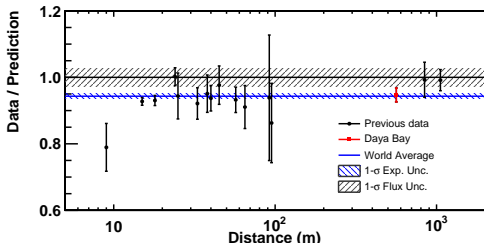
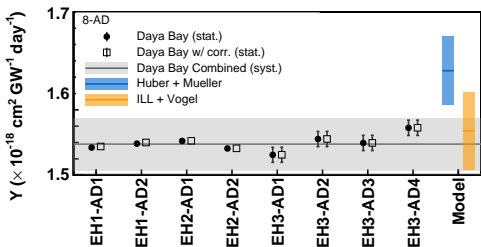
Data/prediction: 0.946 ± 0.020

ILL+Vogel

Data/prediction: 0.992 ± 0.021

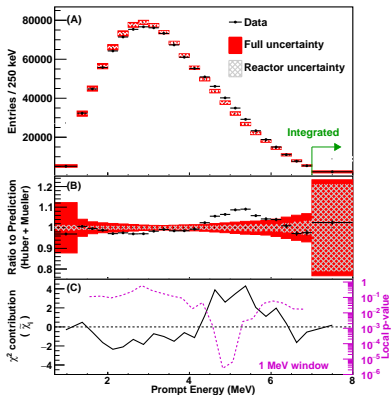
Huber+Mueller (global)

Data/prediction:
 0.943 ± 0.008 (exp) ± 0.023 (model)



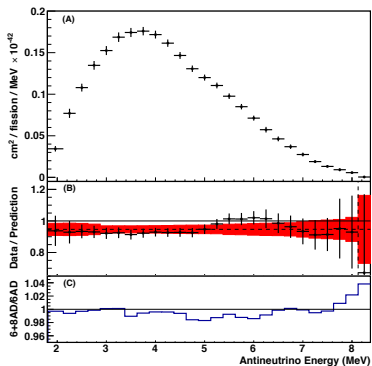
Reactor antineutrino spectrum

Observed positron spectrum



- Bump feature around 5–6 MeV.
- Consistent with other experiments.
- Seen for both Huber+Mueller/ILL+Vogel.

Extracted antineutrino spectrum



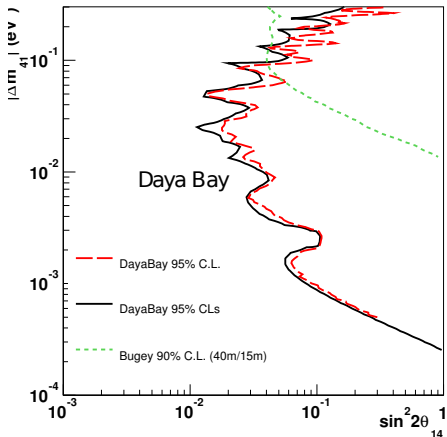
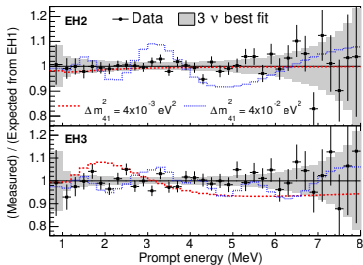
- Global significance: 2.9σ .
- Local significance: 4.4σ .

621 days, arXiv:1607.05378, CPC

Light sterile neutrino search

217 days, arXiv:1407.7259, PRL

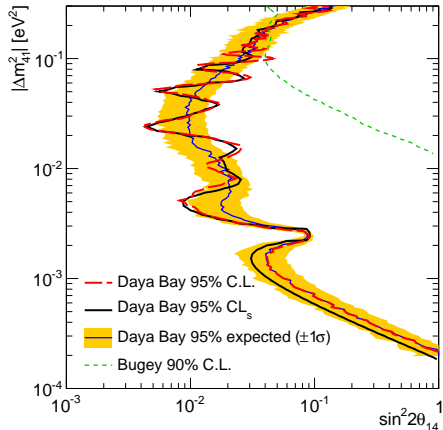
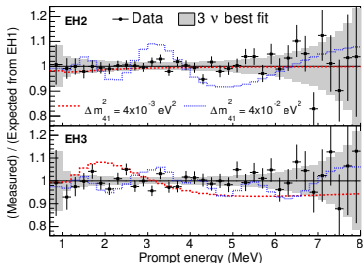
- Sterile neutrino will cause spectral distortions at the near and far sites.
- Relative measurement independent of reactor related systematics.
- **Result is consistent with 3-flavor oscillations.**



Light sterile neutrino search

621 days, arXiv:1607.01174, PRL

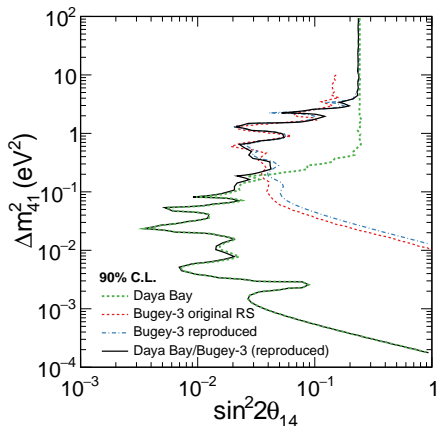
- Sterile neutrino will cause spectral distortions at the near and far sites.
- Relative measurement independent of reactor related systematics.
- **Result is consistent with 3-flavor oscillations.**



Light sterile neutrino search with Bugey-3 and MINOS

621 days, arXiv:1607.01174, PRL

- Combining Daya Bay and Bugey-3 data strongly constrains Δm_{41}^2 and $\sin^2 2\theta_{41}$.
- Combining Daya Bay and Bugey-3 and MINOS data allows to constrain Δm_{41}^2 and $\sin^2 2\theta_{41} \sin^2 2\theta_{42}$.
- Joint analysis strongly suggests that LSND results is not due to **sterile neutrino**.

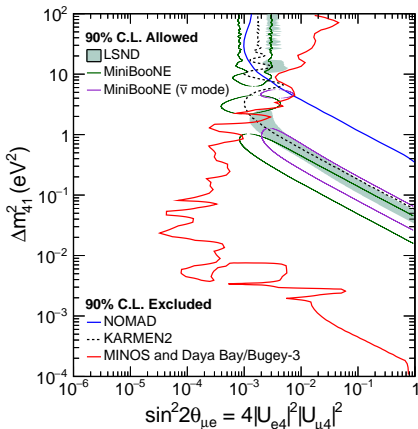


Light sterile neutrino search with Bugey-3 and MINOS

621 days, arXiv:1607.01174, PRL

+MINOS, arXiv:1607.01177, PRL

- Combining Daya Bay and Bugey-3 data strongly constrains Δm_{41}^2 and $\sin^2 2\theta_{41}$.
- Combining Daya Bay and Bugey-3 and MINOS data allows to constrain Δm_{41}^2 and $\sin^2 2\theta_{41} \sin^2 2\theta_{42}$.
- Joint analysis strongly suggests that LSND results is not due to **sterile neutrino**.



Wave packet effects

621 days, arXiv:1608.01661, EPJC

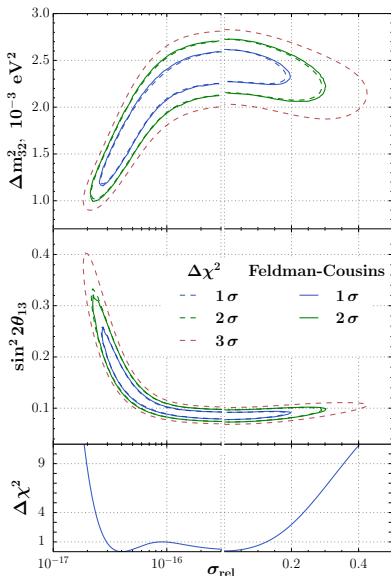
- The obtained limits read

$$2.38 \cdot 10^{-17} < \sigma_{\text{rel}} < 0.23,$$

- taking into account the reactor/detector sizes:

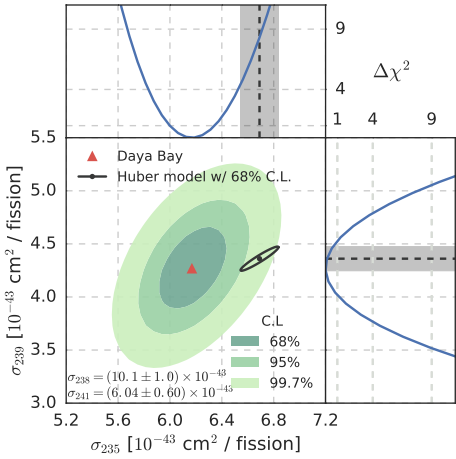
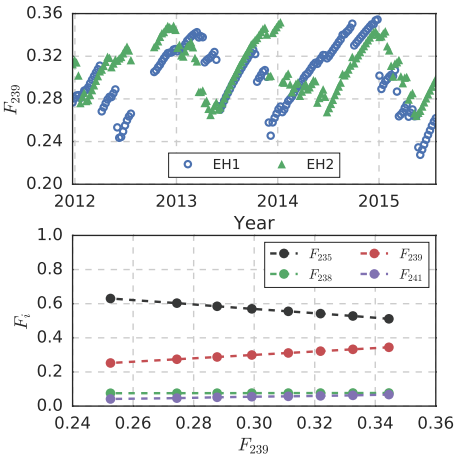
$$10^{-11} \text{ cm} \lesssim \sigma_x \lesssim 2m.$$

- These results ensure unbiased measurement of $\sin^2 2\theta_{13}$ and Δm_{32}^2 within the PW model.





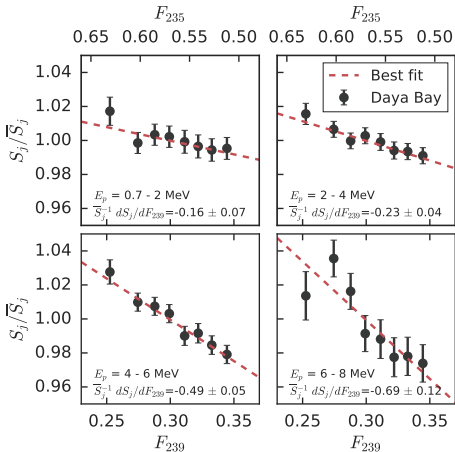
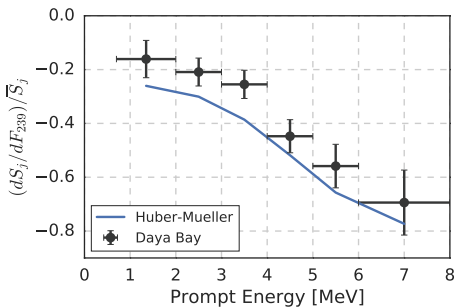
Reactor antineutrino flux evolution (1230 days)



- Effective fission fractions F_i change in time as fuel evolves.
- 3.1σ discrepancy in the antineutrino flux variation with respect to the reactor fuel composition model prediction.
- Indication that ^{235}U is the dominant contributor to reactor anomaly.

arXiv:1704.01082, PRL

Reactor antineutrino spectrum evolution (1230 days)



- Spectrum shape evolution consistent with model predictions

arXiv:1704.01082, PRL



Содержание

7 Other results

8 Selection and uncertainties

9 Antineutrino detector

10 Backgrounds

11 The model and fitting

Эффективность детектора: 621 день

Detector	Efficiency	Correlated	Uncorrelated
Target Protons		0.47%	0.03%
Flasher cut	99.98%	0.01%	0.01%
Prompt energy cut	99.81%	0.10%	0.01%
Delayed energy cut	92.70%	0.97%	0.12%
Capture time cut	98.70%	0.12%	0.01%
Multiplicity cut		0.02%	<0.01%
Gd capture fraction	84.20%	0.95%	0.1%
Spill-in	104.9%	1.5%	0.02%
Livetime	100.0%	0.002%	<0.01%
Combined	80.6%	2.1%	0.2%

Correlated		Uncorrelated	
Energy/fission	0.2%	Power	0.5%
$\bar{\nu}_e$ /fission	3%	Fission fraction	0.6%
		Spent fuel	0.3%
Combined	3%	Combined	0.8%

- Only uncorrelated uncertainties are relevant for Near/Far oscillation analysis.
- Largest systematics smaller than Far site statistics ($\sim 1\%$).
- Influence of uncorrelated reactor systematics is reduced by far/near measurement.



Эффективность детектора: 1230 дней

Detector	Efficiency	Correlated	Uncorrelated
Target Protons		0.92%	0.03%
Flasher cut	99.98%	0.01%	0.01%
Prompt energy cut	99.8%	0.10%	0.01%
Delayed energy cut	92.7%	0.97%	0.08%
Capture time cut	98.7%	0.12%	0.01%
Multiplicity cut		0.02%	0.01%
Gd capture fraction	84.2%	0.95%	0.10%
Spill-in	104.9%	1.00%	0.02%
Livetime	100.0%	0.002%	0.01%
Combined	80.6%	1.93%	0.13%

Correlated		Uncorrelated	
Energy/fission	0.2%	Power	0.5%
$\bar{\nu}_e$ /fission	3%	Fission fraction	0.6%
		Spent fuel	0.3%
Combined	3%	Combined	0.8%

- Only uncorrelated uncertainties are relevant for Near/Far oscillation analysis.
- Largest systematics smaller than Far site statistics ($\sim 1\%$).
- Influence of uncorrelated reactor systematics is reduced by far/near measurement.

← Эффекты детектора

Результаты отбора событий за период P12B: 50 дней

Площадка Детектор	Ближняя, Daya Bay		Ближняя, Ling Ao AD3	AD4	Дальняя	
	AD1	AD2			AD5	AD6
Кандидаты ОБР	28692	28857	22169	3536	3464	3461
Время набора данных (дни)	49.5527		49.4968		48.9453	
ϵ_μ	0.8143	0.8108	0.8460	0.9815	0.9803	0.9809
ϵ_m	0.9755	0.9758	0.9768	0.9743	0.9739	0.9738
Случайные совпадения (в день)	10.00 ± 0.06	10.11 ± 0.06	7.76 ± 0.05	3.37 ± 0.03	3.43 ± 0.03	3.21 ± 0.03
Быстрые нейтроны (в день)	0.95 ± 0.28		0.71 ± 0.22		0.07 ± 0.02	
${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ (в день)	2.74 ± 0.64		1.45 ± 0.89		0.16 ± 0.08	
${}^{241}\text{Am}/{}^{13}\text{C}$ (в день)	0.2 ± 0.2		0.2 ± 0.2		0.2 ± 0.2	
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ (в день)	0.04 ± 0.02		0.035 ± 0.02		0.03 ± 0.02	

Результаты отбора событий за период R12C: 139 дней

Площадка Детектор	Ближняя, Daya Bay		Ближняя, Ling Ao AD3	AD4	Дальняя	
	AD1	AD2			AD5	AD6
Кандидаты ОБР	68654	69336	65845	9819	9730	9518
Время набора данных (дни)	127.553		127.376		126.26	
ϵ_μ	0.814	0.8108	0.8464	0.9808	0.9802	0.9802
ϵ_m	0.9756	0.9759	0.9771	0.9758	0.9755	0.9753
Случайные совпадения (в день)	9.93 ± 0.06	9.84 ± 0.06	7.74 ± 0.06	3.14 ± 0.03	3.13 ± 0.03	3.02 ± 0.03
Быстрые нейтроны (в день)	0.94 ± 0.28		0.61 ± 0.19		0.05 ± 0.02	
${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ (в день)	2.67 ± 0.66		1.02 ± 0.64		0.22 ± 0.06	
${}^{241}\text{Am}/{}^{13}\text{C}$ (в день)	0.179 ± 0.063		0.179 ± 0.063		0.179 ± 0.063	
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ (в день)	0.08 ± 0.04	0.07 ± 0.04	0.05 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02

Результаты отбора событий за период Р14А: 621 день

Площадка Детектор	Ближняя, Daya Bay		Ближняя, Ling Ao		Дальняя			
	AD1	AD2	AD3	AD8	AD4	AD5	AD6	AD7
Кандидаты ОБР	299024	303947	279365	183131	40507	40819	40282	27012
Время набора данных (дни)	559.150	559.157	558.048	368.426	555.645	555.645	555.645	365.885
ϵ_μ	0.8182	0.8153	0.8482	0.8482	0.9810	0.9805	0.9806	0.9809
ϵ_m	0.9765	0.9769	0.9778	0.9777	0.9776	0.9774	0.9772	0.9780
Случайные совпадения (в день)	8.66 ± 0.03	8.62 ± 0.03	6.65 ± 0.03	6.66 ± 0.03	1.66 ± 0.01	1.56 ± 0.01	1.55 ± 0.01	1.22 ± 0.01
Быстрые нейтроны (в день)	0.92 ± 0.92		0.62 ± 0.62			0.04 ± 0.04		
${}^3\text{He}/{}^9\text{Li}$ (в день)	2.40 ± 2.40		1.20 ± 1.20			0.22 ± 0.22		
${}^{241}\text{Am}/{}^{13}\text{C}$ (в день)	0.22 ± 0.22	0.22 ± 0.22	0.21 ± 0.21	0.22 ± 0.22	0.11 ± 0.11	0.10 ± 0.10	0.10 ± 0.10	0.07 ± 0.07
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ (в день)	0.08 ± 0.04	0.07 ± 0.04	0.05 ± 0.03	0.07 ± 0.04	0.05 ± 0.03	0.05 ± 0.03	0.05 ± 0.03	0.05 ± 0.03

Результаты отбора событий за период P15A: 1230 дней

Площадка Детектор	Ближняя, Daya Bay		Ближняя, Ling Ao		Дальняя			
	AD1	AD2	AD3	AD8	AD4	AD5	AD6	AD7
Кандидаты ОБР	597618	606351	567196	466013	80479	80742	80067	66862
Время набора данных (дни)	1117.178	1117.178	1114.337	924.933	1106.915	1106.915	1106.915	917.417
ϵ_μ	0.8255	0.8221	0.8573	0.8571	0.9824	0.9823	0.9821	0.9826
ϵ_m	0.9744	0.9747	0.9757	0.9757	0.9759	0.9758	0.9756	0.9758
Случайные совпадения	8.46	8.46	6.29	6.18	1.27	1.19	1.20	0.98
(в день)	± 0.09	± 0.09	± 0.06	± 0.06	± 0.01	± 0.01	± 0.01	± 0.01
Быстрые нейтроны		0.79		0.57			0.05	
(в день)	± 0.10		± 0.07			± 0.01		
${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$		2.46		1.72			0.15	
(в день)	± 1.06		± 0.77			± 0.06		
${}^{241}\text{Am}{}^{13}\text{C}$, 6AD	0.27	0.25	0.28		0.22	0.21	0.21	
(в день)	± 0.12	± 0.11	± 0.13		± 0.10	± 0.10	± 0.10	
${}^{241}\text{Am}{}^{13}\text{C}$, 8AD	0.15	0.16	0.13	0.15	0.04	0.03	0.03	0.05
(в день)	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.02	± 0.02	± 0.02	± 0.02
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$	0.08	0.07	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05
(в день)	± 0.04	± 0.04	± 0.03	± 0.04	± 0.03	± 0.03	± 0.03	± 0.03
Поток ОБР	653.03	665.42	599.71	593.82	74.25	74.60	73.98	74.73
(в день)	± 1.37	± 1.38	± 1.12	± 1.18	± 0.28	± 0.28	± 0.28	± 0.30



Содержание

7 Other results

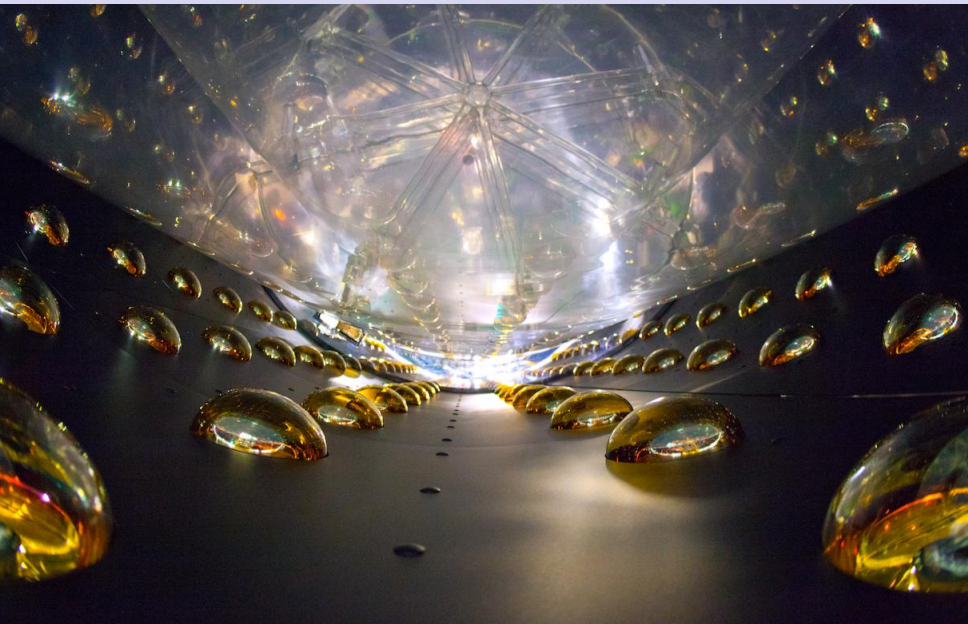
8 Selection and uncertainties

9 Antineutrino detector

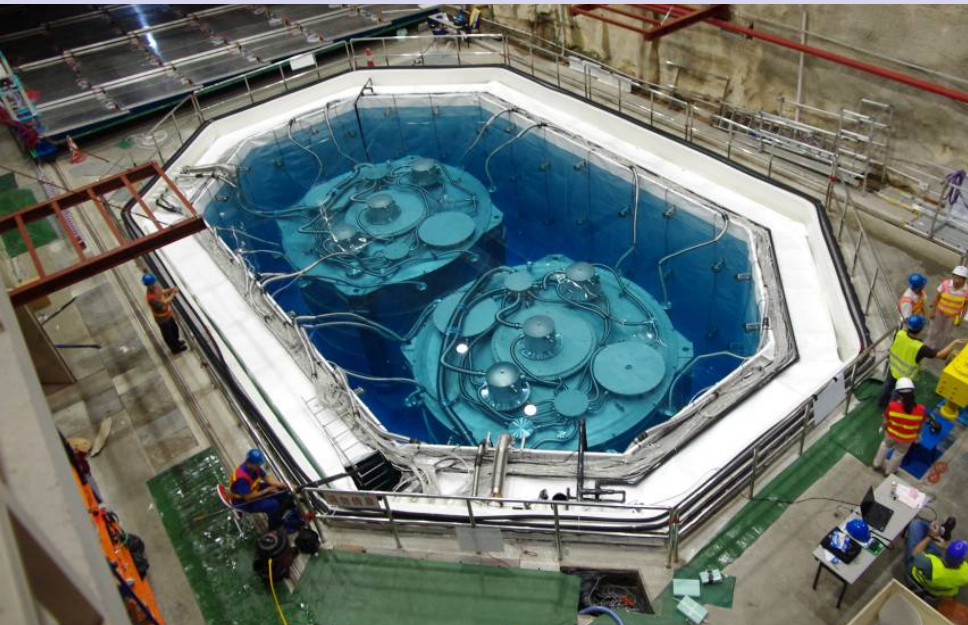
10 Backgrounds

11 The model and fitting

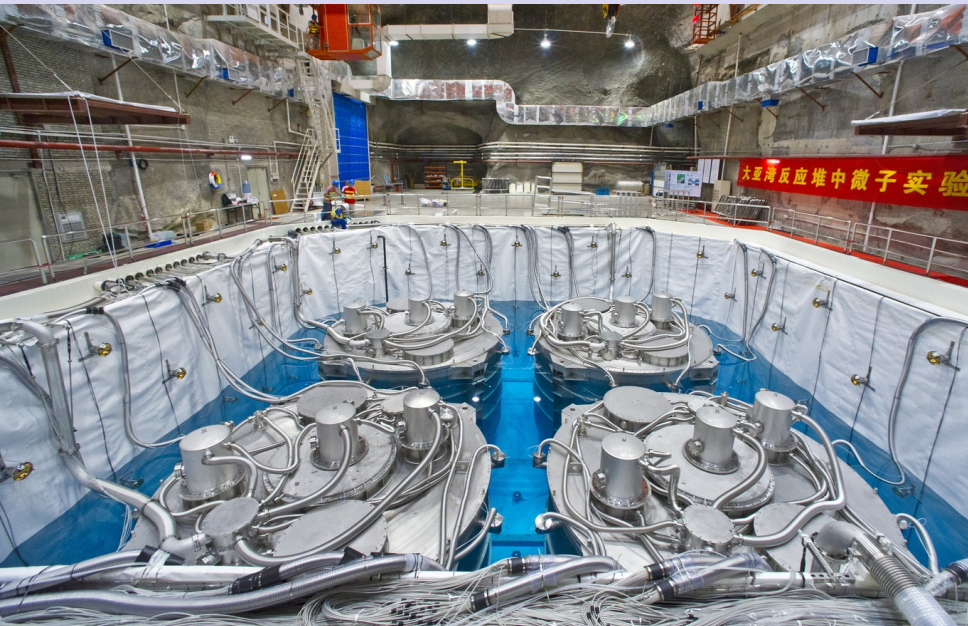
Inside the AD



Experimental hall 1



Experimental hall 3



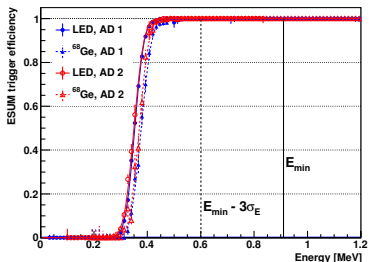
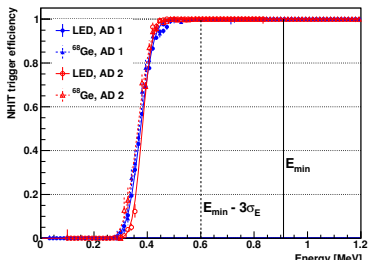
Trigger

Trigger criteria:

- Signal > 0.25 p. e.:
 - ▶ $N_{hit} > 45$.
 - ▶ $E_{sum} > 0.4$ MeV.
- Water pool:
 - ▶ $N_{hit} > 12$.

Trigger efficiency:

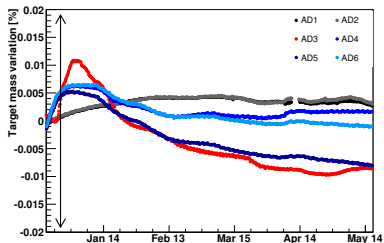
- Measured from LED light and ^{68}Ge source.
- No measurable inefficiency above 0.7 MeV.
- Minimal $E_p \approx 0.95$ MeV.



AD liquids

Target mass:

- Target mass is measured during filling by the load cell with precision of $\sim 3\text{kg}$, 0.015% .
- Cross-checked by the Coriolis meters with precision of 0.1% .
- $M_{\text{target}} = M_{\text{fill}} - M_{\text{overflow}}$



Liquid scintillator composition:

- LAB + Gd (0.1%) + PPO (3 g/L) + bis-MSB (15mg/L)
- One year 1-ton prototype monitoring on GdLS stability.

Liquids storage and filling:

- Fill each AD from all 5 storage tanks.
- Fill ADs in pairs.
- Recirculate storage tanks.

Antineutrino detectors comparison

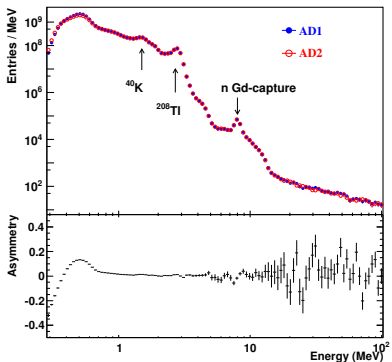


Рис.: Spectra of AD triggers after muon cut.

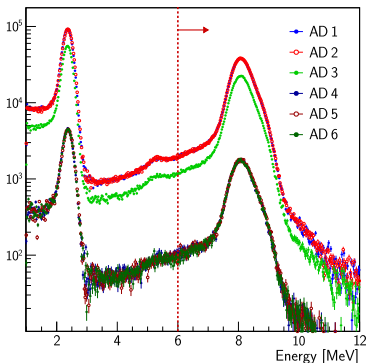


Рис.: Spallation neutrons spectra.

- Two ADs in Hall 1 have functionally identical spectra and response.
- Response of all detectors to neutrons constrains largest systematic uncertainty.



Содержание

7 Other results

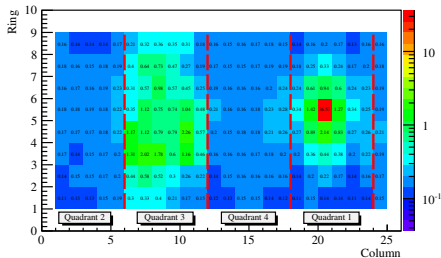
8 Selection and uncertainties

9 Antineutrino detector

10 Backgrounds

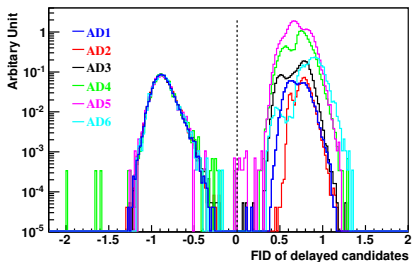
11 The model and fitting

Flashers identification



Flashers — PMTs spontaneously emitting light:

- ~ 5% of PMTs
- ~ 5% of the events
- Rejected based on the topology



$$d_{max} = Q_{max} / Q_{sum}$$

$$d_{quad} = Q_3 / (Q_2 + Q_4)$$

$$FID = \log_{10} \left[\left(\frac{d_{quad}}{1} \right)^2 + \left(\frac{d_{max}}{0.45} \right)^2 \right] < 0$$

Backgrounds: accidentals

Accidental event — two signals accidentally satisfy event selection criteria.

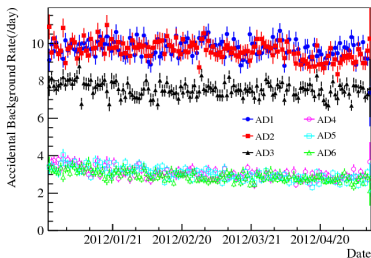


Рис.

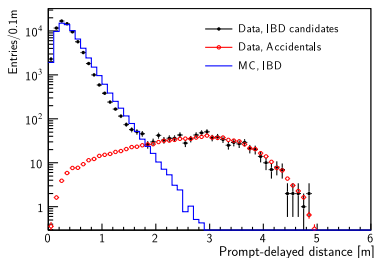


Рис.

- Calculated based on prompt and delayed rates.
- Cross-checks:
 - ▶ Prompt-delayed distance distribution.
 - ▶ Off-window coincidence.

Backgrounds: ${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$

Long-lived isotopes of ${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$ decay with both β and neutron emission.

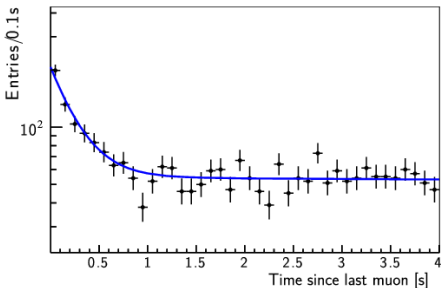


Рис.

- Calculated by fitting the time-after-last-muon events distribution. Based on known half-life times:
 - ▶ ${}^9\text{Li}$ $\lambda = 178\text{ms}$
 - ▶ ${}^8\text{He}$ $\lambda = 119\text{ms}$
- Cross-checks:
 - ▶ Analyze muon samples with and without followed neutrons.

Backgrounds: fast neutrons

Fast neutrons can produce recoil protons, which mimic prompt signal. Neutron capture itself is the delayed signal.

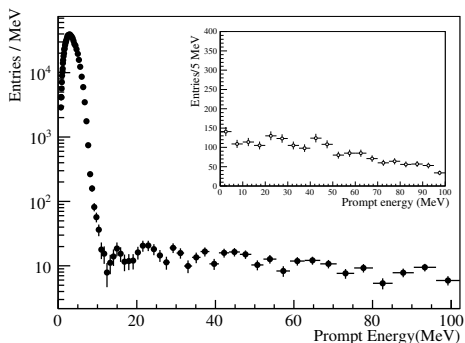


Рис.

■ Method I:

- ▶ Collect events with $12 \text{ MeV} < E_p < 100 \text{ MeV}$
- ▶ Extrapolate the spectrum to the $E_p < 12 \text{ MeV}$

■ Method II:

- ▶ Use water pool and RPC to determine the number of fast neutrons.

Backgrounds: $^{241}\text{Am}^{13}\text{C}$ and $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$

Correlated background from $^{241}\text{Am}^{13}\text{C}$ sources (ACU):

- Neutron inelastic scattering on ^{56}Fe + neutron capture on Fe/Cr/Mn/Ni.
- Estimated based on simulation.

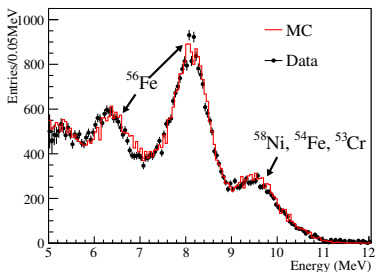


Рис.: Energy spectrum of the events near the top of ADs in the Far Hall.

Correlated $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ background:

- ^{238}U , ^{232}Th , ^{227}Ac and ^{210}Po α rates are measured.
- Neutron yield is calculated with MC.

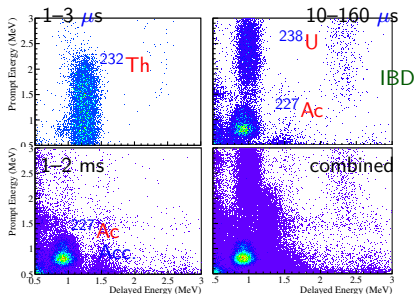


Рис.: Correlations of prompt and delayed energy for cascade decay chains.

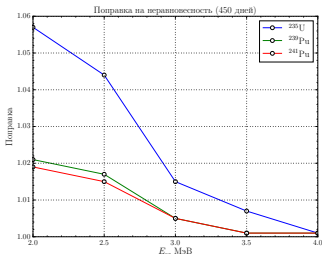
Электронные антинейтрино от реактора

Поправка на неравновесность

- Время иррадации в ILL порядка суток.
- Вклад долгоживущих изотопов зависит от времени работы реактора (года).

Спектр:

- **Mueller et al.**, [1101.2663]
- Копейкин, [ЯФ75]

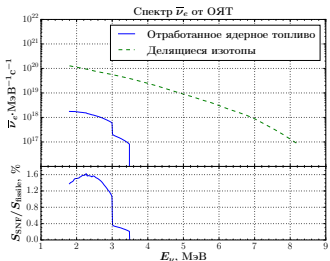


Отработавшее ядерное топливо

- ОЯТ хранится в бассейне недалеко от реактора.
- Вклад в поток $\sim 0.3\%$ ($\pm 100\%$).
- Зависит от истории выгрузки ОЯТ

Спектр:

- **Копейкин et al.**, [hep-ph/0412044]
- Zhou Bin et al., [Chin.Phis.C36]



Интегрирование

Спектральный анализ

$$N_{dk}^{\nu} \propto \sum_j C_{kj} \int_{-1}^{+1} d \cos \theta \int_{E_j^{\text{vis}}}^{E_{j+1}^{\text{vis}}} d E_{\text{vis}} \frac{d E_{\nu}(E_{\text{vis}}, \cos \theta)}{d E_{\text{vis}}} \frac{d \sigma(E_{\nu}, \cos \theta)}{d \cos \theta} P(E_{\nu}) S(E_{\nu})$$

- Эффекты детектора
- Якобиан перехода $E_{\nu} \rightarrow E_{\text{vis}}$
- Сечение обратного бета-распада
- Вероятность выживания электронных антинейтрино
- Спектр реакторных электронных антинейтрино

Интегрирование

Спектральный анализ

$$N_{dk}^{\nu} \propto \sum_j C_{kj} \int_{-1}^{+1} d \cos \theta \int_{E_j^{\text{vis}}}^{E_{j+1}^{\text{vis}}} d E_{\text{vis}} \frac{d E_{\nu}(E_{\text{vis}}, \cos \theta)}{d E_{\text{vis}}} \frac{d \sigma(E_{\nu}, \cos \theta)}{d \cos \theta} P(E_{\nu}) S(E_{\nu})$$

- Интегрирование по методу Гаусса-Лежандра
- Количество опорных точек выбирается индивидуально для каждого интервала j и зависит от скорости осцилляций подинтегральной функции.

Интегрирование

Спектральный анализ

$$N_{dk}^{\nu} \propto \sum_j C_{kj} \int_{-1}^{+1} d \cos \theta \int_{E_j^{\text{vis}}}^{E_{j+1}^{\text{vis}}} dE_{\text{vis}} \frac{dE_{\nu}(E_{\text{vis}}, \cos \theta)}{dE_{\text{vis}}} \frac{d\sigma(E_{\nu}, \cos \theta)}{d \cos \theta} P(E_{\nu}) S(E_{\nu})$$

- Интегрирование по методу Гаусса-Лежандра
- Количество опорных точек выбирается индивидуально для каждого интервала j и зависит от скорости осцилляций подинтегральной функции.

Rate-only анализ

$$N_d^{\nu} \propto \int_{1.8 \text{ МэВ}}^{13.1 \text{ МэВ}} dE_{\nu} \frac{d\sigma(E_{\nu}, \cos \theta)}{d \cos \theta} P(E_{\nu}) S(E_{\nu})$$

- Детектор регистрирует реакторные антинейтрино всех возможных энергий с одинаковой эффективностью
- Нет необходимости в учёте энергетических эффектов

Модель эксперимента с реакторными антинейтрино

$$\begin{aligned}
 N_{dk}^\nu = & B^{dk} + \sum_{kj} C_j^k \sum_t \epsilon_t^d T_t^d M_t^d \times \\
 & \times \int_{-1}^{+1} d \cos \theta \int_{E_j^{\text{vis}}}^{E_{j+1}^{\text{vis}}} d E_{\text{vis}} \frac{d \sigma(E_\nu, \cos \theta)}{d \cos \theta} \frac{d E_\nu(E_{\text{vis}}, \cos \theta)}{d E_{\text{vis}}} \times \\
 & \times \sum_r \frac{1}{4\pi (L_r^d)^2} \sum_c \omega_c P_c(E_\nu, L_r^d) \times \\
 & \times \left[\frac{W_{rt}}{\sum_{i'} f_{i'rt} \langle e \rangle_{i'}} \sum_i f_{irt} S_i(E_\nu) C_i(E_\nu) + F_r(E_\nu) \right]
 \end{aligned}$$

Модель эксперимента с реакторными антинейтрино

$$\begin{aligned}
 N_{dk}^{\nu} = & B^{dk} + \sum_{kj} C_j^k \sum_t \varepsilon_t^d T_t^d M_t^d \times \\
 & \times \int_{-1}^{+1} d \cos \theta \int_{E_j^{\text{vis}}}^{E_{j+1}^{\text{vis}}} d E_{\text{vis}} \frac{d \sigma(E_{\nu}, \cos \theta)}{d \cos \theta} \frac{d E_{\nu}(E_{\text{vis}}, \cos \theta)}{d E_{\text{vis}}} \times \\
 & \times \sum_r \frac{1}{4 \pi (L_r^d)^2} \sum_c \omega_c P_c(E_{\nu}, L_r^d) \times \\
 & \times \left[\frac{W_{rt}}{\sum_{i'} f_{i'rt} \langle e \rangle_{i'}} \sum_i f_{irt} S_i(E_{\nu}) C_i(E_{\nu}) + F_r(E_{\nu}) \right]
 \end{aligned}$$

- Тепловая мощность
- Средняя энергия на деление
- Делящиеся изотопы
- Относительный вклад делящегося изотопа в полное число делений
- Спектр антинейтрино от делящегося изотопа
- Поправка на неравновесность
- Отработавшее ядерное топливо

Модель эксперимента с реакторными антинейтрино

$$\begin{aligned}
 N_{dk}^\nu &= B^{dk} + \sum_{kj} C_j^k \sum_t \epsilon_t^d T_t^d M_t^d \times \\
 &\times \int_{-1}^{+1} d \cos \theta \int_{E_j^{\text{vis}}}^{E_{j+1}^{\text{vis}}} d E_{\text{vis}} \frac{d \sigma(E_\nu, \cos \theta)}{d \cos \theta} \frac{d E_\nu(E_{\text{vis}}, \cos \theta)}{d E_{\text{vis}}} \times \\
 &\times \sum_r \frac{1}{4 \pi (L_r^d)^2} \left[\sum_c \omega_c P_c(E_\nu, L_r^d) \times \right. \\
 &\left. \times \left[\frac{W_{rt}}{\sum_{i'} f_{i'rt} \langle e \rangle_{i'}} \sum_i f_{irt} S_i(E_\nu) C_i(E_\nu) + F_r(E_\nu) \right] \right]
 \end{aligned}$$

- Сумма по реакторам
- Расстояние между детектором и реактором
- Вероятность осцилляций, разбитая на слагаемые

Модель эксперимента с реакторными антинейтрино

- Якобиан перехода $E_{vis} \rightarrow E_\nu$
- Сечение обратного бета-распада
- Направление вылета позитрона

$$N_{dk}^\nu = B^{dk} + \sum_{kj} C_j^k \sum_t \epsilon_t^d T_t^d M_t^d \times$$

$$\times \int_{-1}^{+1} d \cos \theta \int_{E_j^{vis}}^{E_{j+1}^{vis}} dE_{vis} \frac{d\sigma(E_\nu, \cos \theta)}{d \cos \theta} \frac{dE_\nu(E_{vis}, \cos \theta)}{dE_{vis}} \times$$

$$\times \sum_r \frac{1}{4\pi (L_r^d)^2} \sum_c \omega_c P_c(E_\nu, L_r^d) \times$$

$$\times \left[\frac{W_{rt}}{\sum_{i'} f_{i'rt} \langle e \rangle_{i'}} \sum_i f_{irt} S_i(E_\nu) C_i(E_\nu) + F_r(E_\nu) \right]$$

- Интеграл по интервалу E_{vis} (квadrатура Гаусса-Лежандра)

Модель эксперимента с реакторными антинейтрино

- Эффекты энергетической шкалы
- Фон
- Сумма по дням набора данных
- Эффективность детектора
- Время набора данных
- Масса мишени

$$N_{dk}^{\nu} = B^{dk} + \sum_{kj} C_j^k \sum_t \epsilon_t^d T_t^d M_t^d \times$$

$$\times \int_{-1}^{+1} d \cos \theta \int_{E_j^{\text{vis}}}^{E_{j+1}^{\text{vis}}} d E_{\text{vis}} \frac{d\sigma(E_{\nu}, \cos \theta)}{d \cos \theta} \frac{d E_{\nu}(E_{\text{vis}}, \cos \theta)}{d E_{\text{vis}}} \times$$

$$\times \sum_r \frac{1}{4\pi (L_r^d)^2} \sum_c \omega_c P_c(E_{\nu}, L_r^d) \times$$

$$\times \left[\frac{W_{rt}}{\sum_{i'} f_{i'rt} \langle e \rangle_{i'}} \sum_i f_{irt} S_i(E_{\nu}) C_i(E_{\nu}) + F_r(E_{\nu}) \right]$$

Модель эксперимента с реакторными антинейтрино

$$\begin{aligned}
 N_{dk}^\nu = & B^{dk} + \sum_{kj} C_j^k \sum_t \varepsilon_t^d T_t^d M_t^d \times \\
 & \times \int_{-1}^{+1} d \cos \theta \int_{E_j^{\text{vis}}}^{E_{j+1}^{\text{vis}}} d E_{\text{vis}} \frac{d \sigma(E_\nu, \cos \theta)}{d \cos \theta} \frac{d E_\nu(E_{\text{vis}}, \cos \theta)}{d E_{\text{vis}}} \times \\
 & \times \sum_r \frac{1}{4 \pi (L_r^d)^2} \sum_c \omega_c P_c(E_\nu, L_r^d) \times \\
 & \times \left[\frac{W_{rt}}{\sum_{i'} f_{i'rt} \langle e \rangle_{i'}} \sum_i f_{irt} S_i(E_\nu) C_i(E_\nu) + F_r(E_\nu) \right]
 \end{aligned}$$

Модель эксперимента с реакторными антинейтрино

- Углы смешивания

$$N_{dk}^{\nu} = B^{dk} + \sum_c \omega_c(\theta_{12}, \theta_{13}) \sum_{kj} C_j^k \sum_r \frac{1}{4\pi (L_r^d)^2} \sum_i \times$$

$$\times \int_{-1}^{+1} d \cos \theta \int_{E_j^{\text{vis}}}^{E_{j+1}^{\text{vis}}} dE_{\text{vis}} \frac{d\sigma(E_{\nu}, \cos \theta)}{d \cos \theta} \frac{dE_{\nu}(E_{\text{vis}}, \cos \theta)}{dE_{\text{vis}}} \tilde{S}_i(E_{\nu}) P_c(E_{\nu}, L_r^d, \Delta m_c^2) \times$$

$$\times \sum_t \epsilon_t^d T_t^d M_t^d \frac{f_{irt} W_{rt}}{\sum_{i'} f_{i'rt} \langle e \rangle_{i'}}$$

- Кинематика, спектры, расщепления масс
- Вся зависимость от времени

Модель эксперимента с реакторными антинейтрино

$$\begin{aligned}
 N_{dk}^\nu = & B^{dk} + \sum_c \omega_c(\theta_{12}, \theta_{13}) \sum_{kj} C_j^k \sum_r \frac{1}{4\pi (L_r^d)^2} \sum_i \times \\
 & \times \int_{-1}^{+1} d \cos \theta \int_{E_j^{\text{vis}}}^{E_{j+1}^{\text{vis}}} dE_{\text{vis}} \frac{d\sigma(E_\nu, \cos \theta)}{d \cos \theta} \frac{dE_\nu(E_{\text{vis}}, \cos \theta)}{dE_{\text{vis}}} \tilde{S}_i(E_\nu) P_c(E_\nu, L_r^d, \Delta m_c^2) \times \\
 & \times \sum_t \epsilon_t^d T_t^d M_t^d \frac{f_{irt} W_{rt}}{\sum_{i'} f_{i'rt} \langle e \rangle_{i'}}
 \end{aligned}$$

Модель эксперимента с реакторными антинейтрино

$$\begin{aligned}
 N_{dk}^{\nu} = & B^{dk} + \sum_c \omega_c(\theta_{12}, \theta_{13}) \sum_{kj} C_j^k \sum_r \frac{1}{4\pi (L_r^d)^2} \sum_i \times \\
 & \times \sum_{wv} \omega_w \omega_v \frac{d\sigma(E_{wv}^{\nu}, \cos\theta_v)}{d\cos\theta} \frac{dE_{\nu}(E_w^{\text{vis}}, \cos\theta_v)}{dE_{\text{vis}}} \tilde{S}_i(E_{wv}^{\nu}) P_c(E_{wv}^{\nu}, L_r^d, \Delta m_c^2) \times \\
 & \times \sum_t \epsilon_t^d T_t^d M_t^d \frac{f_{irt} W_{rt}}{\sum_{i'} f_{i'rt} \langle e \rangle_{i'}}
 \end{aligned}$$

Функция подгонки

Хи-квадрат со штрафными членами

- Ограниченные параметры
- Свободные параметры
- Модель
- Данные

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(x_i - \mu_i(\theta, \eta))^2}{\sigma_i^2} + \sum_j \frac{(\eta_j - \eta_j^0)^2}{\sigma_{\eta,j}^2}$$

- Статистические ошибки (Пирсона)
- Штрафные члены
- Систематические неопределённости

Функция подгонки

Хи-квадрат со штрафными членами

- Ограниченные параметры
- Свободные параметры
- Модель
- Данные

$$\chi^2 = (x - \mu(\theta, \eta))^T V_{\text{stat}}^{-1} (x - \mu(\theta, \eta)) + (\eta - \eta^0)^T V_{\eta}^{-1} (\eta - \eta^0)$$

- Статистические ошибки (Пирсона)
- Штрафные члены
- Систематические неопределённости

Функция подгонки

Хи-квадрат со штрафными членами

$$\chi^2 = (x - \mu(\theta, \eta))^T V_{\text{stat}}^{-1} (x - \mu(\theta, \eta)) + (\eta - \eta^0)^T V_{\eta}^{-1} (\eta - \eta^0)$$

Rate-only анализ

- Линейная по систематике модель:

$$\mu(\theta, \eta) = \mu(\theta, \eta^0) + D_{\eta}(\eta - \eta^0)$$

- Аналитическое решение для минимума по η :

$$\eta(\theta) = \left(V_{\eta}^{-1} + D_{\eta}^T V_{\text{stat}}^{-1} D_{\eta} \right)^{-1} D_{\eta}^T V_{\text{stat}}^{-1} (x - \mu^0(\theta)) + \eta^0$$

- Численная минимизация по θ .



Функция подгонки

Хи-квадрат со штрафными членами

$$\chi^2 = (x - \mu(\theta, \eta))^T V_{\text{stat}}^{-1} (x - \mu(\theta, \eta)) + (\eta - \eta^0)^T V_{\eta}^{-1} (\eta - \eta^0)$$

Rate-only анализ

- Линейная по η модель, численная минимизация по θ .

Функция подгонки

Chi-квадрат со штрафными членами

$$\chi^2 = (x - \mu(\theta, \eta))^T V_{\text{stat}}^{-1} (x - \mu(\theta, \eta)) + (\eta - \eta^0)^T V_{\eta}^{-1} (\eta - \eta^0)$$

Rate-only анализ

- Линейная по η модель, численная минимизация по θ .

Спектральный анализ (I)

- Линейная по η модель в окрестности $\eta \pm \sigma_{\eta}$, численная минимизация по θ .
- Chi-квадрат с ковариационной матрицей

$$\chi^2 = (x - \mu(\theta, \eta_0))^T V_{\text{full}}^{-1} (x - \mu(\theta, \eta_0))$$

- Способ математически эквивалентен предыдущему.

$$V_{\text{full}}(\theta) = V_{\text{стат.}} + D_{\eta} V_{\eta} D_{\eta}^T.$$



Функция подгонки

Хи-квадрат со штрафными членами

$$\chi^2 = (x - \mu(\theta, \eta))^T V_{\text{stat}}^{-1} (x - \mu(\theta, \eta)) + (\eta - \eta^0)^T V_{\eta}^{-1} (\eta - \eta^0)$$

Rate-only анализ, спектральный анализ (I)

- Линейная по η модель, численная минимизация по θ .

Функция подгонки

Хи-квадрат со штрафными членами

$$\chi^2 = (x - \mu(\theta, \eta))^T V_{\text{stat}}^{-1} (x - \mu(\theta, \eta)) + (\eta - \eta^0)^T V_{\eta}^{-1} (\eta - \eta^0)$$

Rate-only анализ, спектральный анализ (I)

- Линейная по η модель, численная минимизация по θ .

Спектральный анализ (II)

- Систематические параметры η и ζ .
- Хи-квадрат с ковариационной матрицей и штрафными членами:

$$\chi^2 = (x - \mu(\theta, \zeta, \eta_0))^T V_{\text{full}, \eta}^{-1} (x - \mu(\theta, \zeta, \eta_0)) + (\zeta - \zeta^0)^T V_{\zeta}^{-1} (\zeta - \zeta^0)$$

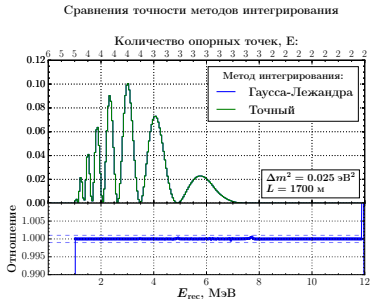
- Линейная по η модель, численная минимизация по θ и ζ .

Особенности dybOscar

Время расчёта модели

Переменная	Время, с
Полное вычисление	4×10^{-1}
Изменение $\Delta m_{32}^2 \sim 2 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$	3×10^{-1}
Параметры энергетической шкалы	3×10^{-2}
Изменение угла смешивания	1×10^{-2}
Нормировка сигнала от реакторов	2×10^{-4}
θ_{ij} , Δm_c^2 , с кешем	2×10^{-6}

- Адаптивное интегрирование: количество точек, необходимое для интеграции интервала выбирается в зависимости от скорости осцилляций функции.
- Оптимизированное вычисление:
 - ▶ Вклад от каждого делящегося изотопа за всё время работы рассчитывается отдельно для каждого детектора.
 - ▶ Вся цепочка вычислений, включая эффекты детектора, производится независимо для каждого слагаемого вероятности осцилляций.
- Гибкая система кеширования и интерполяции по переменным Δm_{13}^2 , θ_{13} , θ_{12} .
- Условные вычисления.
- Виртуализация переменных.





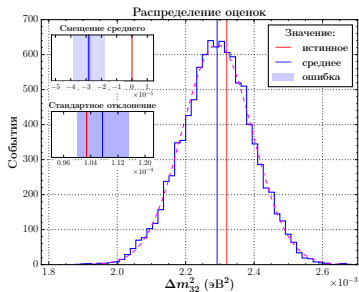
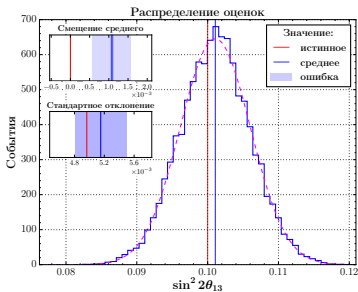
Проверка методики подгонки

-
- Проверка на модельных данных, в том числе полученных с альтернативными параметризациями спектра
 - Проверка на модельных данных других групп
 - Сравнение результатов слепого анализа данных между группами
 - Сравнение результатов анализа данных между группами

◀ dybOscar

▶ Спектры Fallot et al

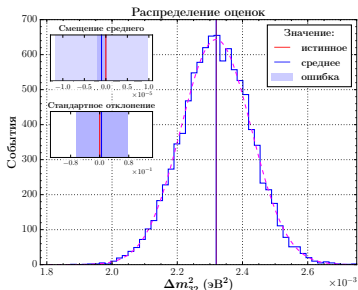
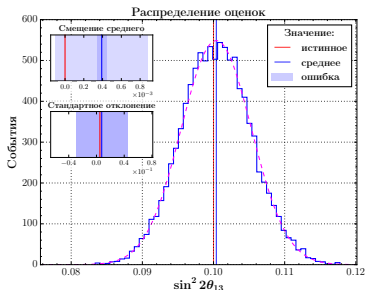
Проверка методики подгонки



- Модель: антинейтринные спектры Fallot [1208.3877].
- Подгонка: антинейтринные спектры Huber+Mueller, [1106.0687], [1101.2663].
- Подгонка: свободные антинейтринные спектры на основе Huber+Mueller, [1106.0687], [1101.2663].

- Проверка на модельных данных, в том числе полученных с альтернативными параметризациями спектра
- Проверка на модельных данных других групп
- Сравнение результатов слепого анализа данных между группами
- Сравнение результатов анализа данных между группами

Проверка методики подгонки

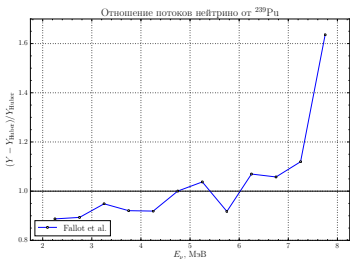
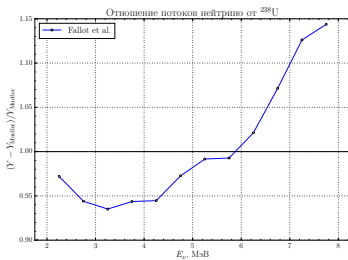
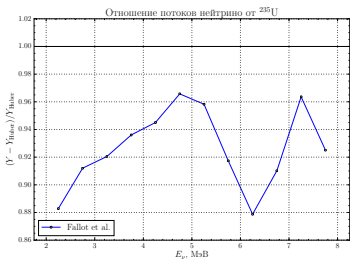


- Модель: антинейтринные спектры Fallot [1208.3877].
- Подгонка: антинейтринные спектры Huber+Mueller, [1106.0687], [1101.2663].
- Подгонка: свободные антинейтринные спектры на основе Huber+Mueller, [1106.0687], [1101.2663].

- Проверка на модельных данных, в том числе полученных с альтернативными параметризациями спектра
- Проверка на модельных данных других групп
- Сравнение результатов слепого анализа данных между группами
- Сравнение результатов анализа данных между группами

Антинейтринные спектры Fallot et al.

По отношению к спектрам Huber+Mueller



← Проверка методики подгонки