

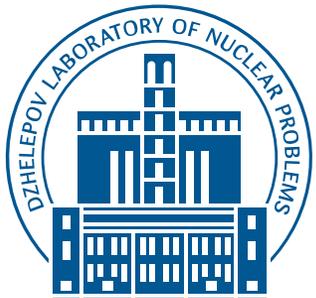
# **JUNO: перспективы осцилляционного анализа реакторных антинейтрино**

**Должиков Дмитрий**

ЛЯП, ОИЯИ

ddolzhikov@jinr.ru

Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий»,  
посвященная 70-летию со дня рождения В.А. Рубакова



19.02.2025

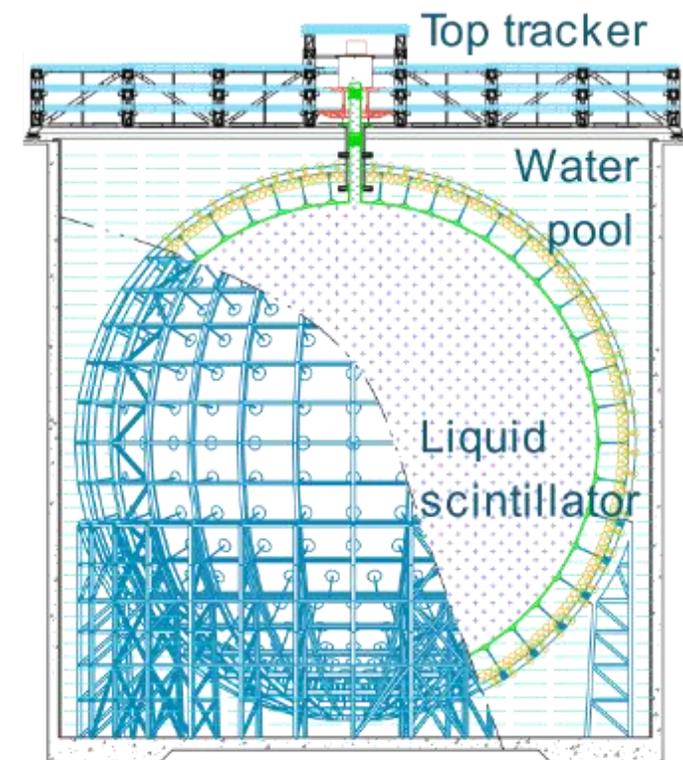


# JUNO и нейтринные осцилляции

# Эксперимент JUNO

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

- ❖ 20 кт Жидкого Сцинтиллятора (ЖС) внутри акриловой сферы диаметром 35 м
- ❖ 39.5 кт воды снаружи сферы (черенковский детектор)
- ❖ В 52.5 км от 8 ядерных реакторов (26.6 ГВт)
- ❖ Энергетическое разрешение  $\sigma < 3\%$  на 1 МэВ
- ❖ Неопределённость энергетической шкалы  $< 1\%$
- ❖ Нейтрино от реакторов, Солнца, Земли, сверхновых и др.



# Эксперимент JUNO

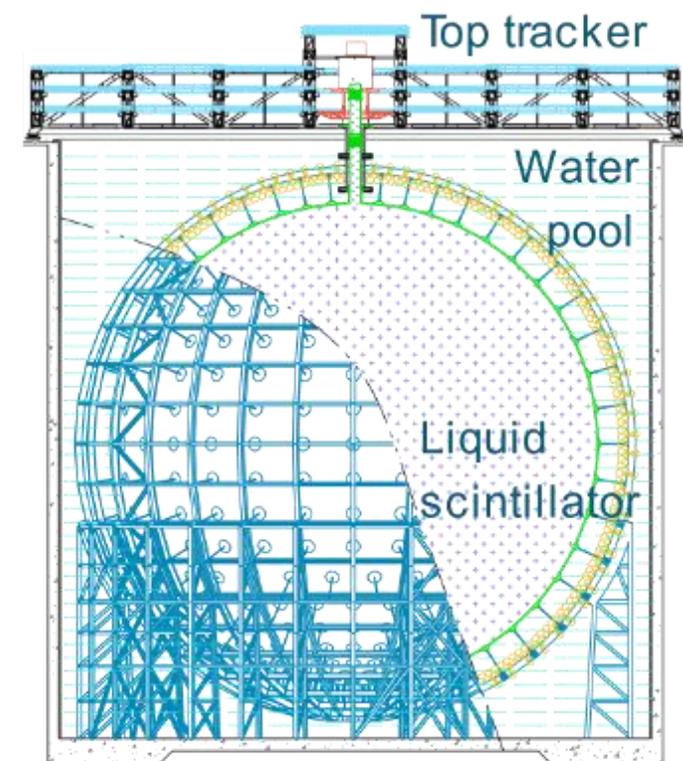
Jiangmen **U**nderground **N**eutrino **O**bservatory (**JUNO**) — многоцелевой нейтринный эксперимент, находящийся на юге Китая

- ❖ 20 кт Жидкого Сцинтиллятора (ЖС) внутри акриловой сферы диаметром 35 м
- ❖ 39.5 кт воды снаружи сферы (черенковский детектор)
- ❖ В 52.5 км от 8 ядерных реакторов (26.6 ГВт)
- ❖ Энергетическое разрешение  $\sigma < 3\%$  на 1 МэВ
- ❖ Неопределённость энергетической шкалы  $< 1\%$
- ❖ Нейтрино от реакторов, Солнца, Земли, сверхновых и др.

Основные задачи (реакторные антинейтрино):

- ❖ Определение упорядоченности масс нейтрино
- ❖ Измерение осцилляционных параметров

$\sin^2\theta_{12}$ ,  $\Delta m_{21}^2$  и  $\Delta m_{31}^2$  с точностью  $< 1\%$

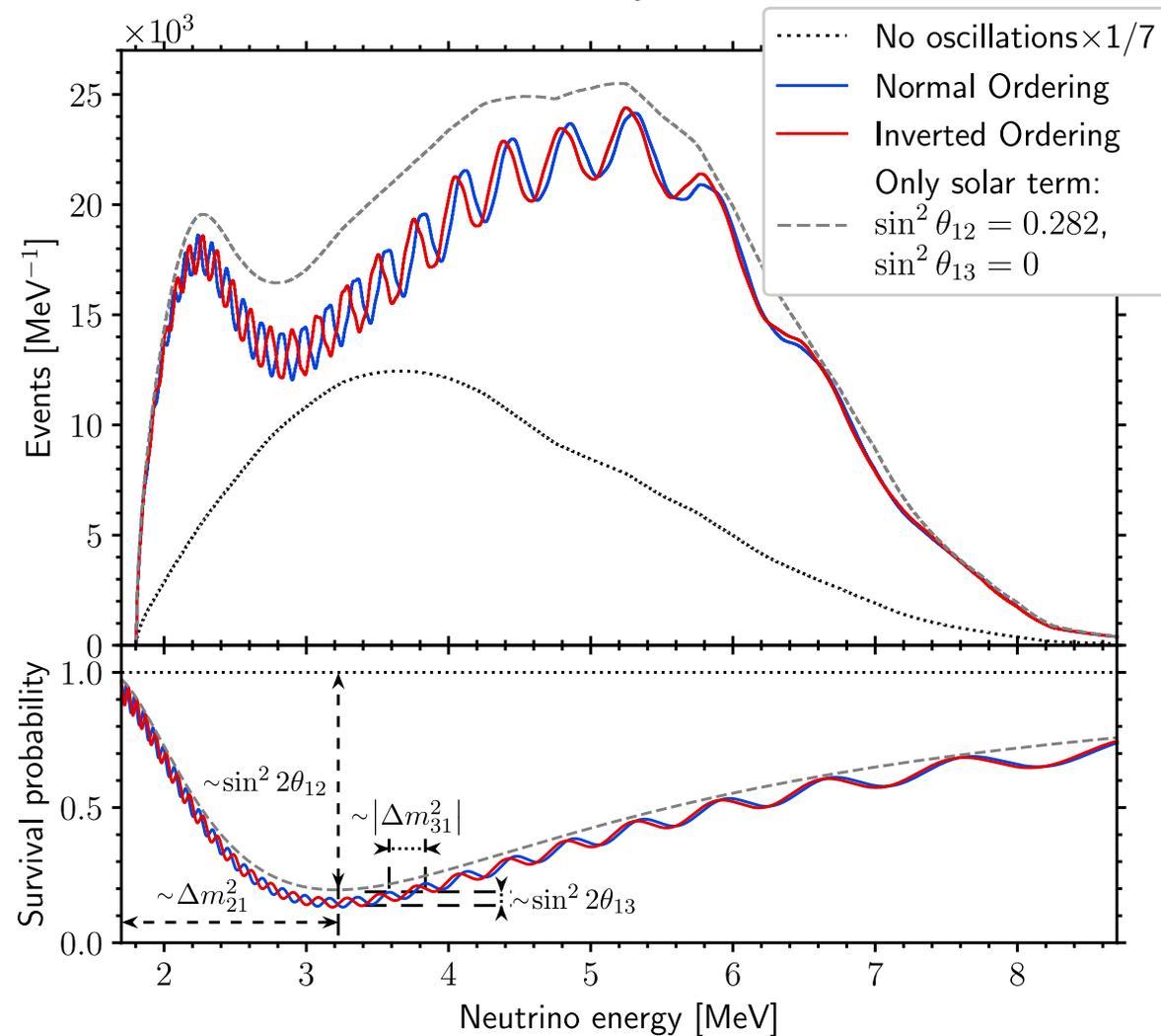


# Осцилляции $\bar{\nu}_e$ в JUNO

❖ Наблюдаемый спектр JUNO зависит от:

- параметров осцилляции  $\Delta m_{31}^2$ ,  $\Delta m_{21}^2$ ,  $\sin^2 \theta_{12}$  и  $\sin^2 \theta_{13}$
- упорядоченности масс нейтрино

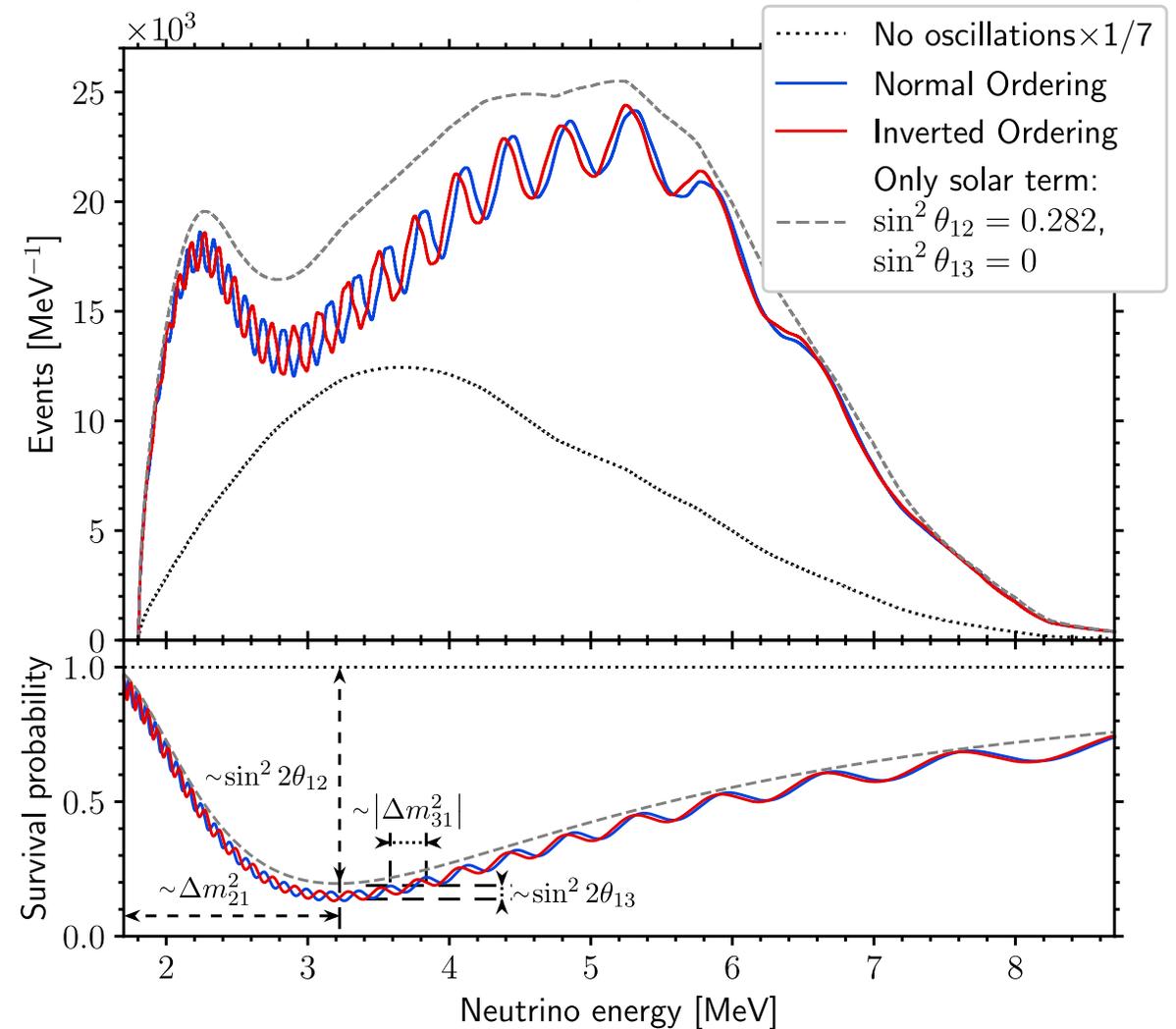
Спектр JUNO в предположении идеального энергетического разрешения и 6 лет набора данных



# Осцилляции $\bar{\nu}_e$ в JUNO

- ❖ Наблюдаемый спектр JUNO зависит от:
  - параметров осцилляции  $\Delta m_{31}^2$ ,  $\Delta m_{21}^2$ ,  $\sin^2 \theta_{12}$  и  $\sin^2 \theta_{13}$
  - упорядоченности масс нейтрино
- ❖ Для определения порядка масс необходимо точное измерение спектра

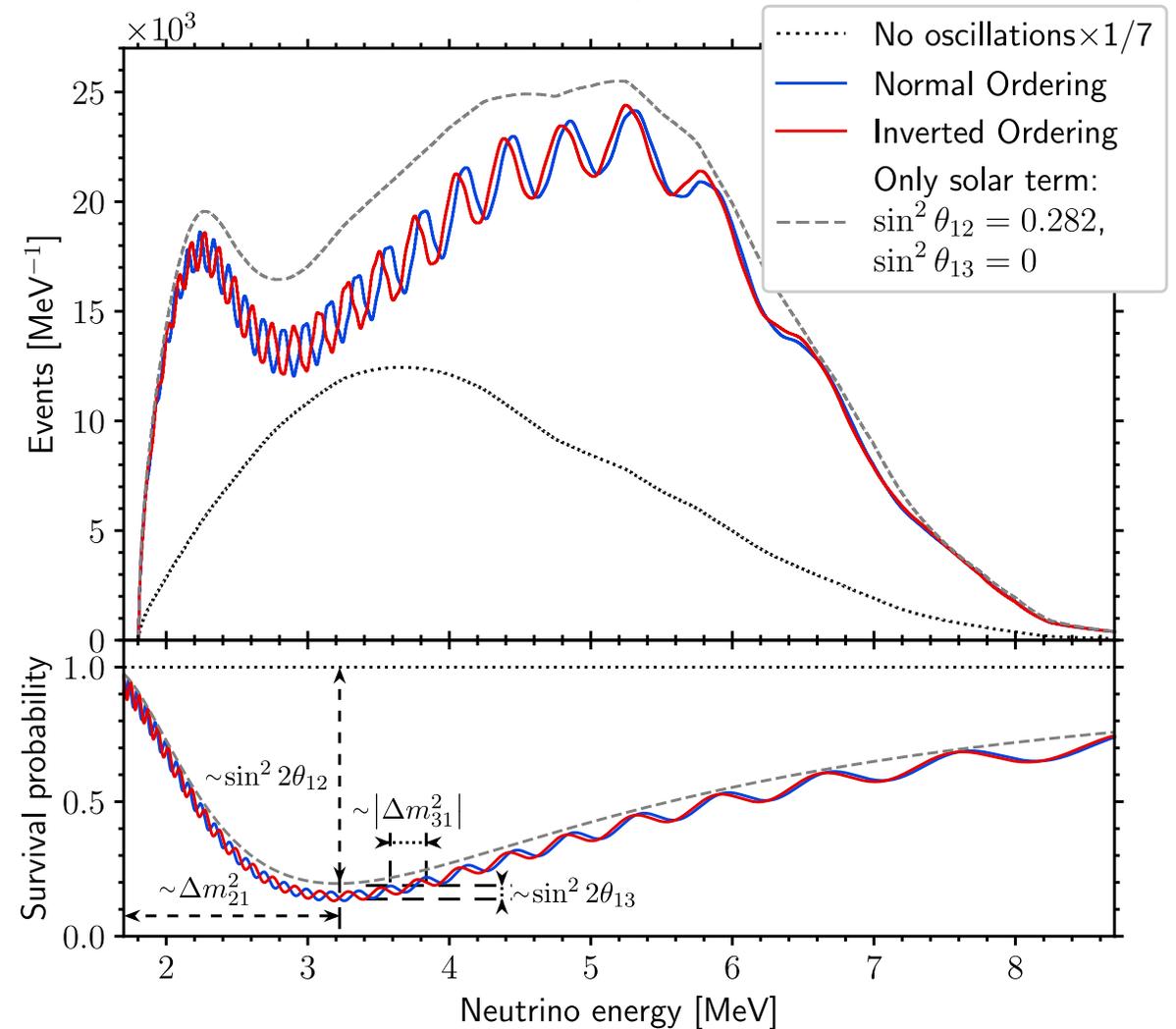
Спектр JUNO в предположении идеального энергетического разрешения и 6 лет набора данных



# Осцилляции $\bar{\nu}_e$ в JUNO

- ❖ Наблюдаемый спектр JUNO зависит от:
  - параметров осцилляции  $\Delta m_{31}^2$ ,  $\Delta m_{21}^2$ ,  $\sin^2 \theta_{12}$  и  $\sin^2 \theta_{13}$
  - упорядоченности масс нейтрино
- ❖ Для определения порядка масс необходимо точное измерение спектра
- ❖ Чтобы разрешить пики, необходимо хорошее **энергетическое разрешение**
- ❖ Чтобы определить позиции пиков, необходима хорошо определённая **энергетическая шкала**

Спектр JUNO в предположении идеального энергетического разрешения и 6 лет набора данных

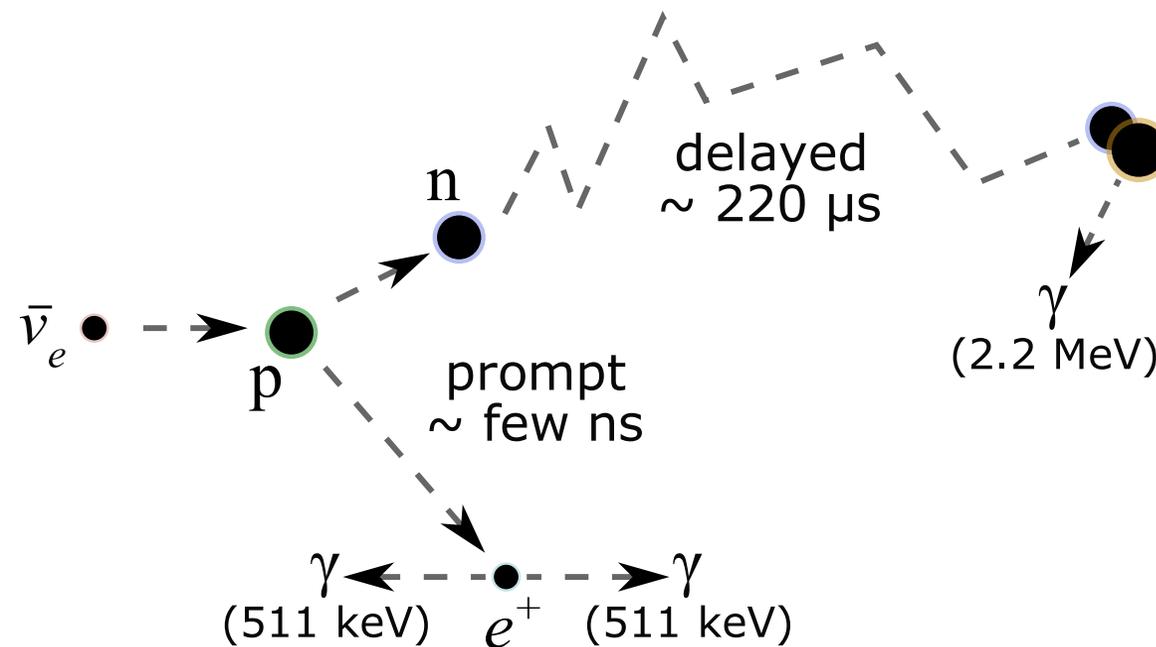


# Детектирование $\bar{\nu}_e$ в JUNO

- ❖ Реакция Обратного Бета Распада (ОБР):



- ❖  $\bar{\nu}_e$  передаёт бóльшую часть энергии позитрону

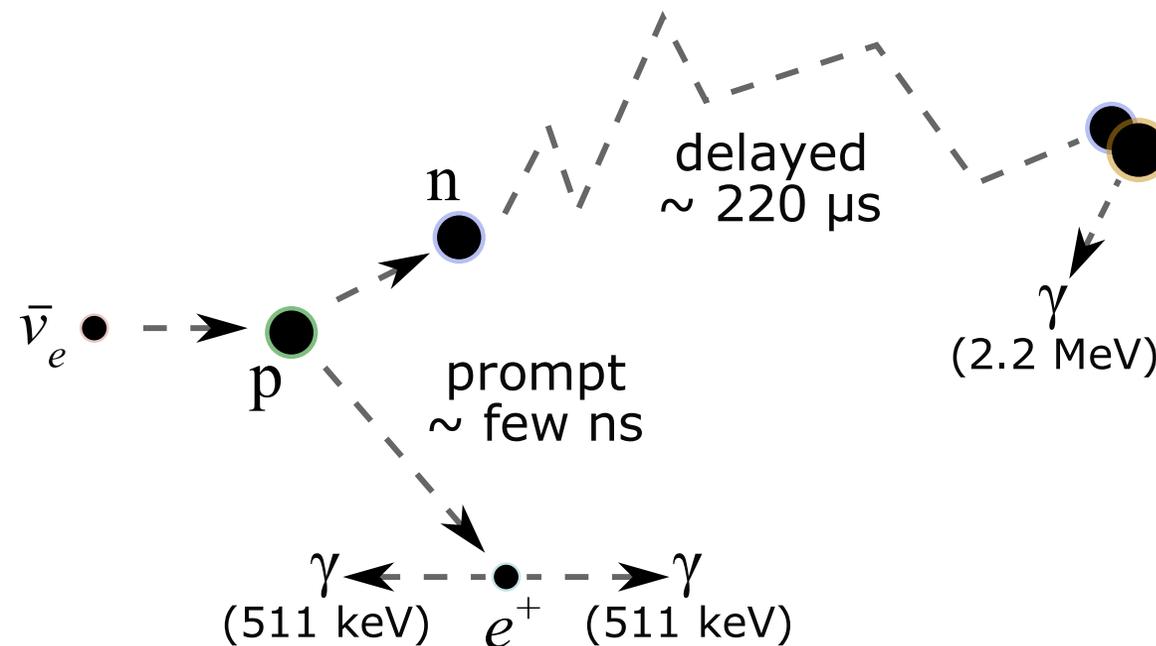


# Детектирование $\bar{\nu}_e$ в JUNO

- ❖ Реакция Обратного Бета Распада (ОБР):



- ❖  $\bar{\nu}_e$  передаёт бóльшую часть энергии позитрону
- ❖ **Мгновенный сигнал:** энергия, высвобожденная позитроном в сцинтиллятор (кинетическая + аннигиляция)
- ❖ **Запаздывающий сигнал:** фотоны от релаксации ядра, захватившего нейтрон

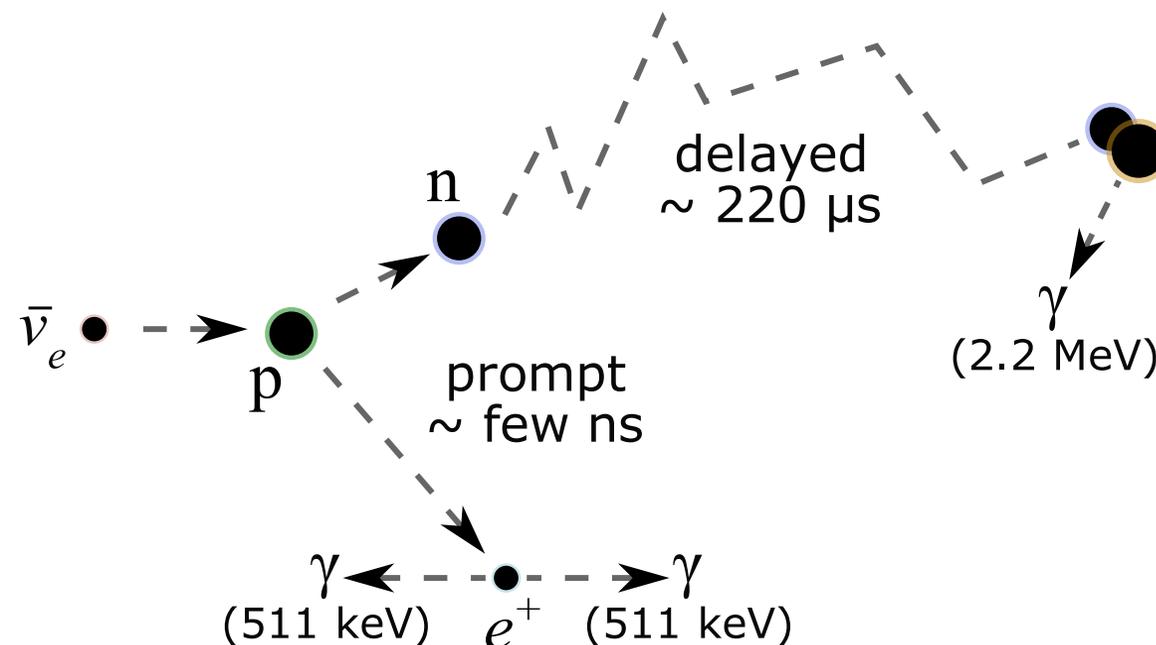


# Детектирование $\bar{\nu}_e$ в JUNO

- ❖ Реакция Обратного Бета Распада (ОБР):



- ❖  $\bar{\nu}_e$  передаёт бóльшую часть энергии позитрону
- ❖ **Мгновенный сигнал:** энергия, высвобожденная позитроном в сцинтиллятор (кинетическая + аннигиляция)
- ❖ **Запаздывающий сигнал:** фотоны от релаксации ядра, захватившего нейтрон



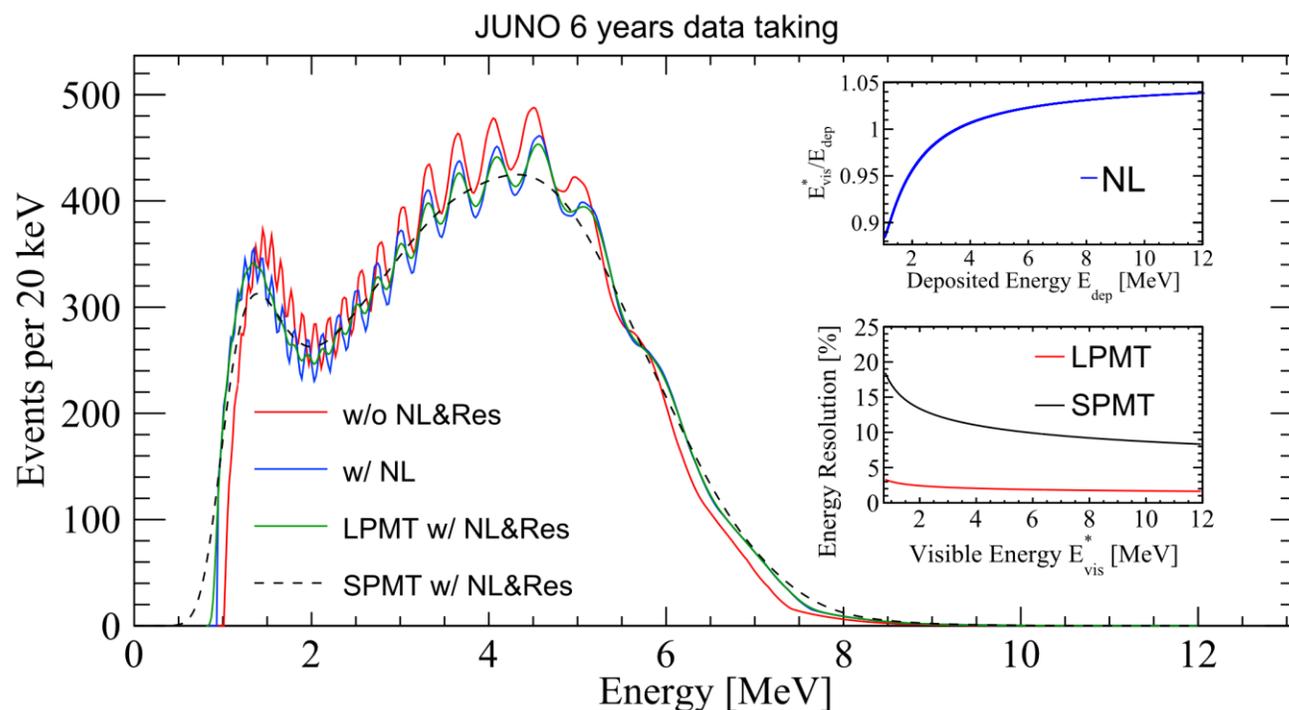
Метод двойного совпадения позволяет эффективно отделять сигнал от ОБР от фоновых событий

# Отклик детектора JUNO

Приблизительная модель преобразования энергии:

$$E_\nu \rightarrow E_{\text{dep}} \rightarrow E_{\text{vis}} \rightarrow E_{\text{rec}}$$

Энергия антинейтрино      Выделенная энергия      Наблюдаемая энергия      Реконструированная энергия



1. Учёт кинематики реакции ОБР и аннигиляции позитрона  
→ выделенная энергия  $e^+$

$$E_{\text{dep}} \simeq E_{\bar{\nu}_e} - 0.782 \text{ MeV}$$

2. Гашение, черенковское излучение  
→ Нелинейность ЖС (NL):

$$E_{\text{vis}} = f_{\text{LSNL}}(E_{\text{dep}}) \cdot E_{\text{dep}}$$

3. Размытие  
→ Энергетическое разрешение (Res):

$$\frac{\sigma_{E^{\text{rec}}}}{E^{\text{vis}}} = \sqrt{\frac{a}{\sqrt{E^{\text{vis}}}} + b^2 + \left(\frac{c}{E^{\text{vis}}}\right)}$$

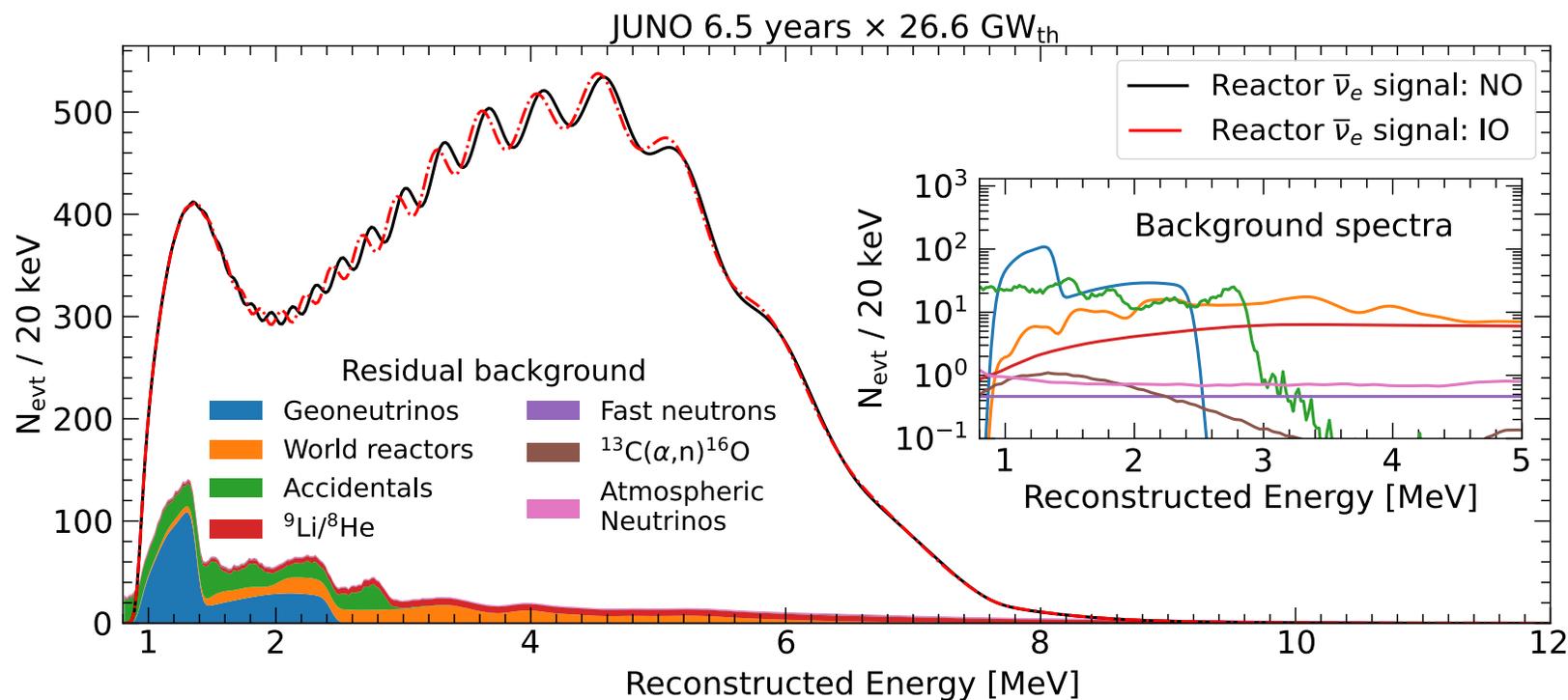
# Ожидаемый сигнал и фон

❖ Эффективность отбора событий ОБР: 82.2%

- Критерии: доверительный объем, энергия, временная задержка, относительное расстояние
- Мюонное вето для подавления фона от космических мюонов

❖ Ожидаемая скорость счёта событий ОБР: 47.1/день

❖ Ожидаемая скорость счёта фоновых событий: 4.11/день

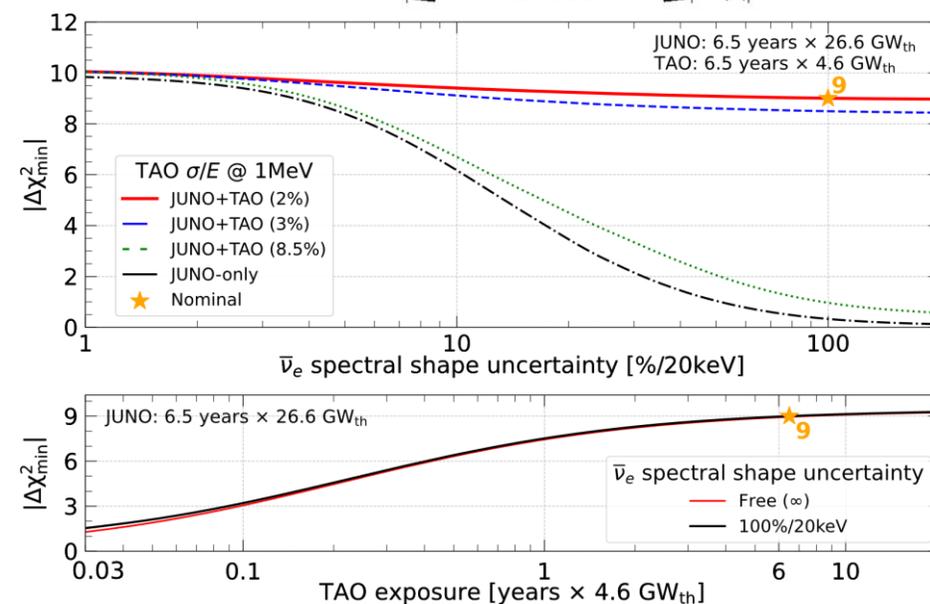
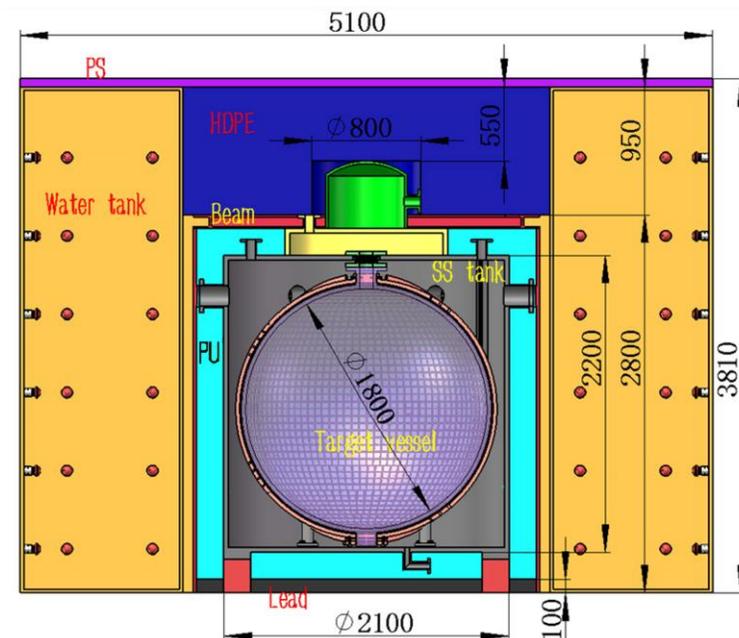


[arXiv 2405.18008](https://arxiv.org/abs/2405.18008)

# Вспомогательный детектор JUNO-TAO

Вспомогательный детектор  
Taishan Antineutrino Observatory (TAO):

- ❖ 2.8 т ЖС с добавлением гадолиния
- ❖ В 44 м от реактора TS-1 (4.6 ГВт)
- ❖ Кремниевые фотоумножители и ЖС при  $-50^{\circ}\text{C}$
- ❖ Энергетическое разрешение  $\sigma < 2\%$  на 1 МэВ



# Вспомогательный детектор JUNO-TAO

Вспомогательный детектор

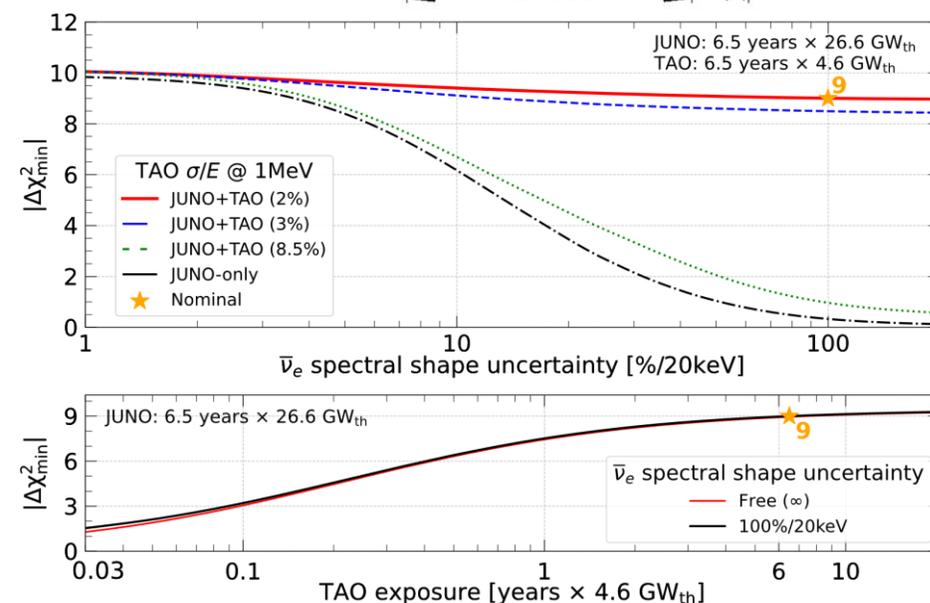
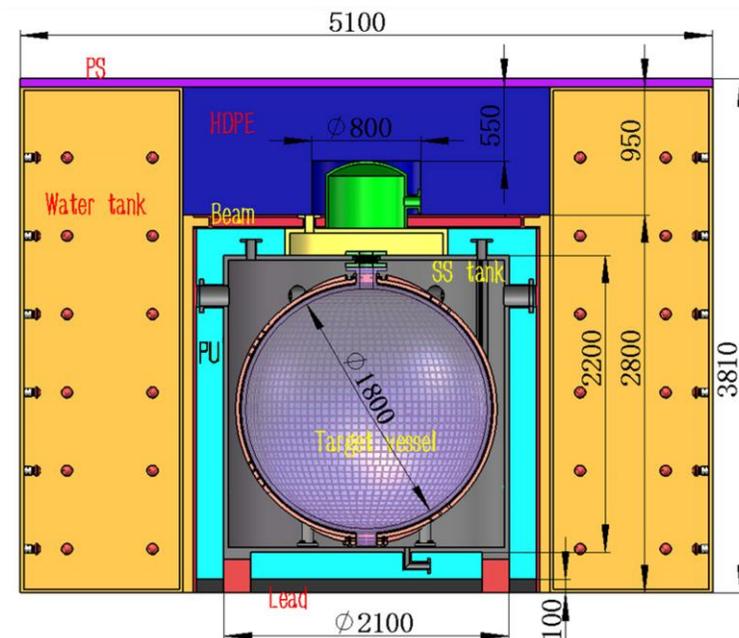
Taishan Antineutrino Observatory (TAO):

- ❖ 2.8 т ЖС с добавлением гадолиния
- ❖ В 44 м от реактора TS-1 (4.6 ГВт)
- ❖ Кремниевые фотоумножители и ЖС при  $-50^{\circ}\text{C}$
- ❖ Энергетическое разрешение  $\sigma < 2\%$  на 1 МэВ

**Основная задача:** предоставить точное измерение начального спектра антинейтрино

**Зачем:** чтобы определить порядок масс нейтрино без использования моделей спектра антинейтрино

**Как:** одновременная подгонка спектров JUNO и TAO

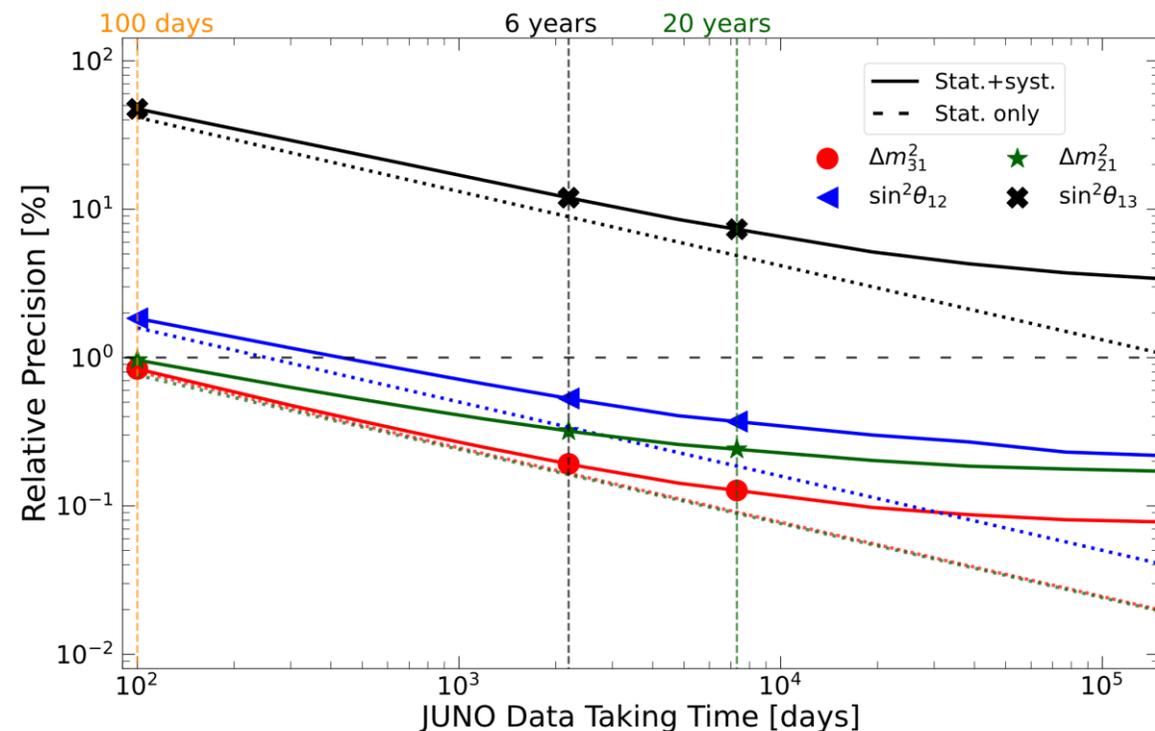


# Оценка чувствительности

Осцилляционные параметры и упорядоченность масс нейтрино

# Чувствительность к осцилляционным параметрам

- ❖ JUNO достигнет **точности лучше, чем 1%**, на параметры  $\Delta m_{31}^2$ ,  $\Delta m_{21}^2$  и  $\sin^2\theta_{12}$  за первые 2 года набора данных
- ❖ Как можно использовать этот результат:
  - Ограничение для других экспериментов
  - Ограничение при построении моделей
  - Возможность поиска физики за пределами Стандартной Модели с большей точностью



	Значение	PDG2020	100 дней	6 лет
$\Delta m_{31}^2 (\times 10^{-3} \text{ eV}^2)$	2.5253	$\pm 0.034$ (1.3%)	$\pm 0.021$ (0.8%)	$\pm 0.0047$ (0.2%)
$\Delta m_{21}^2 (\times 10^{-5} \text{ eV}^2)$	7.53	$\pm 0.18$ (2.4%)	$\pm 0.074$ (1.0%)	$\pm 0.024$ (0.3%)
$\sin^2\theta_{12}$	0.307	$\pm 0.013$ (4.2%)	$\pm 0.0058$ (1.9%)	$\pm 0.0016$ (0.5%)
$\sin^2\theta_{13}$	0.0218	$\pm 0.0007$ (3.2%)	$\pm 0.010$ (47.9%)	$\pm 0.0026$ (12.1%)

# Чувствительность к упорядоченности масс нейтрино

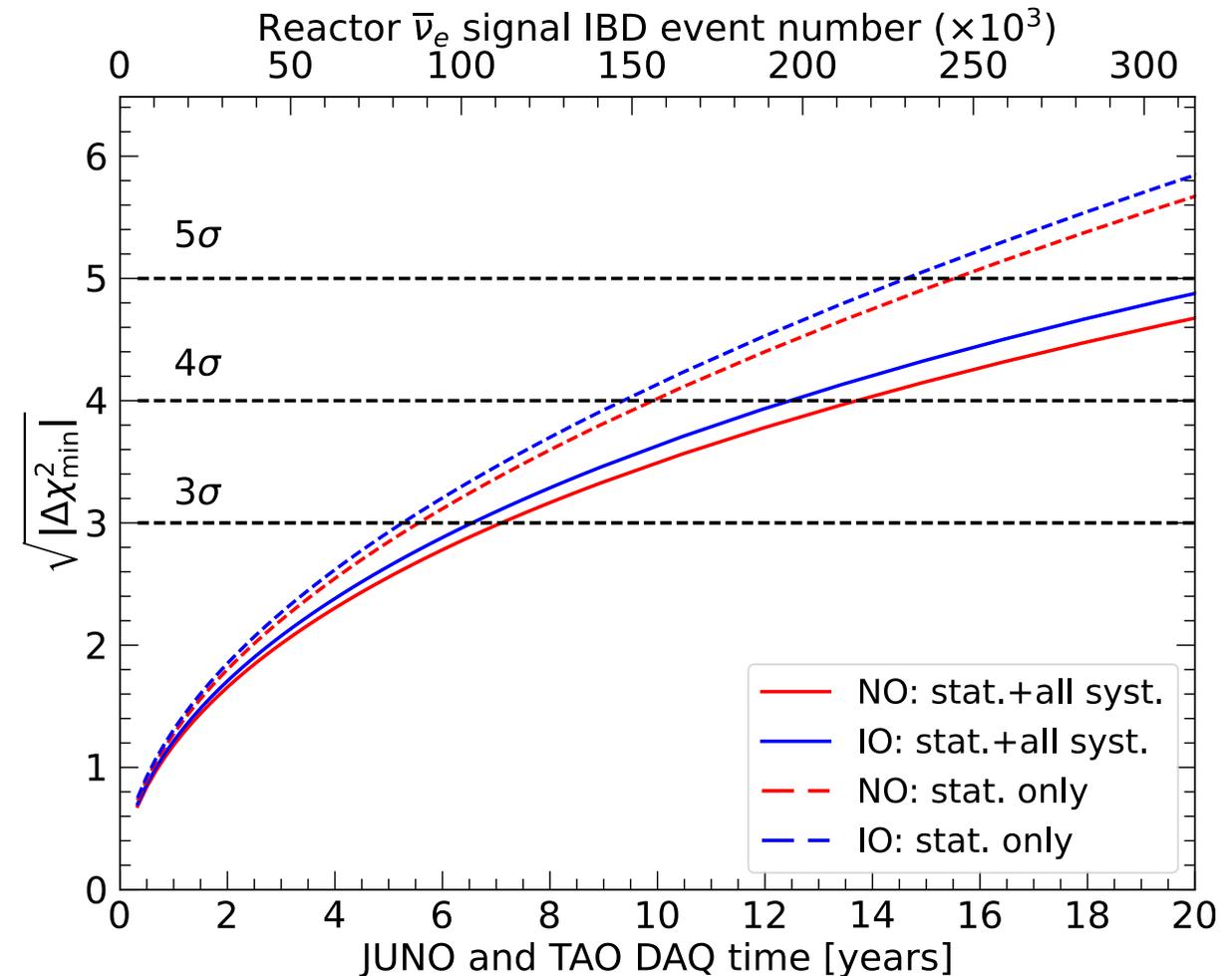
- ❖ Медианная чувствительность к порядку масс нейтрино (данные Азимова):

$$\Delta\chi_{\min}^2 = \min \chi_{\text{IO}}^2 - \min \chi_{\text{NO}}^2$$

- ❖ **Медианная чувствительность в  $3\sigma$  после 7.1 лет набора данных**

- В предположении, что реакторы будут работать 11 месяцев в год
- Соответствующая экспозиция:  
6.5 лет  $\times$  26.6 ГВт

- ❖ Основные источники систематической неопределенности: фон, спектр антинейтрино от реакторов, нелинейность ЖС



# Заключение

- ❖ JUNO внесёт вклад как в прецизионное измерение осцилляционных параметров, так и в определение упорядоченности масс нейтрино
- ❖ Используя антинейтрино от реакторов, JUNO:
  - Достигнет **точности, лучше чем 1%, к  $\Delta m_{31}^2$ ,  $\Delta m_{21}^2$ , и  $\sin^2 \theta_{12}$**  за первый два года набора данных
  - Определит **упорядоченность масс нейтрино с медианной чувствительностью  $3\sigma$**  после 7 лет набора данных
- ❖ Текущий статус
  - Сборка центрального детектора JUNO завершена
  - Внутренний и внешний объемы детектора заполнены водой
  - В данный момент происходит заполнение жидким сцинтиллятором

# Backup

# Смешивание нейтрино

Слабые ( $e, \mu, \tau$ ) и массовые (1, 2, 3) собственные состояния отличаются:

$$c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}, \quad s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{\text{CP}}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{\text{CP}}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты

# Смешивание нейтрино

Слабые ( $e, \mu, \tau$ ) и массовые (1, 2, 3) собственные состояния отличаются:

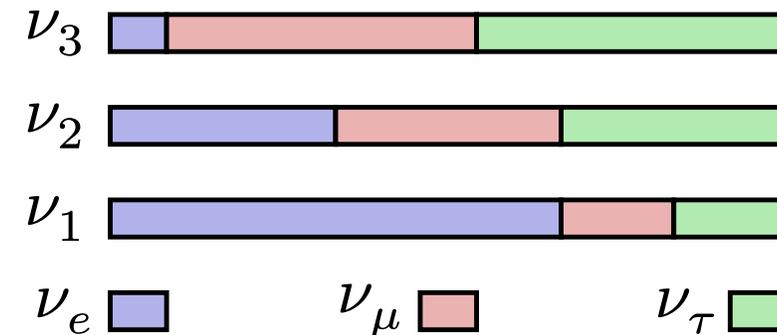
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}, s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$

Матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты

Смешивание параметризуется с помощью:

- ❖ Трёх углов смешивания:  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$
- ❖ Фазы нарушения  $CP$ -четности:  $\delta_{CP}$



# Смешивание нейтрино

Слабые ( $e, \mu, \tau$ ) и массовые (1, 2, 3) собственные состояния отличаются:

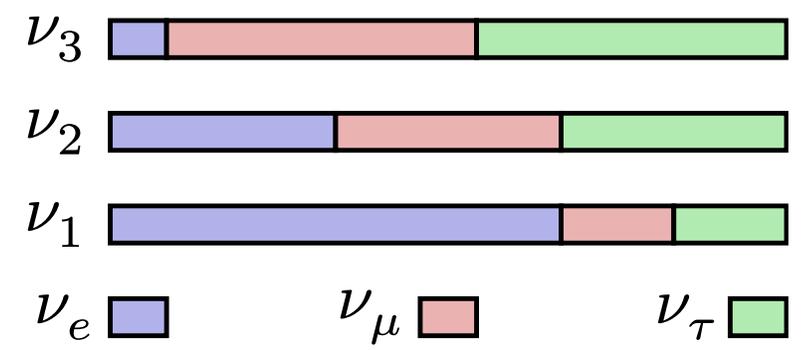
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}, \quad s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$$

Матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты

Смешивание параметризуется с помощью:

- ❖ Трёх углов смешивания:  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$
- ❖ Фазы нарушения  $CP$ -четности:  $\delta_{CP}$



Три расщепления масс нейтрино ( $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ ):

- ❖ Участвуют в вычислении вероятности осцилляций
- ❖ Только два расщепления независимы:  $\Delta m_{21}^2, |\Delta m_{31}^2|$  (или  $|\Delta m_{32}^2|$ )

# Текущие знания о нейтринных осцилляциях

На данный момент (PDG 2024) известно, что:

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

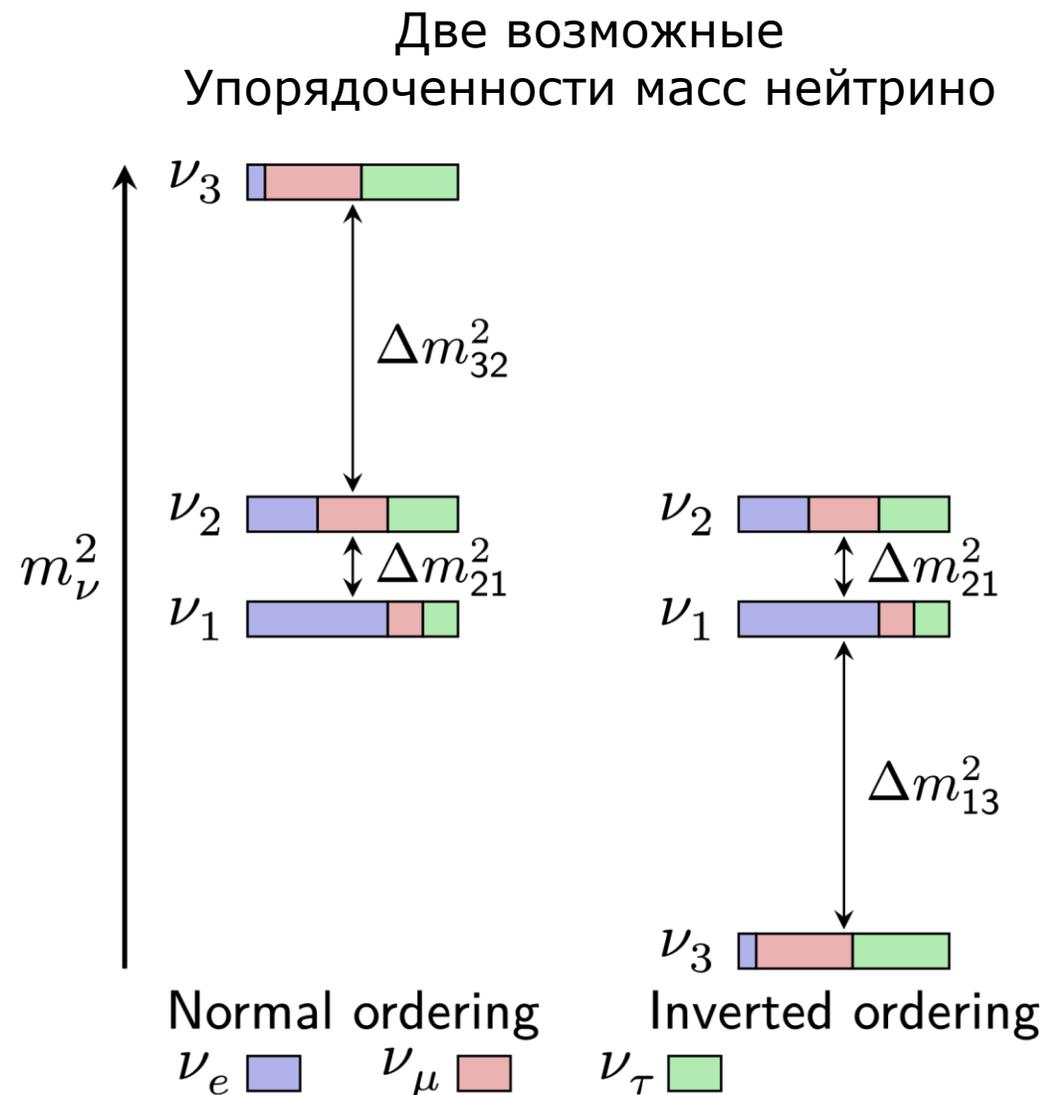
# Текущие знания о нейтринных осцилляциях

На данный момент (PDG 2024) известно, что:

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

Открытые вопросы:

- ② Упорядоченность масс:  $\Delta m_{31}^2 > 0$  или  $\Delta m_{31}^2 < 0$



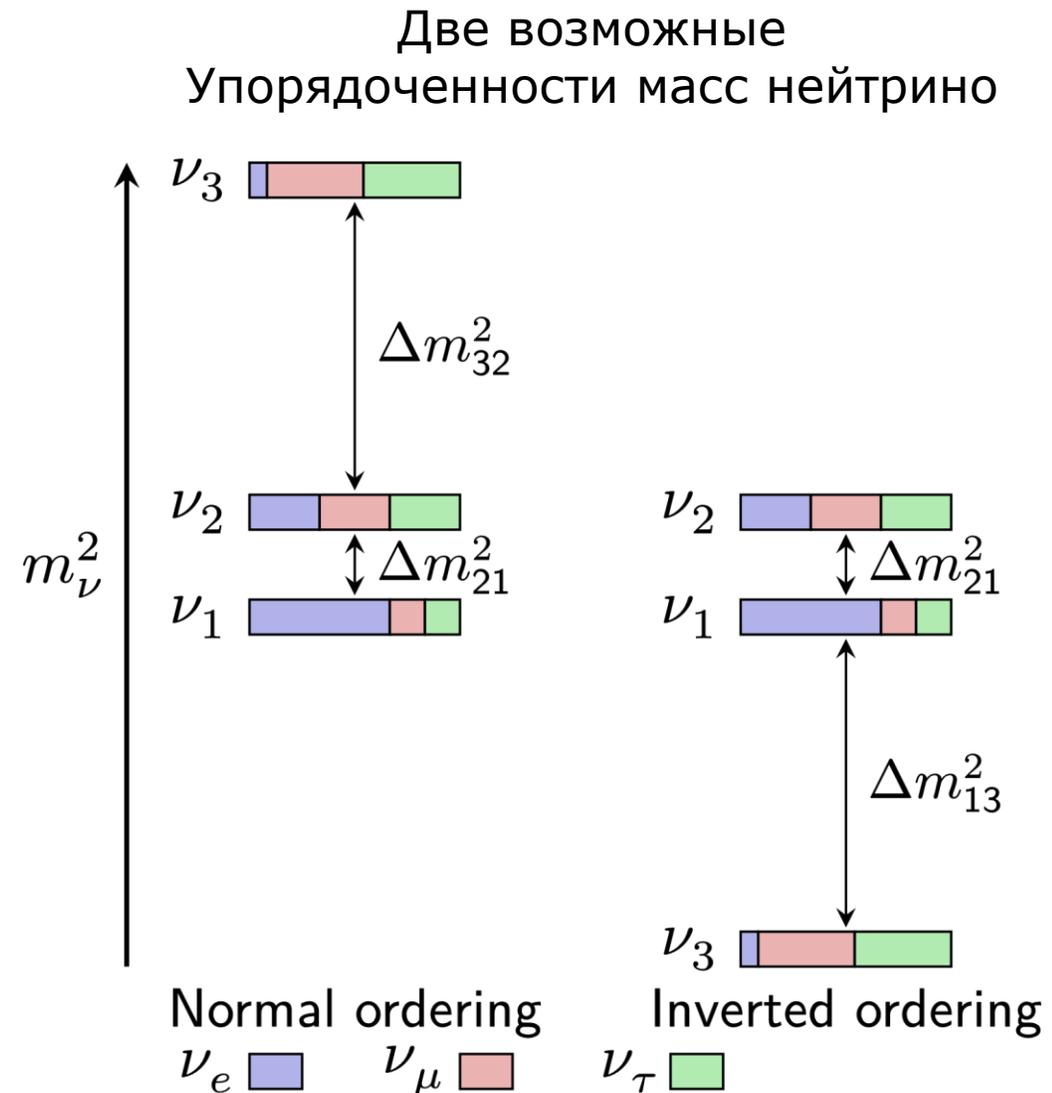
# Текущие знания о нейтринных осцилляциях

На данный момент (PDG 2024) известно, что:

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

Открытые вопросы:

- ① Упорядоченность масс:  $\Delta m_{31}^2 > 0$  или  $\Delta m_{31}^2 < 0$
- ① Октант  $\theta_{23}$ :  $\theta_{23} > 45^\circ$  или  $\theta_{23} < 45^\circ$
- ① Значение фазы  $CP$ -нарушения  $\delta_{CP}$ ?



# Текущие знания о нейтринных осцилляциях

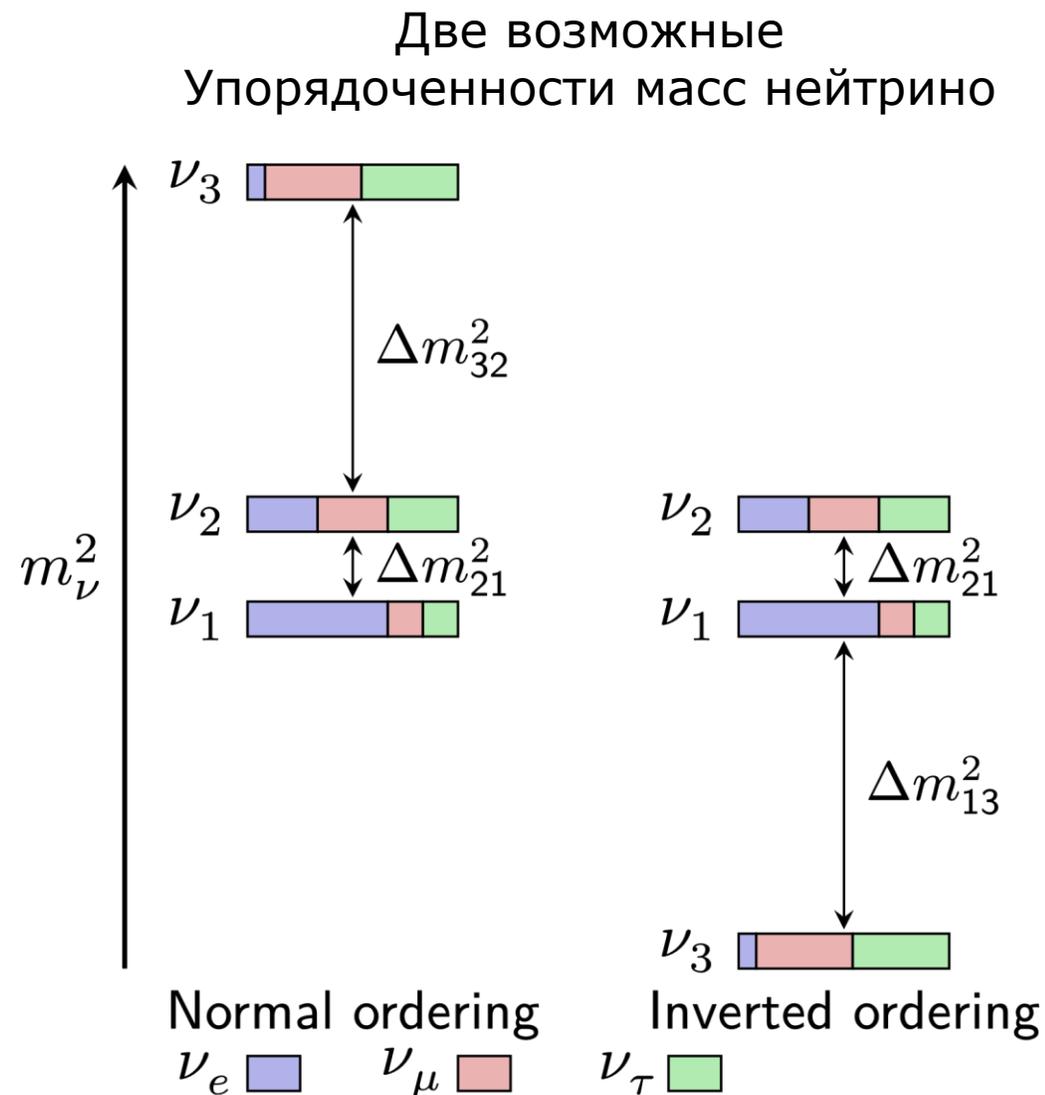
На данный момент (PDG 2024) известно, что:

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

Открытые вопросы:

- ① Упорядоченность масс:  $\Delta m_{31}^2 > 0$  или  $\Delta m_{31}^2 < 0$
- ② Октант  $\theta_{23}$ :  $\theta_{23} > 45^\circ$  или  $\theta_{23} < 45^\circ$
- ③ Значение фазы  $CP$ -нарушения  $\delta_{CP}$ ?

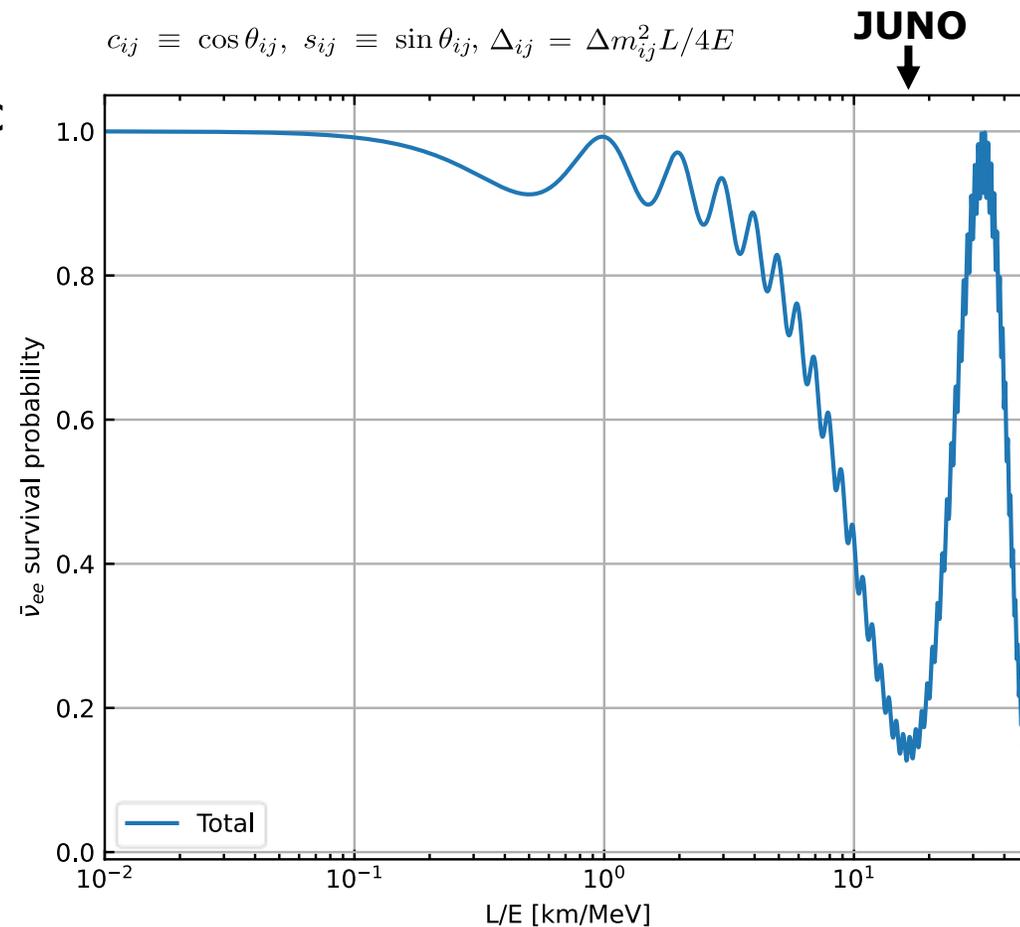
JUNO внесёт вклад как в прецизионное измерение осцилляционных параметров, так и в определение порядка масс нейтрино



# Осцилляции реакторных $\bar{\nu}_e$

- ❖ JUNO будет наблюдать дефицит  $\bar{\nu}_e$ , связанный с осцилляциями
- ❖ Вероятность выживания  $\bar{\nu}_e$ :

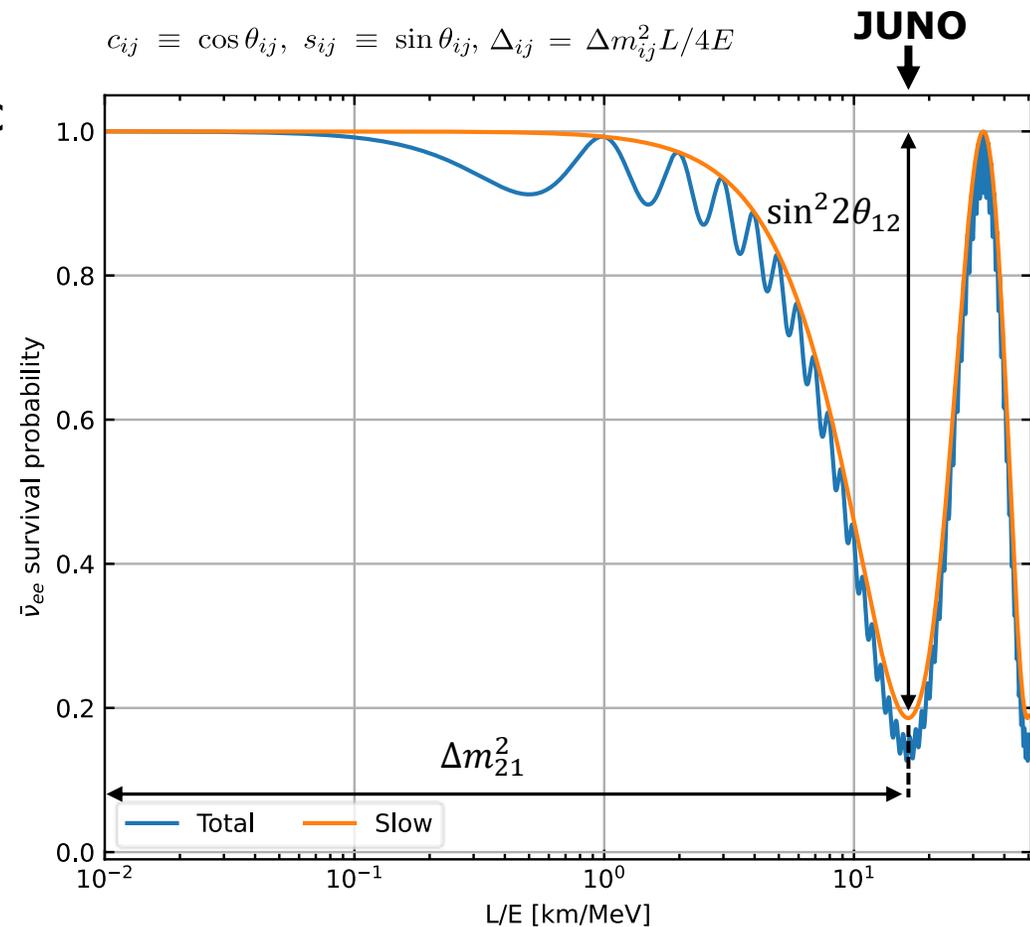
$$\begin{aligned}\mathcal{P}(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = & 1 - \sin^2 2\theta_{12} c_{13}^4 \sin^2 \Delta_{21} \\ & - \sin^2 2\theta_{13} c_{12}^2 \sin^2 \Delta_{31} \\ & - \sin^2 2\theta_{13} s_{12}^2 \sin^2 \Delta_{32}\end{aligned}$$



# Осцилляции реакторных $\bar{\nu}_e$

- ❖ JUNO будет наблюдать дефицит  $\bar{\nu}_e$ , связанный с осцилляциями
- ❖ Вероятность выживания  $\bar{\nu}_e$ :

$$\mathcal{P}(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \boxed{\sin^2 2\theta_{12} c_{13}^4 \sin^2 \Delta_{21}} \text{ Медл.} \\ - \sin^2 2\theta_{13} c_{12}^2 \sin^2 \Delta_{31} \\ - \sin^2 2\theta_{13} s_{12}^2 \sin^2 \Delta_{32}$$



# Осцилляции реакторных $\bar{\nu}_e$

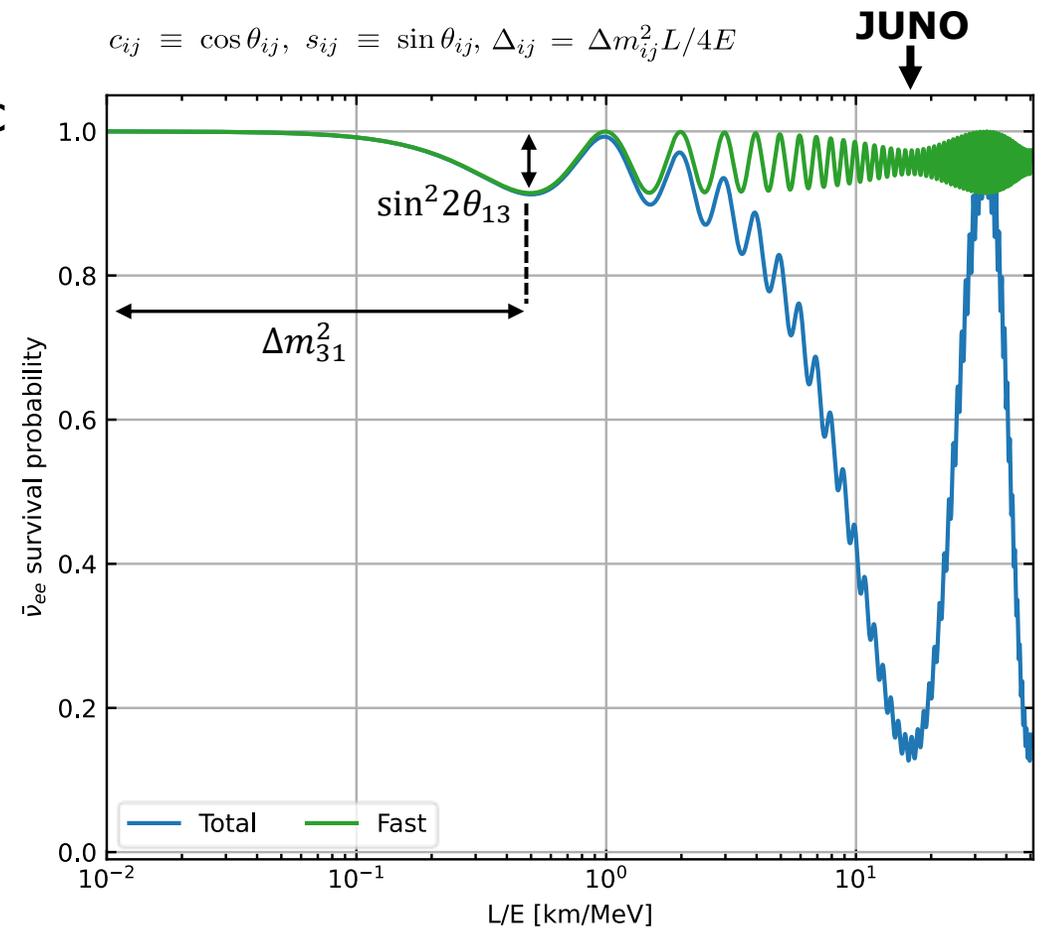
- ❖ JUNO будет наблюдать дефицит  $\bar{\nu}_e$ , связанный с осцилляциями
- ❖ Вероятность выживания  $\bar{\nu}_e$ :

$$\mathcal{P}(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{12} c_{13}^4 \sin^2 \Delta_{21}$$

$$- \sin^2 2\theta_{13} c_{12}^2 \sin^2 \Delta_{31}$$

$$- \sin^2 2\theta_{13} s_{12}^2 \sin^2 \Delta_{32}$$

**Быстр.**



# Осцилляции реакторных $\bar{\nu}_e$

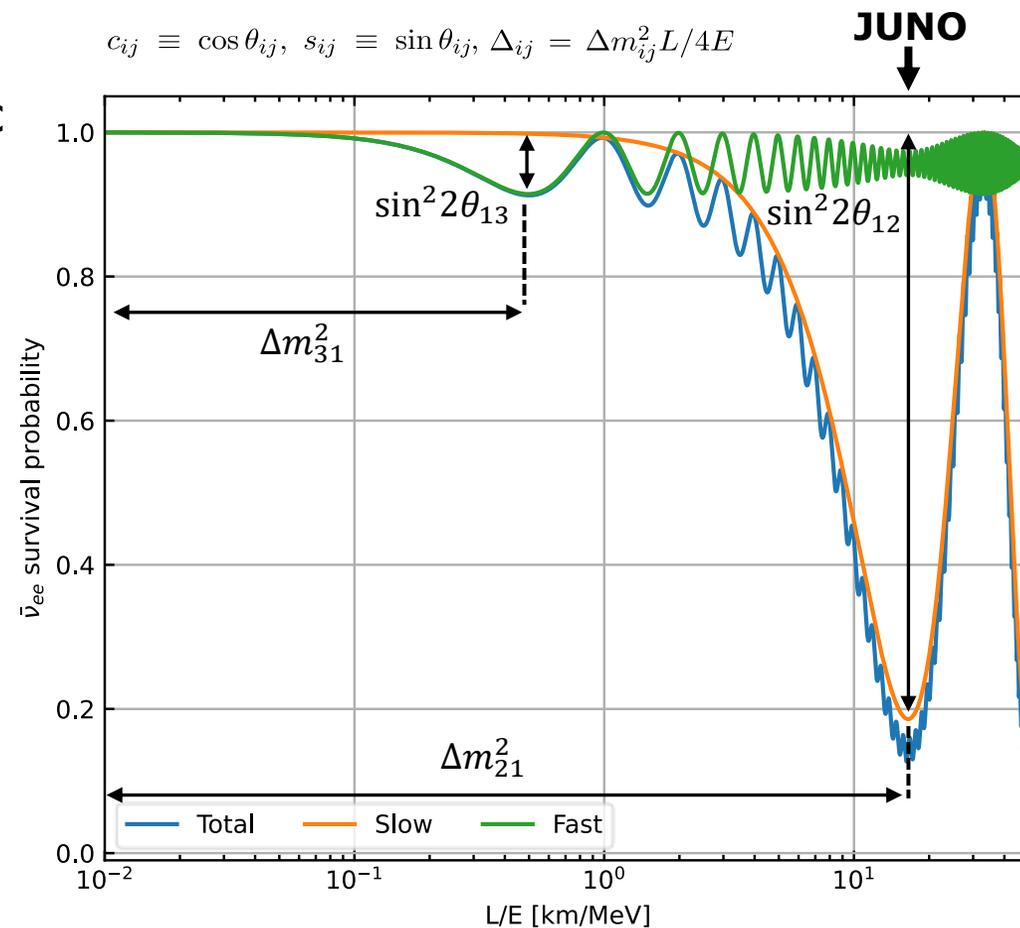
❖ JUNO будет наблюдать дефицит  $\bar{\nu}_e$ , связанный с осцилляциями

❖ Вероятность выживания  $\bar{\nu}_e$ :

$$\mathcal{P}(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \boxed{\sin^2 2\theta_{12} c_{13}^4 \sin^2 \Delta_{21}} \quad \text{Медл.}$$

$$- \boxed{\sin^2 2\theta_{13} c_{12}^2 \sin^2 \Delta_{31}} \quad \text{Быстр.}$$

$$- \boxed{\sin^2 2\theta_{13} s_{12}^2 \sin^2 \Delta_{32}}$$



# Осцилляции реакторных $\bar{\nu}_e$

❖ JUNO будет наблюдать дефицит  $\bar{\nu}_e$ , связанный с осцилляциями

❖ Вероятность выживания  $\bar{\nu}_e$ :

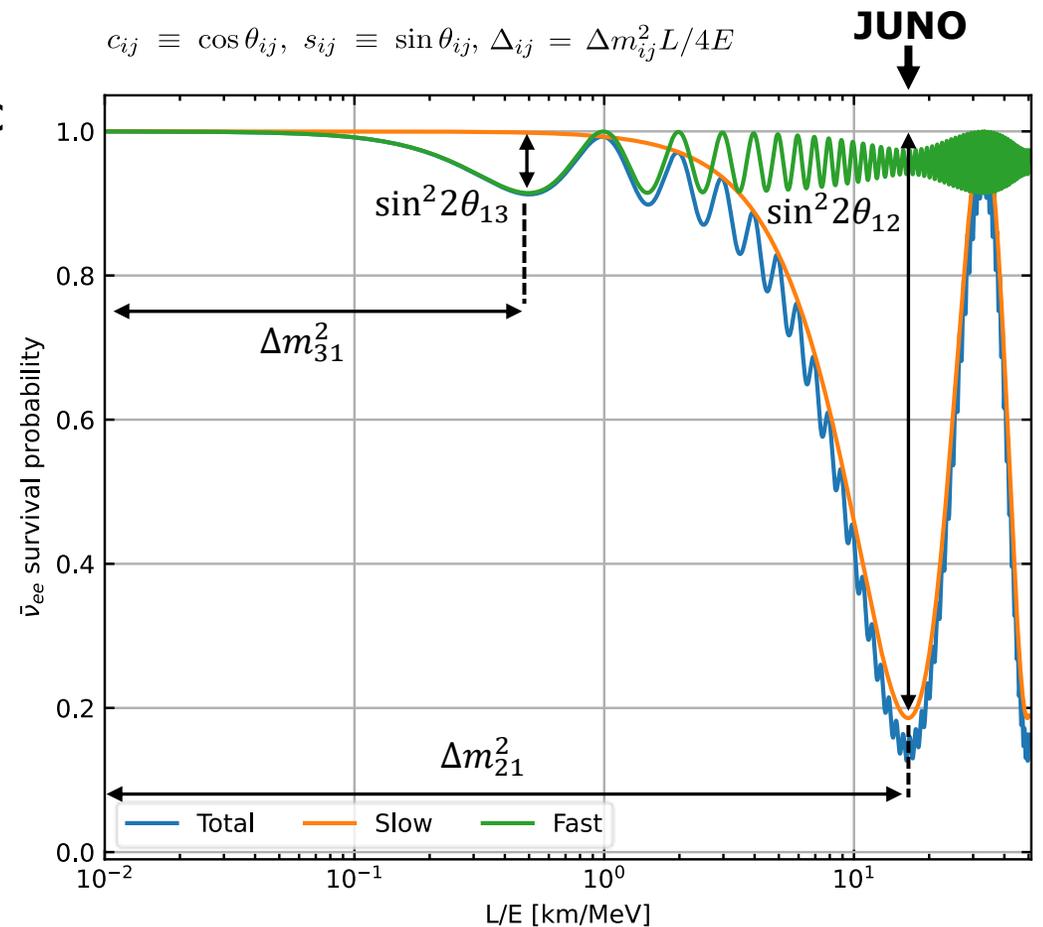
$$\mathcal{P}(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \boxed{\sin^2 2\theta_{12} c_{13}^4 \sin^2 \Delta_{21}} \quad \text{Медл.}$$

$$- \boxed{\sin^2 2\theta_{13} c_{12}^2 \sin^2 \Delta_{31}} \quad \text{Быстр.}$$

$$- \boxed{\sin^2 2\theta_{13} s_{12}^2 \sin^2 \Delta_{32}}$$

❖ JUNO чувствителен к  $\Delta m_{31}^2$ ,  $\Delta m_{21}^2$ ,  $\sin^2 \theta_{12}$  и  $\sin^2 \theta_{13}$

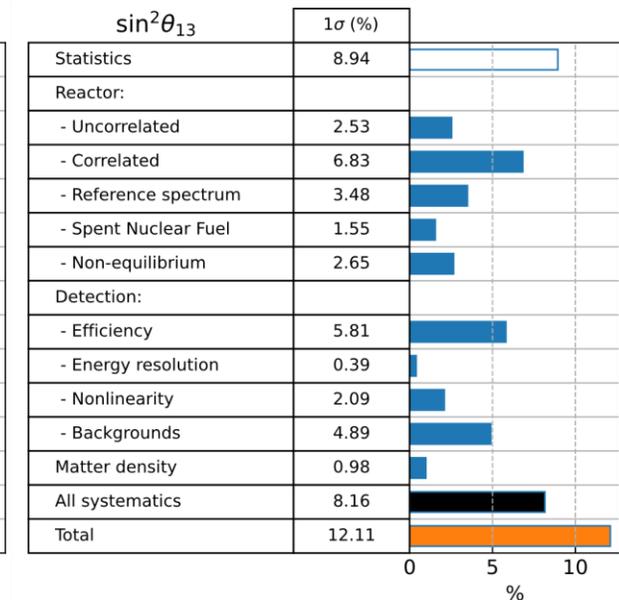
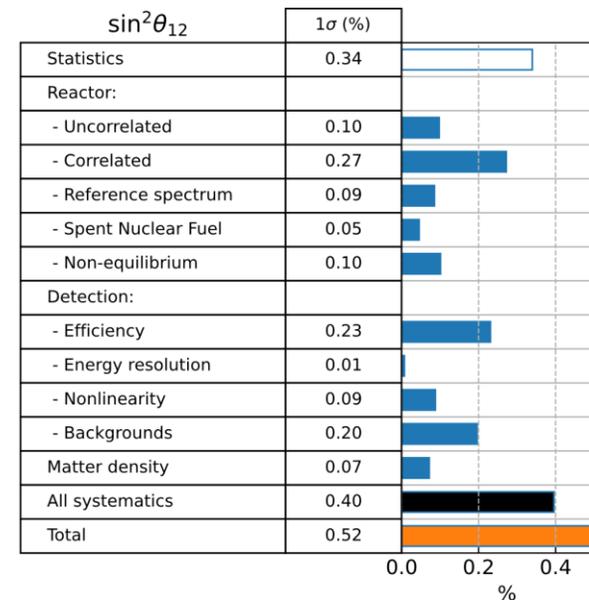
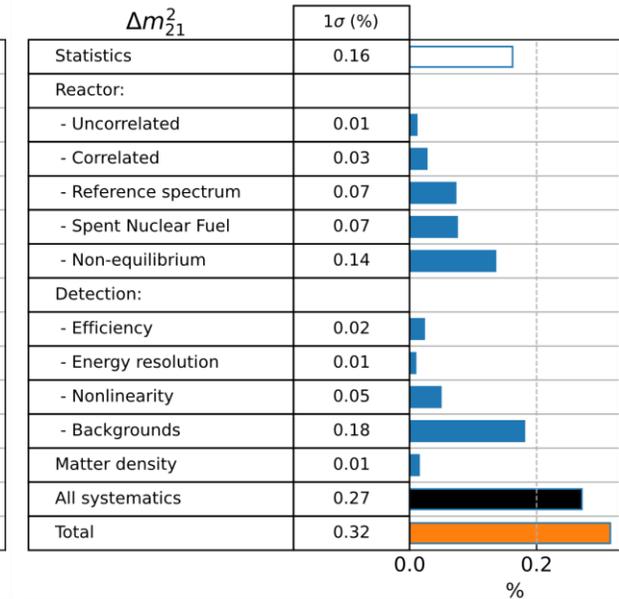
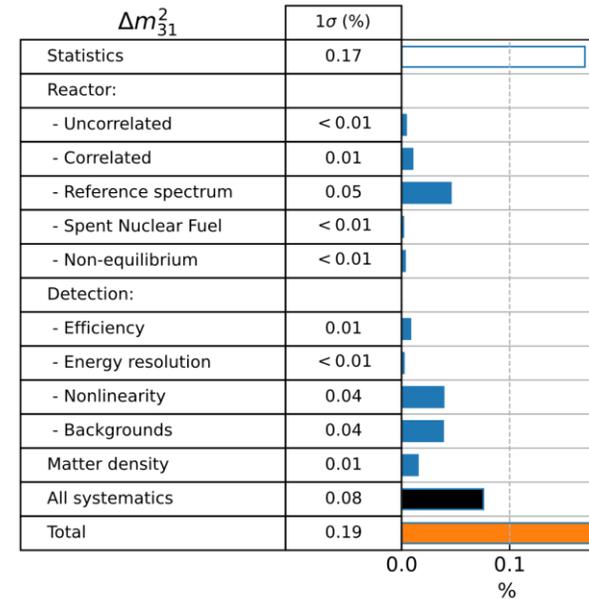
❖ Вероятность выживания не зависит от  $\delta_{CP}$  и  $\theta_{23}$   
→ нет вырождений



# Сист. неопределенности для осц. параметров

Основные источники систематической неопределенности:

- ❖  $\Delta m_{31}^2$ : неопределенность формы спектра антинейтрино, эффекты нелинейности детектора, фон
- ❖  $\Delta m_{21}^2$ : фон, вклад в спектр антинейтрино от отработанного ядерного топлива, неравновесная поправка на конверсионные спектры изотопов  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$
- ❖  $\sin^2\theta_{12}, \sin^2\theta_{13}$ : нормировка потока антинейтрино от реакторов, эффективность детектора



# Сист. неопределенности для порядка масс нейтрино

## ❖ JUNO and TAO common uncertainties:

- Reactors information
- Liquid Scintillator non-linearity parameters

## ❖ JUNO only uncertainties:

- Oscillation parameter  $\sin^2 2\theta_{13}$
- Reference antineutrino spectrum
- Detector normalization
- Background rate and shapes
- Energy resolution
- Matter density (MSW effect)

## ❖ TAO only uncertainties:

- Background rate and shapes
- Energy scale
- Fiducial volume

## Relative impact on the NMO sensitivity:

Uncertainties	$ \Delta\chi_{\min}^2 $	$ \Delta\chi_{\min}^2 $ change
Statistics of JUNO and TAO	11.5	
+ Common uncertainty	10.8	-0.7
+ TAO uncertainty	10.2	-0.6
+ JUNO geoneutrinos	9.7	-0.5
+ JUNO world reactors	9.4	-0.3
+ JUNO accidental	9.2	-0.2
+ JUNO ${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$	9.1	-0.1
+ JUNO other backgrounds	9.0	-0.05
Total	9.0	

Dominant sources of uncertainty:  
backgrounds, reference spectrum, non-linearity