

# Актуальные результаты осцилляционного анализа данных эксперимента NOvA

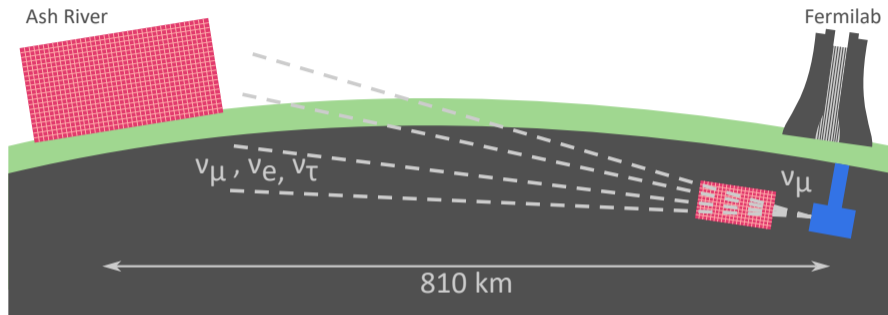
---

Анастасия Калиткина  
ЛЯП, ОИЯИ

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



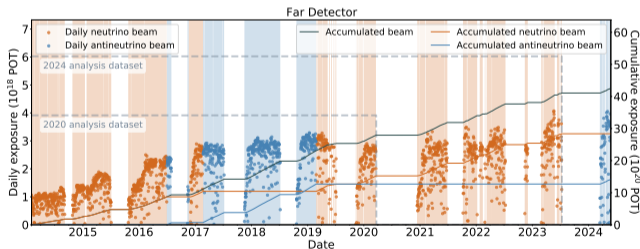
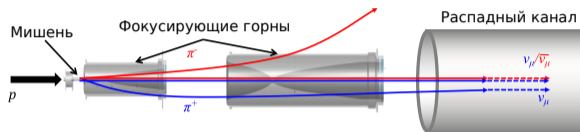
# Эксперимент NOvA (NuMI Off-axis $\nu_e$ Appearance)



- Ускорительный нейтринный осцилляционный эксперимент с длинной базой (810 км).
- Источник нейтрино – ускорительный комплекс NuMI лаборатории им. Э. Ферми (США).
- Два детектора, ближний (297 т) и дальний (14 кт) – сегментированные трековые калориметры, заполненные жидким сцинтиллятором.

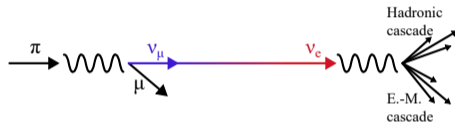
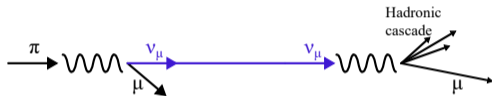
# 10 лет набора данных

- Мощность пучка  $\sim 900$  кВт
- Начальный состав кучка:
  - $\nu$ : 95%  $\nu_\mu$ , 4%  $\bar{\nu}_\mu$ , 1%  $\nu_e/\bar{\nu}_e$
  - $\bar{\nu}$ : 93%  $\bar{\nu}_\mu$ , 6%  $\nu_\mu$ , 1%  $\nu_e/\bar{\nu}_e$
- Экспозиция:
  - $\nu$ :  $26.61 \times 10^{20}$  POT
  - $\bar{\nu}$ :  $12.50 \times 10^{20}$  POT



# Физика нейтринных осцилляций в NOvA

Основные цели анализа нейтринных данных в дальнем детекторе – измерение параметров осцилляций.



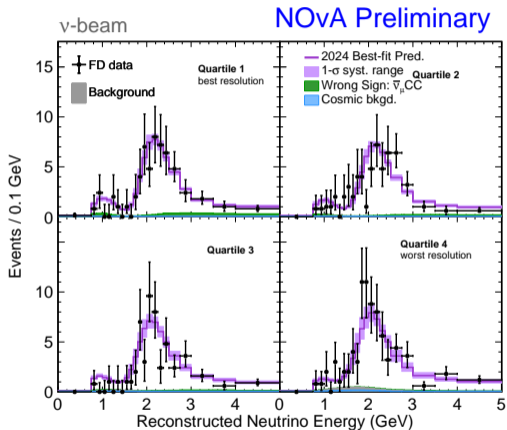
Исчезновение  $\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$ :

- значение расщепление масс  $\Delta m_{32}^2$
- величина угла смешивания  $\theta_{23}$

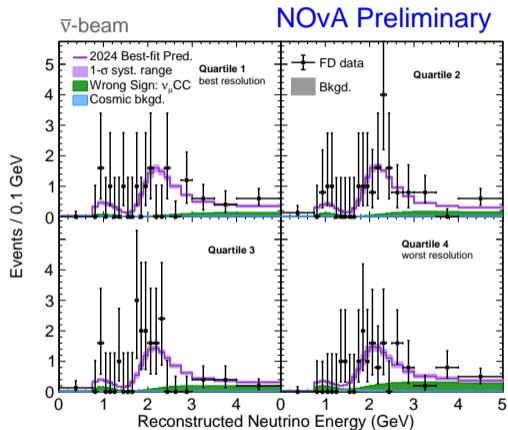
Появление  $\nu_e (\bar{\nu}_e)$ :

- значение фазы  $\delta_{CP}$
- упорядоченность нейтринных масс (знак  $\Delta m_{32}^2$ )
- октант угла  $\theta_{23}$
- величина угла смешивания  $\theta_{13}$

# Выживание $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ в дальнем детекторе

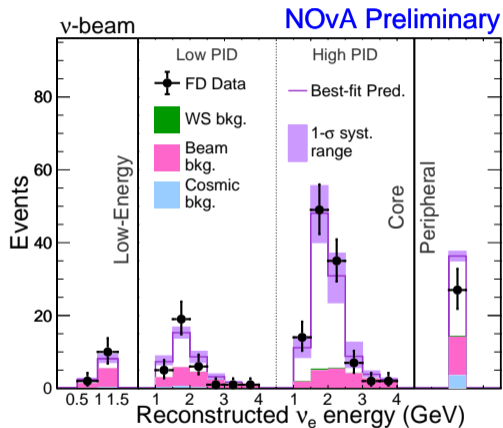


384  $\nu_\mu$  кандидатов (ожидаемый фон 11.0)

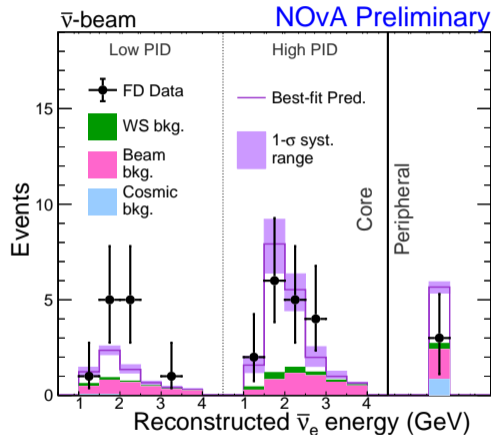


106  $\bar{\nu}_\mu$  кандидатов (ожидаемый фон 1.7)

# Появление $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ в дальнем детекторе



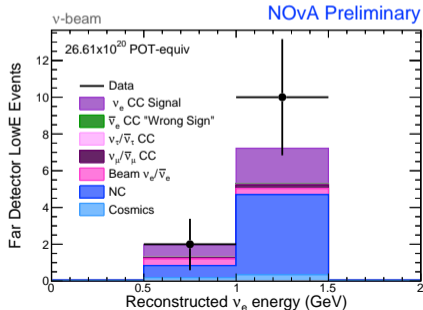
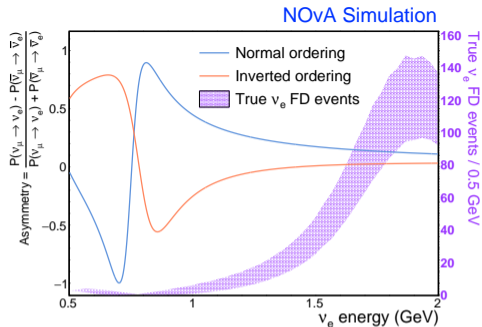
181  $\nu_e$  кандидатов (ожидаемый фон 62.5)



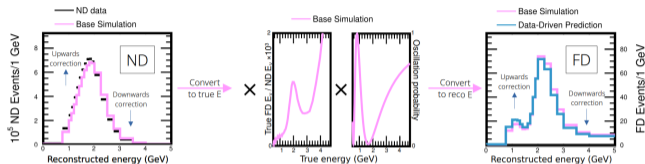
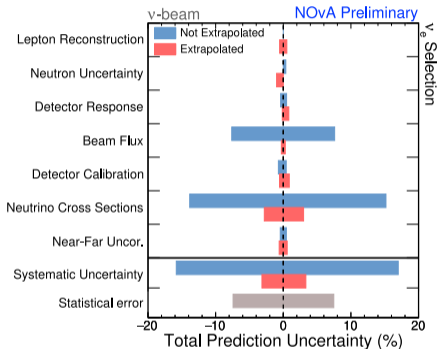
32  $\bar{\nu}_e$  кандидатов (ожидаемый фон 12.2)

# Новая выборка $\nu_e$ с низкой энергией

- Включает новую область энергий от 0.5 до 1.5 ГэВ
- Может улучшить чувствительность к определению упорядоченности масс нейтрино.
- В зависимости от реализованного в природе порядка нейтринных масс функция асимметрии имеет максимальные различия в области  $E_\nu < 1$  ГэВ.
- 12  $\nu_e$  кандидатов при ожидаемом фоне 7.1.



# Систематические неопределенности



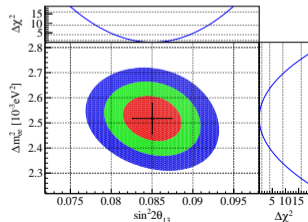
- Для уменьшения систематических неопределенностей используется процедура экстраполяции, с которой общая неопределенность на спектр уменьшается с  $\sim 18\%$  до  $\sim 4\%$ .
- В итоговом спектре статистические неопределенности доминируют.



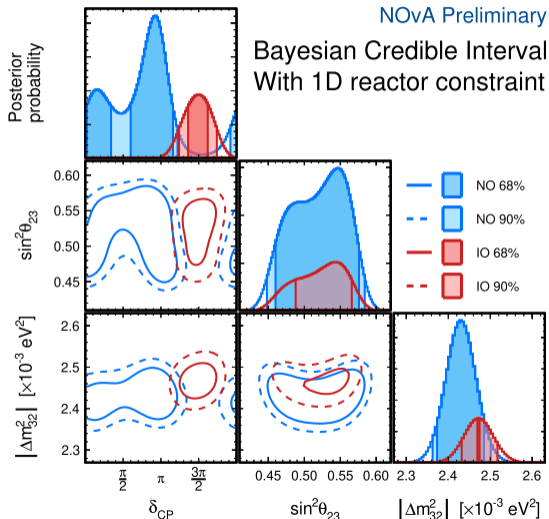
# Процедура подгонки параметров к данным дальнего детектора

Для получения параметров осцилляций  $\sin^2 \theta_{23}$ ,  $\Delta m_{32}^2$ ,  $\delta_{CP}$ ,  $\sin^2 2\theta_{13}$

- Подгонка проводилась одновременно со всеми выборками данных:
  - ◇ по 4 квантиля для  $\nu_\mu$  и  $\bar{\nu}_\mu$ ;
  - ◇ High PID, Low PID, периферийные бины для  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$ ;
  - ◇ выборка  $\nu_e$  с низкой энергией;
- Были реализованы как *частотный*, так и *Байесовский* анализы
- Внешние ограничения на солнечные параметры:
  - ◇  $\sin^2 \theta_{12} = 0.307 \pm 0.013$ ,  $\Delta m_{21}^2 \approx 7.53 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$  [PDG 2023]
- Три варианта для ограничения угла смешивания  $\theta_{13}$ :
  1.  $\theta_{13}$  – свободный параметр;
  2.  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.0851 \pm 0.0024$ ;
  3. Карты  $\chi^2$  для  $(\Delta m_{32}^2, \theta_{13})$  из Daya Bay [PRL 130(16):161802]

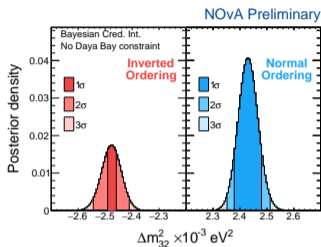


# Результаты осцилляционного анализа

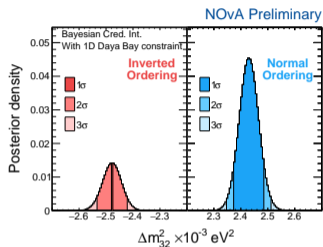


- Новые результаты согласуются с предыдущими [PRD 106(3):032004, PRD 110(1):012005]
- Значения  $\delta_{CP}$ :
  - ◇ Прямая упорядоченность: отвергается максимальное нарушение CP-симметрии
  - ◇ Обратная упорядоченность: точки сохранения CP-симметрии отвергаются на уровне  $3\sigma$ .
- С одномерным ограничением на  $\theta_{13}$ :
  - ◇ прямая упорядоченность предпочтительна на уровне 77% (коэфф. Байеса 3.3);
  - ◇ верхний октант  $\theta_{23}$  предпочтителен на уровне 68% (коэфф. Байеса 2.2).

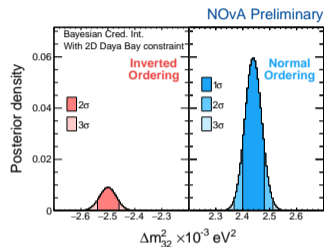
# Результаты применения разных ограничений на $\theta_{13}$



Без ограничений



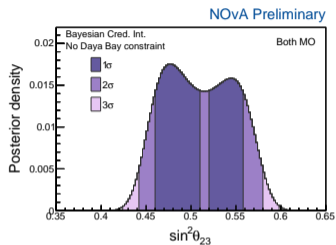
Значение из Daya Bay  
 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.0851 \pm 0.0024$



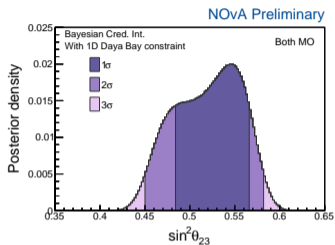
Двумерная карта  $\chi^2$   
для  $(\Delta m_{32}^2, \theta_{13})$

Коэффициент Байеса	Без ограничений	Одномерное	Двумерное
Предпочтение прямой упорядоченности	2.4 (70%)	3.3 (77%)	6.6 (87%)
Предпочтение верхнего октанта $\theta_{23}$	1.3 (56%)	2.2 (68%)	2.0 (66%)

# Результаты применения разных ограничений на $\theta_{13}$

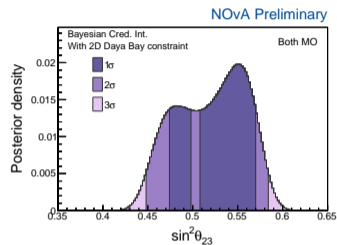


Без ограничений



Значение из Daya Bay

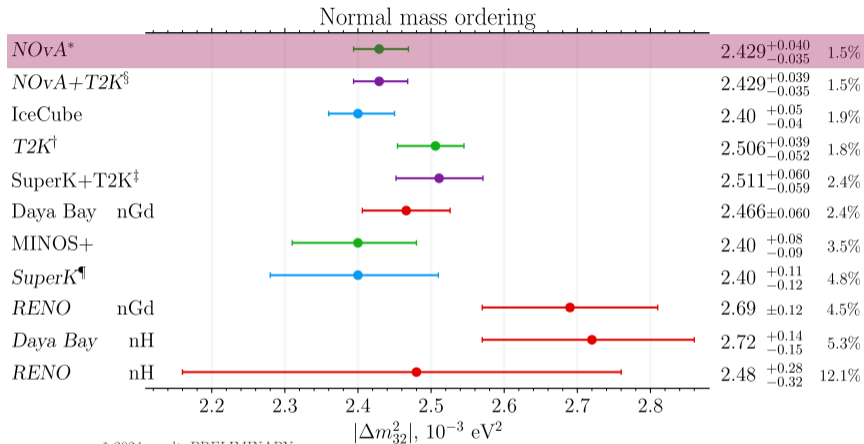
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0851 \pm 0.0024$$



Двумерная карта  $\chi^2$   
для  $(\Delta m_{32}^2, \theta_{13})$

Коэффициент Байеса	Без ограничений	Одномерное	Двумерное
Предпочтение прямой упорядоченности	2.4 (70%)	3.3 (77%)	6.6 (87%)
Предпочтение верхнего октанта $\theta_{23}$	1.3 (56%)	2.2 (68%)	2.0 (66%)

# Новое значение $\Delta m_{32}^2$



v11 2024.10: git.jinr.ru/mn/osc

*Preliminary*  
Published

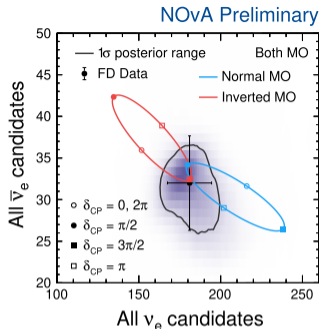
\* 2024 result, PRELIMINARY  
§ based on 2020 ana.  
† Neutrino-2022 result

¶ SKI-V result, arXiv:2311.05105  
‡ based on SK IV and T2K 2020, arXiv:2405.12488

- Достигнута наилучшая точность по измерению  $\Delta m_{32}^2$  в рамках одного эксперимента

# Заключение

- Новый анализ данных эксперимента NOvA:
  - 10 лет набора данных;
  - набор данных с нейтринным пучком увеличен в два раза в сравнении с предыдущим анализом;
  - обновленные и улучшенные моделирования и алгоритмы отбора событий
- В данных не наблюдается асимметрия между  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$ .
- Был проведен как частотный, так и Байесовский анализы, результаты которых согласуются между собой и с результатами предыдущих анализов.
- При добавлении ограничений на  $\theta_{13}$  из Daya Bay пряма упорядоченность и верхний октант  $\theta_{23}$  становятся предпочтительней.
- $\Delta m_{32}^2$  – параметр осцилляций, измеренный с наилучшей точностью.
- Указание на сохранение CP-симметрии в предположении прямой упорядоченности масс.



## Дополнительная информация

---

# Отбор событий

Отбор сигнальных событий включает в себя последовательное применение критериев отбора:

1. критерии качества события
2. событие должно находиться в доверительном объеме детектора
3. удаление фона космических лучей
4. идентификация событий

## Отбор $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ событий:

- чувствительность зависит в основном от формы энергетического спектра
- набор данных разделяем на 4 квартиля в зависимости от доли адронной энергии в событии

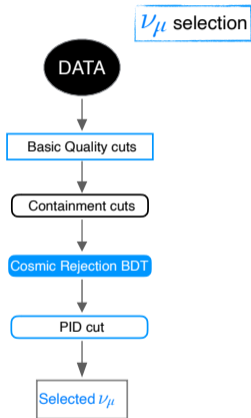
## Отбор $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ событий:

- чувствительность зависит от качества отделения сигнала от фона
- набор данных разделен на две центральные выборки с разной чистотой сигнала, и периферийную для увеличения статистики
- новый отбор в области низких энергий

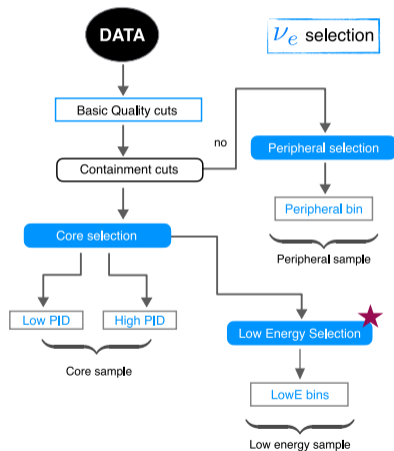


# Схемы отбора сабытий

Отбор  $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$  сабытий:

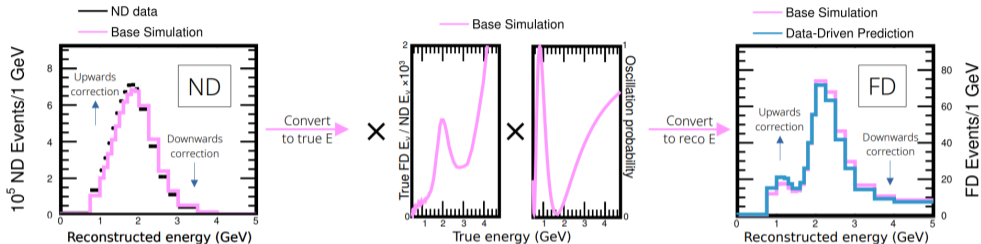


Отбор  $\nu_e(\bar{\nu}_e)$  сабытий:



# Extrapolation

The Near Detector (ND) Data/MC ratios are used to correct the Far Detector (FD) predictions.



- ND  $\nu_{\mu}$ -like samples are used to correct the FD  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$  and  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$  signal predictions.
- ND  $\nu_e$ -like samples are used to correct the FD  $\nu_e$  background predictions.
- Far-to-near transformation accounts for well understood effects like beam divergence, and detector acceptance differences.
- The resulting constrained FD predictions are highly correlated with the ND corrections.

# Значения осцилляционных параметров с одномерным ограничением на $\theta_{13}$

## Байесовский анализ

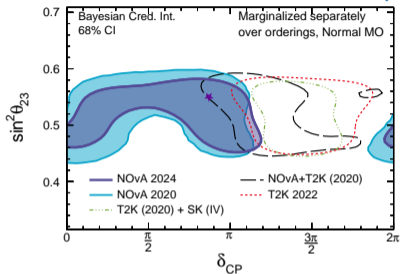
Parameter	Normal ordering	Inverted ordering
$\delta_{CP}(\pi)$	0.93 [0.04; 0.30], [0.62; 1.14]	1.49 [1.30; 1.70]
$\sin^2 \theta_{23}$	0.550 [0.484; 0.566]	0.550 [0.484; 0.566]
$\Delta m_{32}^2 (\times 10^{-3} \text{eV}^2)$	2.429 [2.405; 2.469]	-2.477 [-2.533; -2.469]

## Частотный анализ

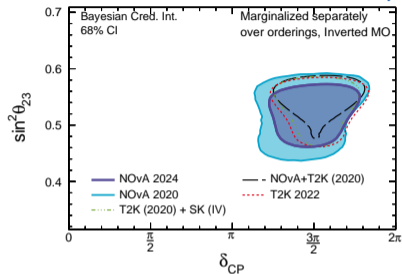
Parameter	Normal ordering	Inverted ordering
$\delta_{CP}(\pi)$	0.88	1.51
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.546^{+0.032}_{-0.075}$	$0.539^{+0.028}_{-0.075}$
$\Delta m_{32}^2 (\times 10^{-3} \text{eV}^2)$	$+2.433^{+0.035}_{-0.036}$	$-2.473^{+0.035}_{-0.035}$
Rejection signif.		1.36 $\sigma$

# Доверительные интервалы в сравнение с другими экспериментами

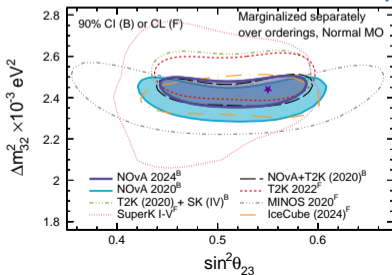
NOvA Preliminary



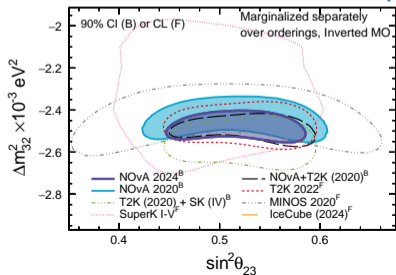
NOvA Preliminary



NOvA Preliminary



NOvA Preliminary



# Нарушение CP-симметрии

