



Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН, Новосибирск, 10-12 марта 2020

Изучение нейтринных осцилляций в эксперименте NOvA

Самойлов О.Б.
ОИЯИ, Дубна
(для коллаборации NOvA)

Осцилляции нейтрино (в вакууме)

$$\begin{array}{c} \left| \begin{array}{c} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{array} \right\rangle = \end{array}$$

$\theta_{23} \sim 45^\circ$

$\theta_{13} \sim 8.5^\circ$

$\theta_{12} \sim 30^\circ$

$$\begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & & s_{13}e^{-i\delta} \\ & 1 & \\ -s_{13}e^{i\delta} & & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & \\ -s_{12} & c_{12} & \\ & & 1 \end{pmatrix} \left| \begin{array}{c} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{array} \right\rangle$$

$$\begin{aligned} |\Delta m_{32}^2| &= |m_3^2 - m_2^2| \\ &\simeq 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \\ \nu_\mu &\rightarrow \nu_\mu \\ \nu_\mu &\rightarrow \nu_\tau \end{aligned}$$

Эксперименты
атмосферные и
с длинной базой

$$\begin{aligned} \Delta m_{31}^2 &\simeq \Delta m_{32}^2 \\ \nu_e &\rightarrow \nu_e \\ \nu_\mu &\rightarrow \nu_e \end{aligned}$$

Эксперименты
реакторные и
с длинной базой

$$\begin{aligned} \Delta m_{21}^2 &= |m_2^2 - m_1^2| \\ &\simeq 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ \nu_e &\rightarrow \nu_e \\ \nu_e &\rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau \end{aligned}$$

Эксперименты
солнечные и
реакторные

Измерение свойств нейтринных осцилляций

$$\begin{array}{c} \theta_{23} \sim 45^\circ \\ \theta_{13} \sim 8.5^\circ \\ \theta_{12} \sim 30^\circ \end{array}
 \left| \begin{array}{c} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{array} \right\rangle = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & & s_{13}e^{-i\delta} \\ & 1 & \\ -s_{13}e^{i\delta} & & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & \\ -s_{12} & c_{12} & \\ & & 1 \end{pmatrix} \left| \begin{array}{c} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{array} \right\rangle$$

$$\begin{aligned} |\Delta m_{32}^2| &= |m_3^2 - m_2^2| \\ &\simeq 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \\ \nu_\mu &\rightarrow \nu_\mu \\ \nu_\mu &\rightarrow \nu_\tau \end{aligned}$$

Эксперименты
атмосферные и
с длинной базой

$$\begin{aligned} \Delta m_{31}^2 &\simeq \Delta m_{32}^2 \\ \nu_e &\rightarrow \nu_e \\ \nu_\mu &\rightarrow \nu_e \end{aligned}$$

Эксперименты
реакторные и
с длинной базой

$$\begin{aligned} \Delta m_{21}^2 &= |m_2^2 - m_1^2| \\ &\simeq 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ \nu_e &\rightarrow \nu_e \\ \nu_e &\rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau \end{aligned}$$

Эксперименты
солнечные и
реакторные



Лаборатория
им. Ферми



Ближний
детектор

10 км
810 км₃



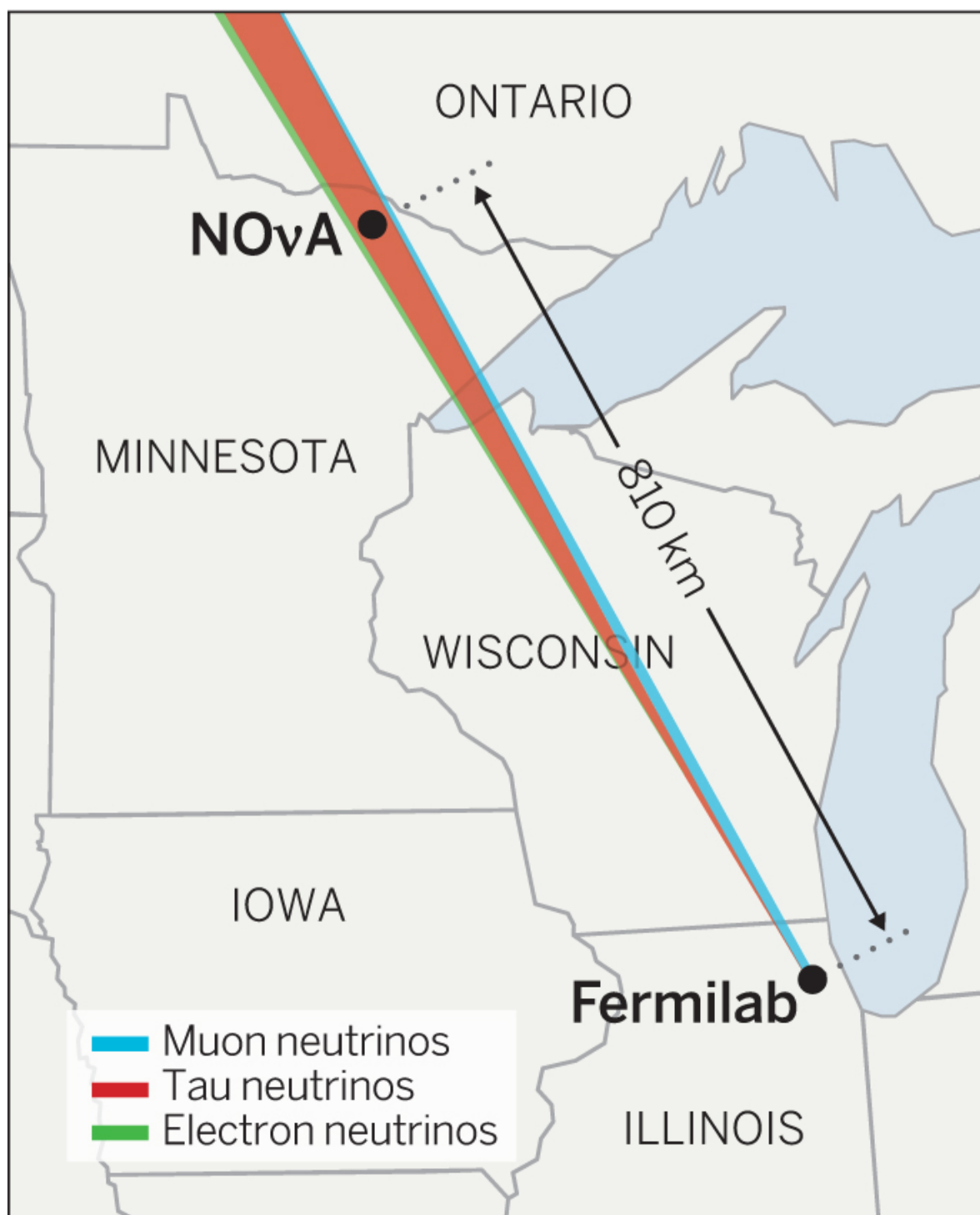
Дальний
детектор

Аш-ривер
Миннесота

NOvA



The **N**uMI **O**ff-Axis ν_e **A**pppearance Experiment

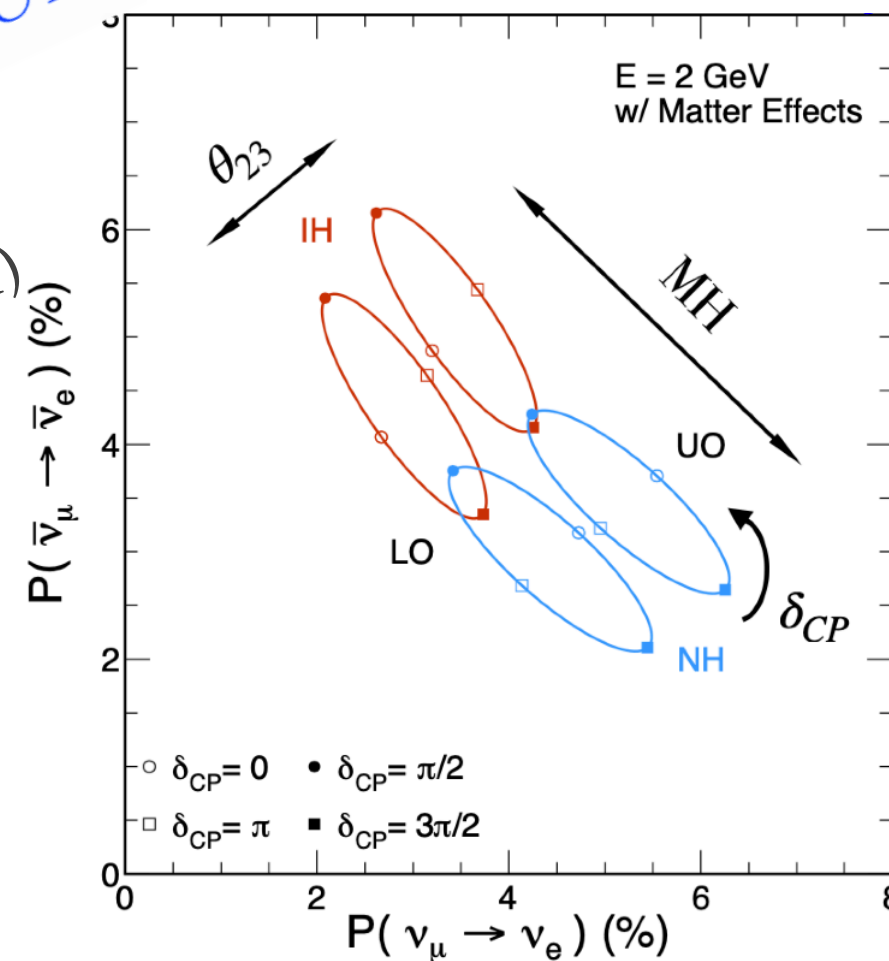
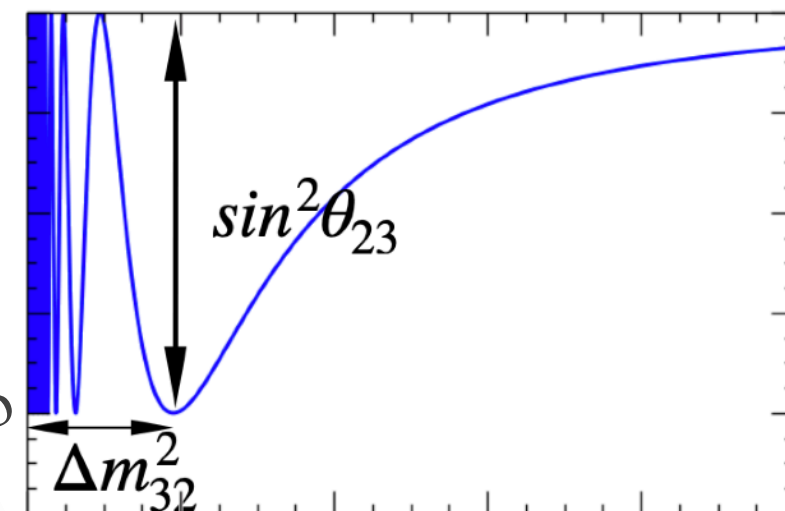
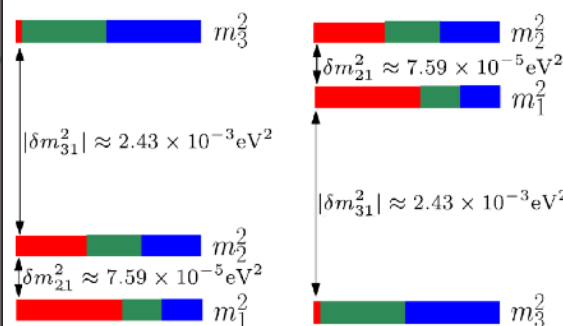


Мода выживания
мюонного нейтрино
 ν_μ

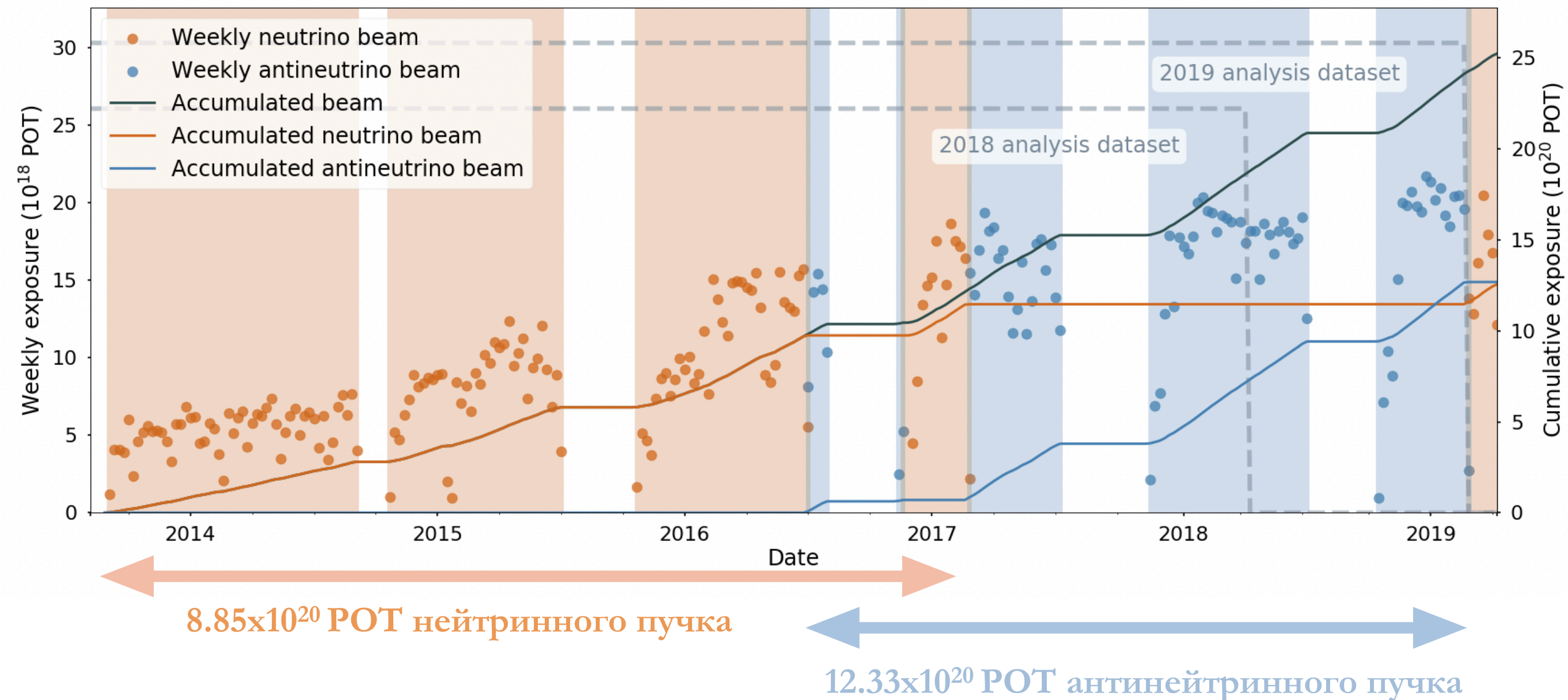
Мода появления
электронного нейтрино
 ν_e

$\Delta P_{\nu\bar{\nu}} \propto \sin \delta_{CP}$

Иерархия масс
Mass Hierarchy
(прямая / обратная)

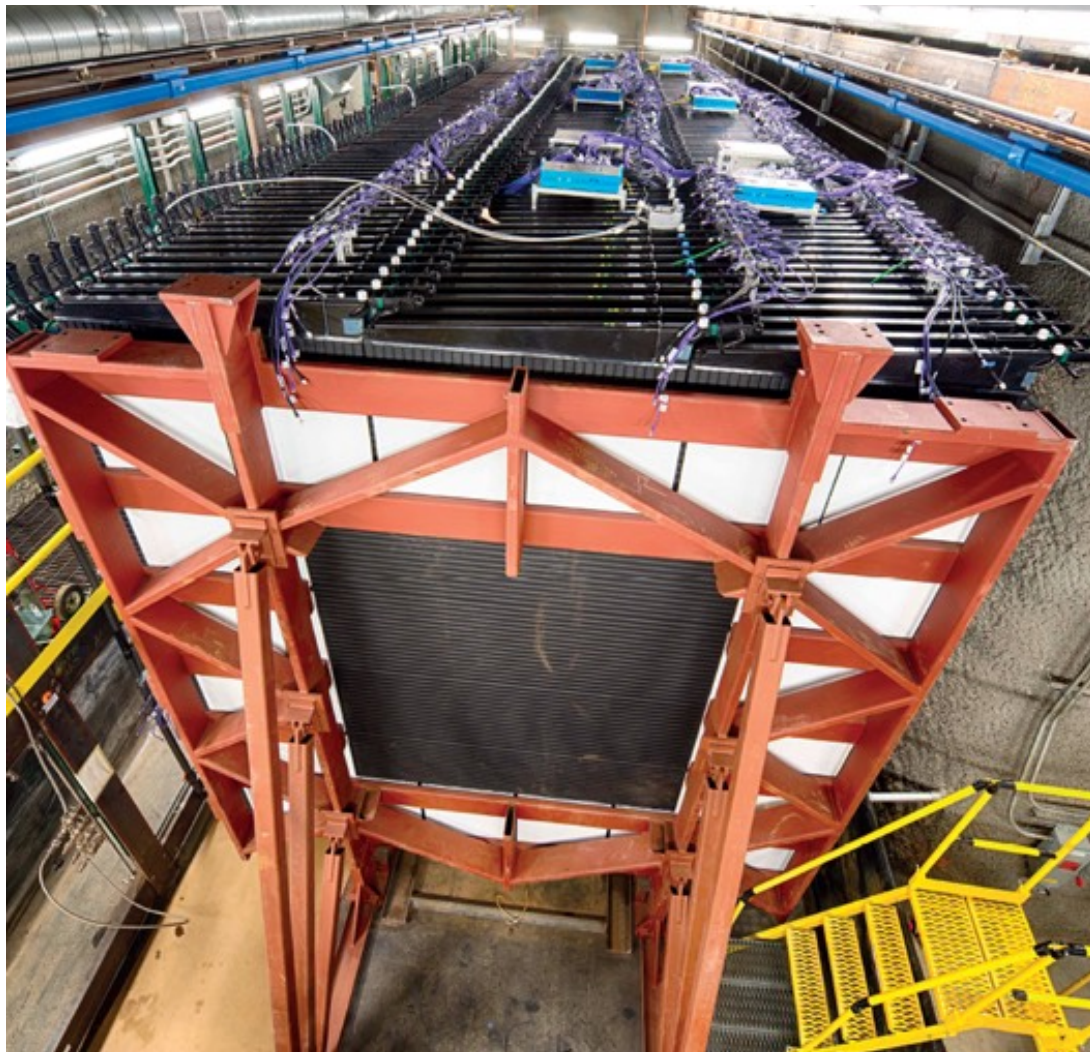


Нейтринный пучок



- ❖ Экспозиция антинейтринного пучка увеличена на 78%.
 $6.91 \times 10^{20} \rightarrow 12.33 \times 10^{20}$ (2018 $\rightarrow$ 2019).
- ❖ NuMI комплекс работает в режиме > 700 кВт.

Схема работы с двумя детекторами



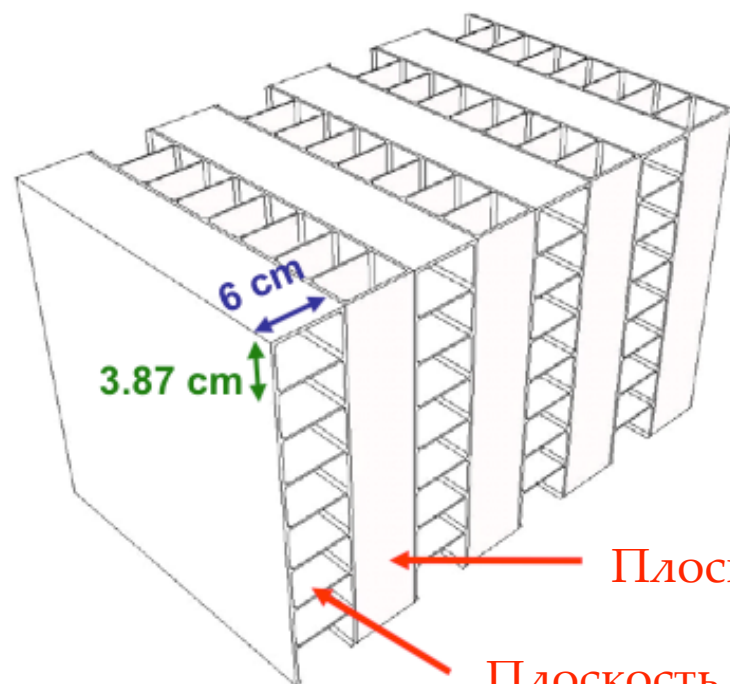
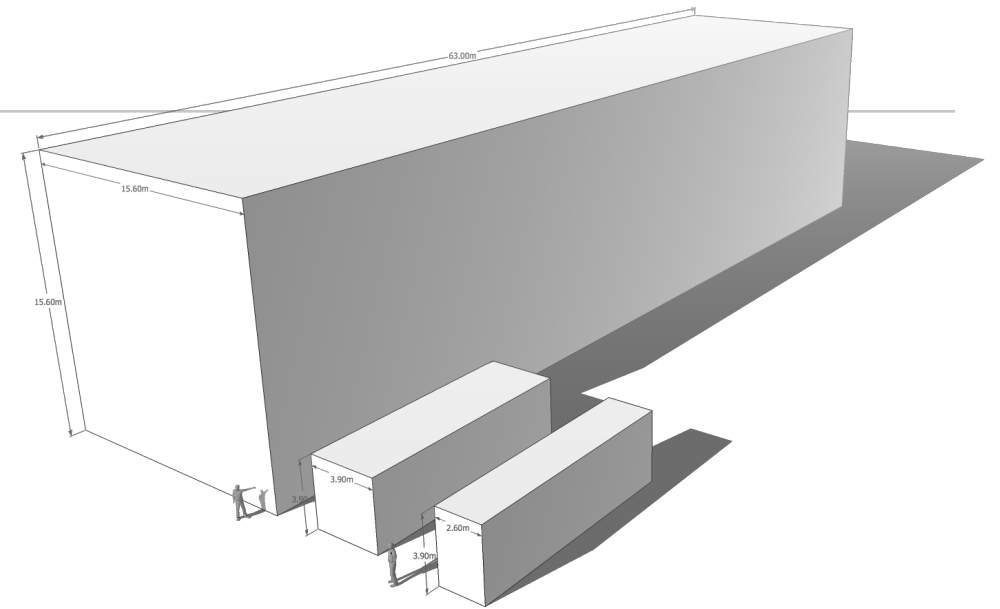
- ❖ Ближний детектор
 - ➔ расположен в 1 км после пучковой мишени, вес 300 тонн.
 - ➔ выполняет роль монитора и измеряет неосцилляционный спектр пучка
 - ➔ данные БД используются для предсказания числа событий в ДД (процедура экстраполяции)



- ❖ Дальний детектор
 - ➔ расположен на расстоянии 810 км от пучковой мишени, вес 14 кт.
 - ➔ измеряет осцилляционный нейтринный пучок
 - ➔ учитывает систематические погрешности экстраполяции из БД
 - ➔ ДД идентичен БД

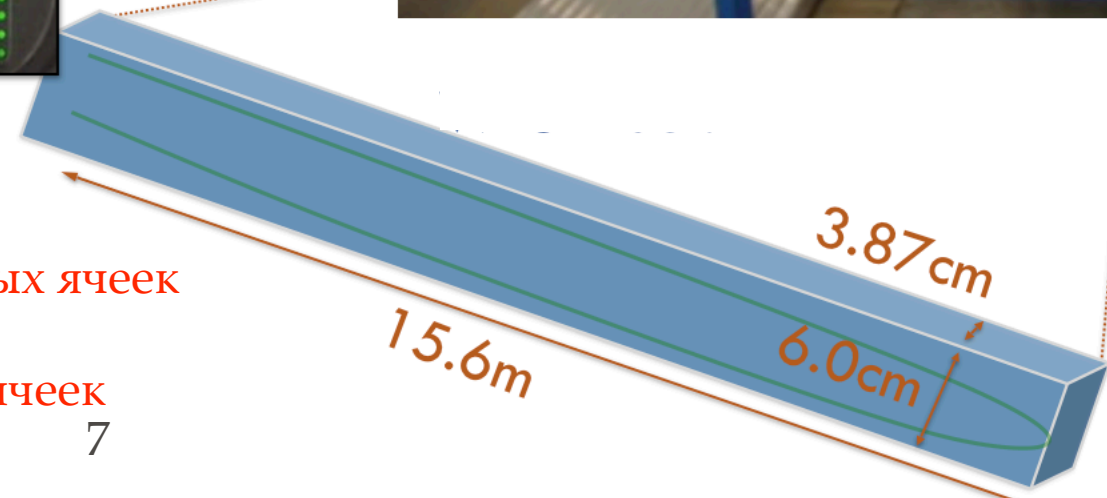
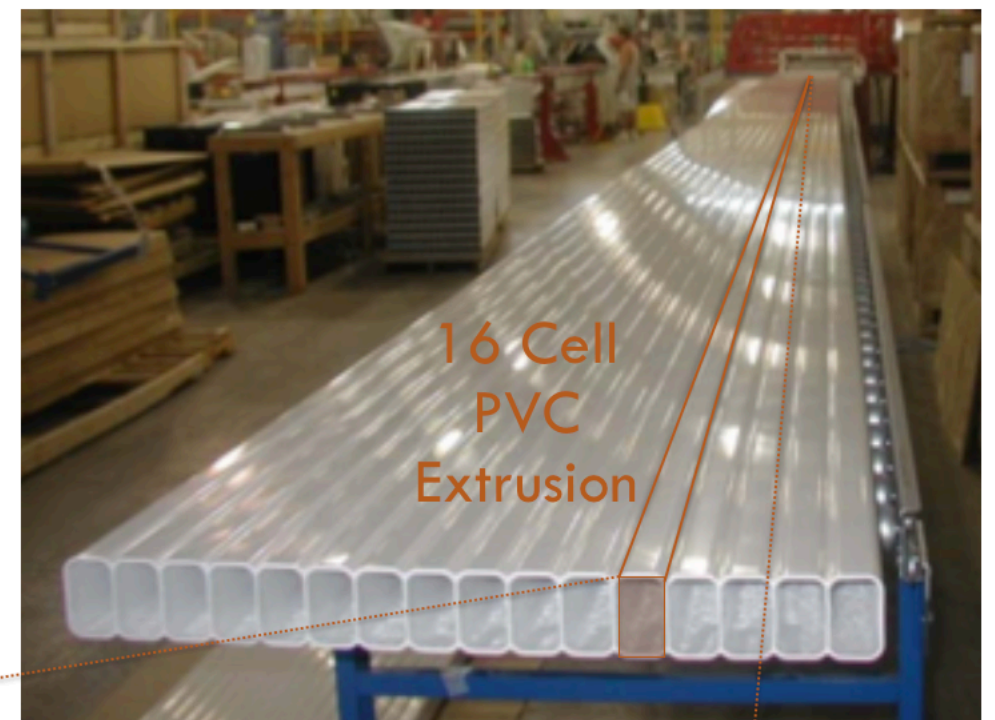
Детекторы NOvA

- ❖ ПВХ экструзия, TiO_2 и жидкий сцинтиллятор
- минеральное масло + 5% псевдокумола.
- ❖ Считывание сигнала через светосмещающее оптоволокно на ЛФД.
- ДД состоит из ~344,000 каналов.
- среднее значение фотоэлектронов от мюонов, пересекающих дальний край, составляет ~40.
- ❖ Плоскости детектора расположены ортогонально и чередуются между собой.



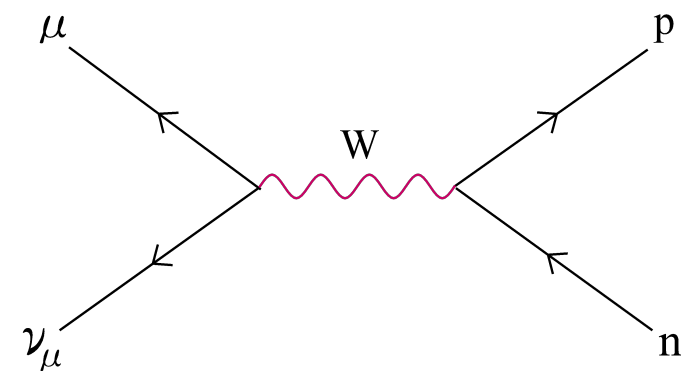
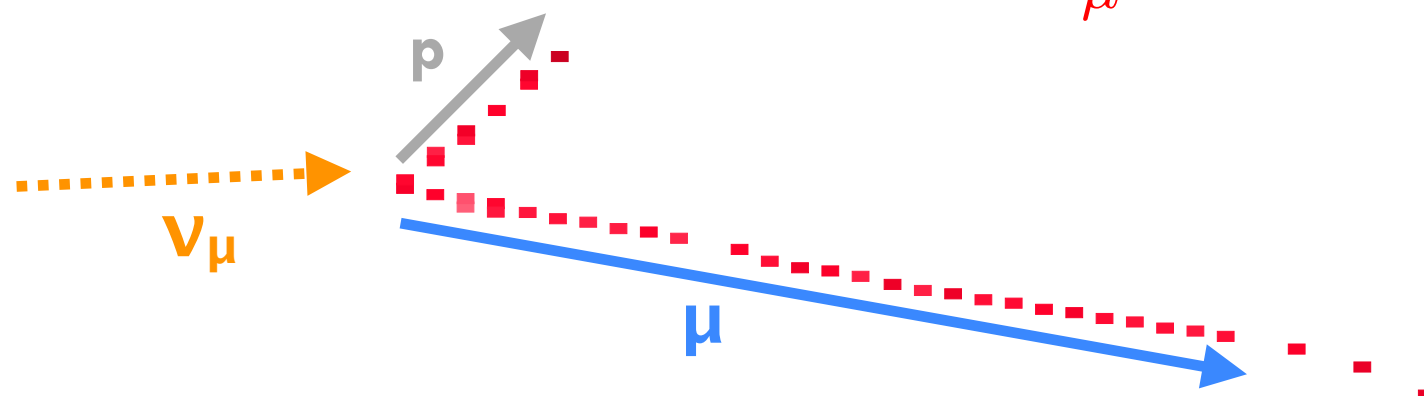
Плоскость вертикальных ячеек

Плоскость горизонтальных ячеек

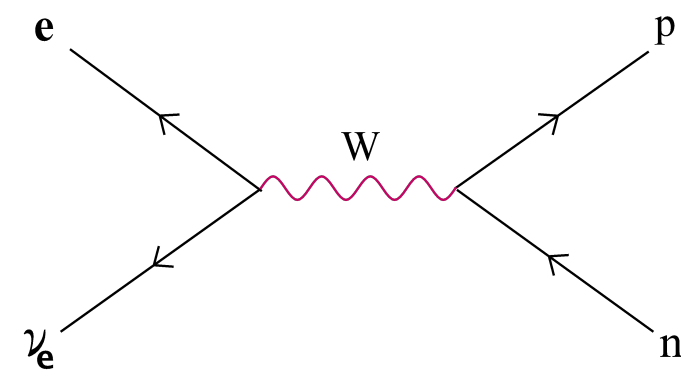
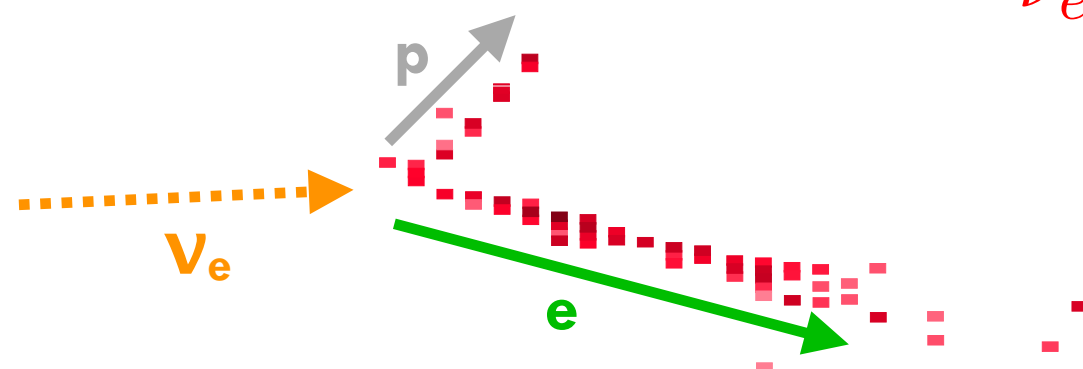


Топология событий

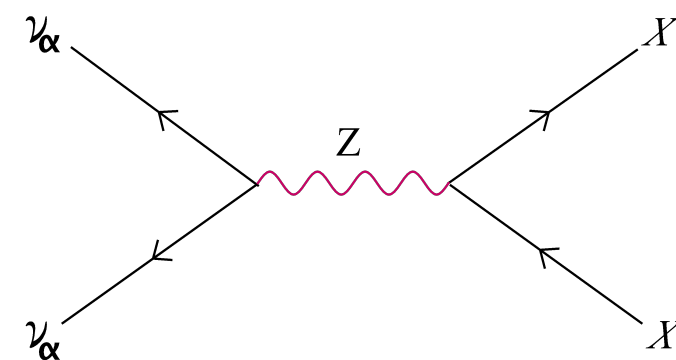
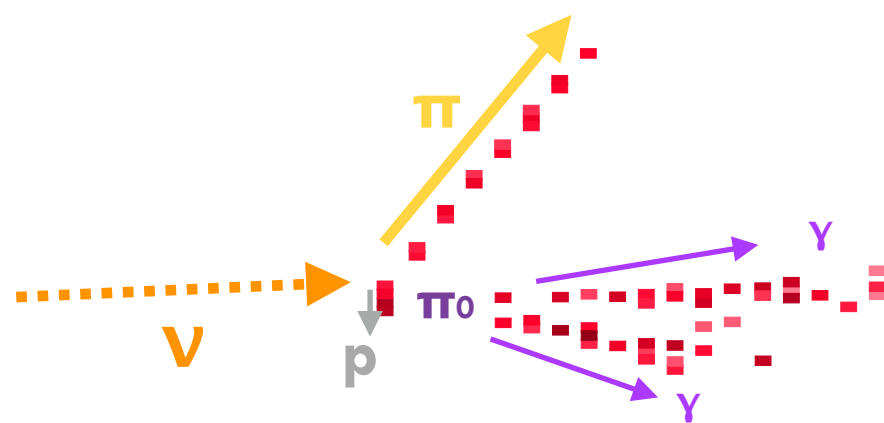
$\nu_\mu CC$



$\nu_e CC$



NC



1m

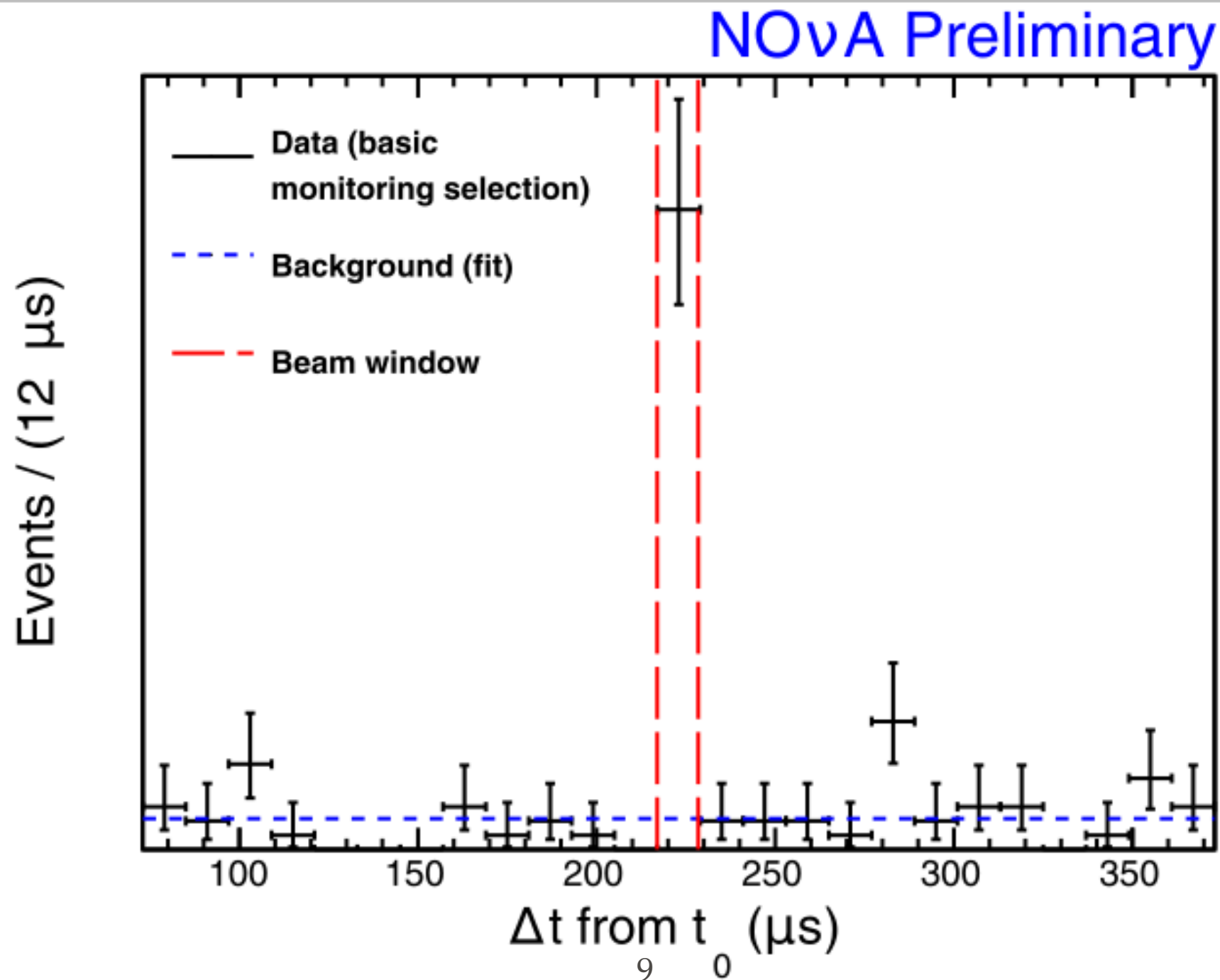
1m

8

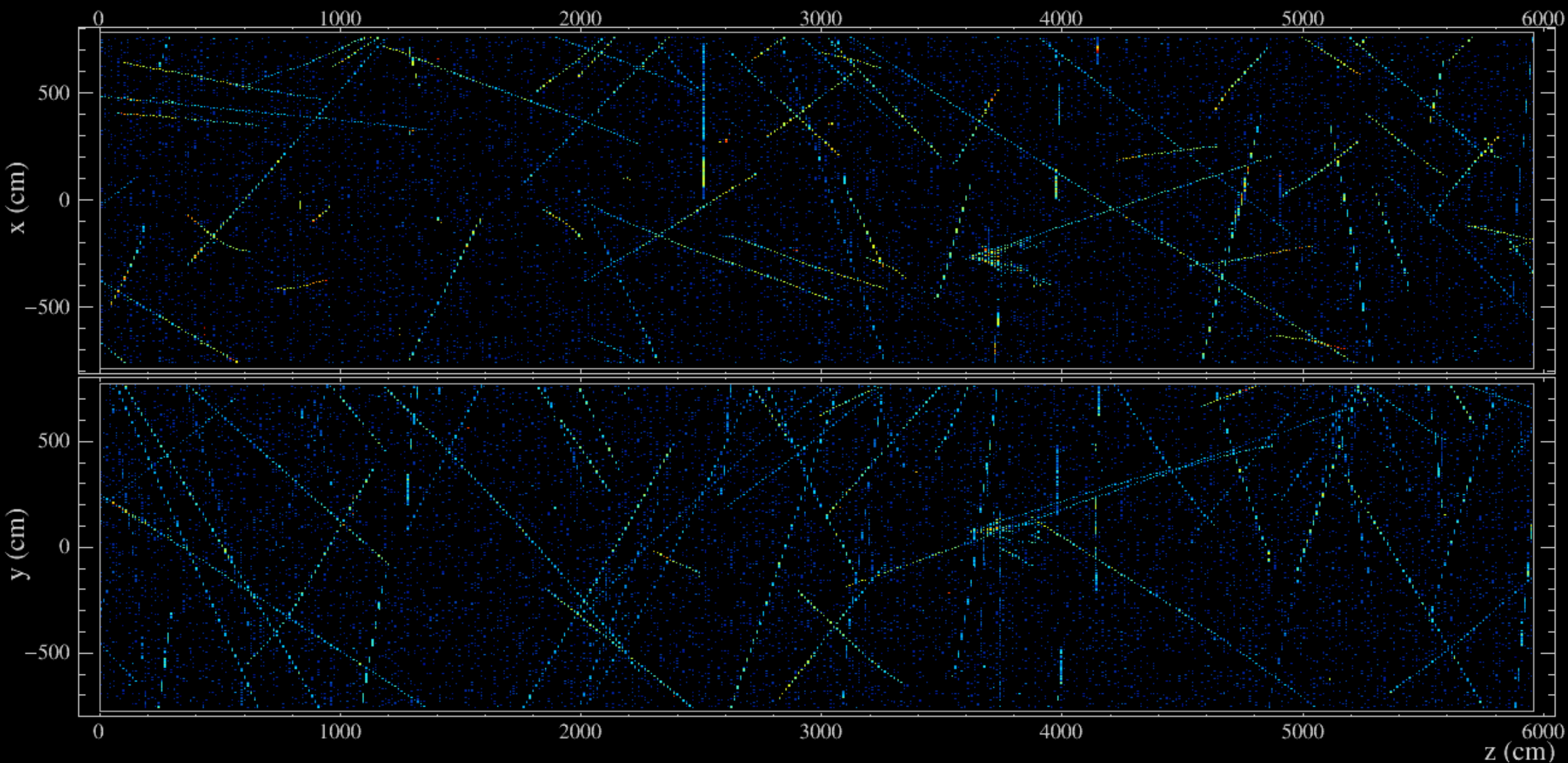
10 10² 10³ q (ADC)

Пик событий от пучка в ДД

- ❖ Структура триггера пучка: окно 550 мкс, нейтрино от NuMI прибывают в течение 10 мкс, начиная с момента 218 мкс.



550 μ s exposure of the Far Detector



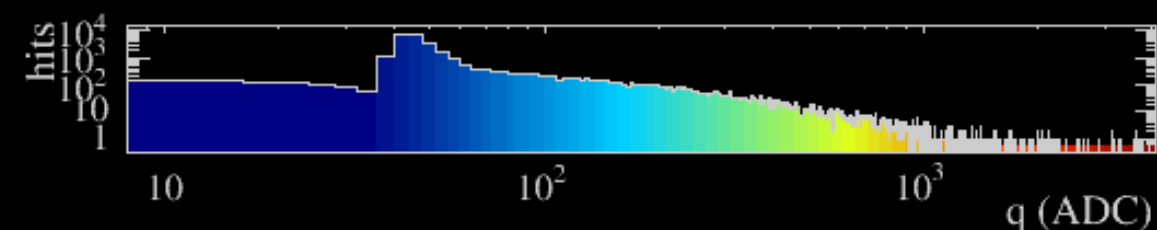
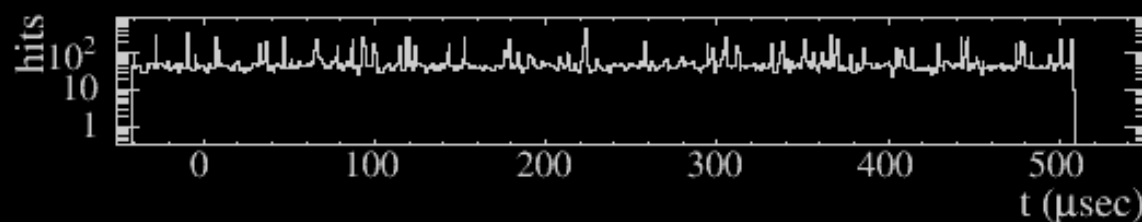
NOvA - FNAL E929

Run: 18620 / 13

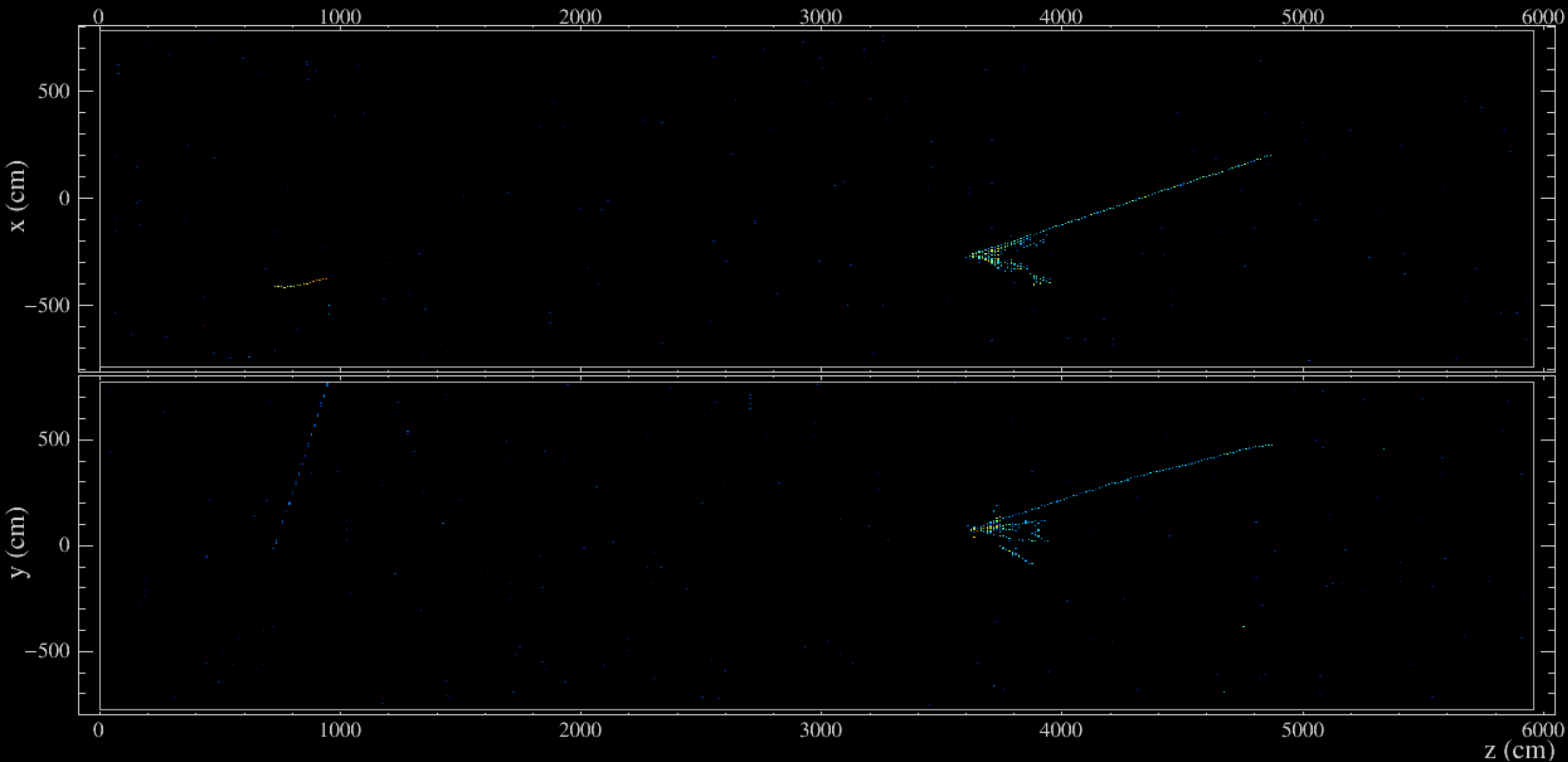
Event: 178402 / --

UTC Fri Jan 9, 2015

00:13:53.087341608



Time-zoom on 10 μ s interval during NuMI beam pulse



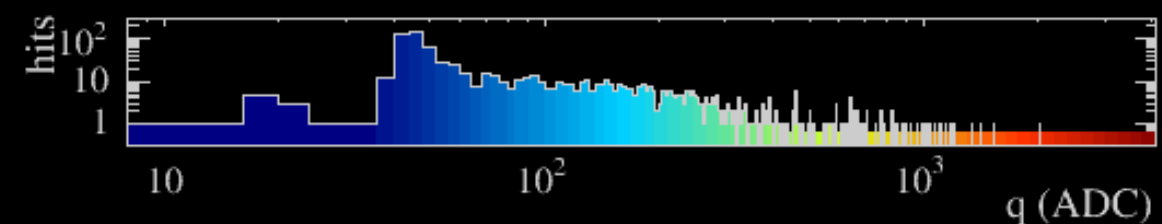
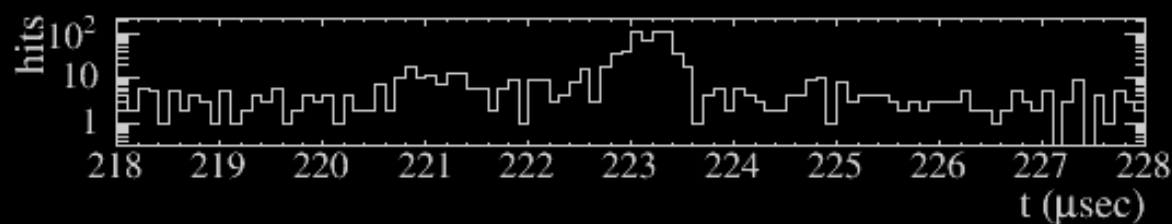
NOvA - FNAL E929

Run: 18620 / 13

Event: 178402 / --

UTC Fri Jan 9, 2015

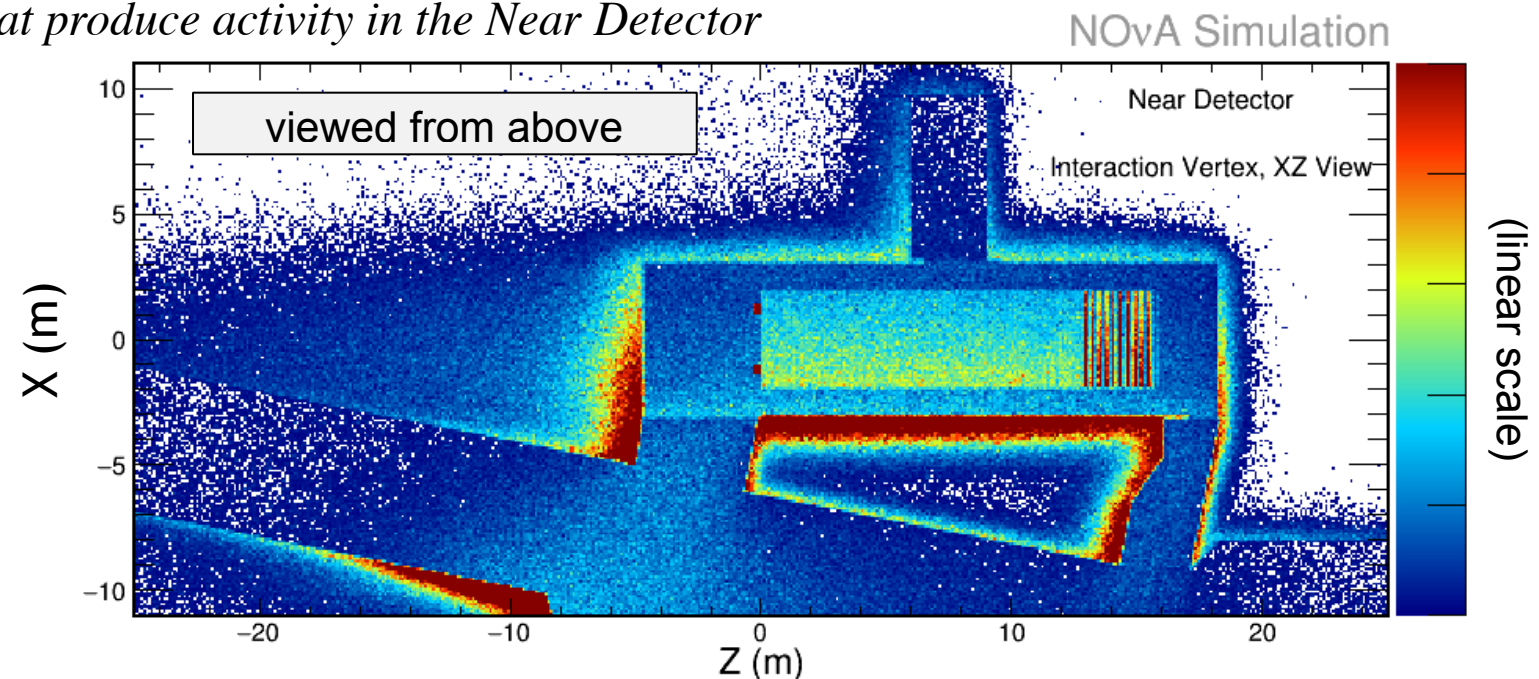
00:13:53.087341608



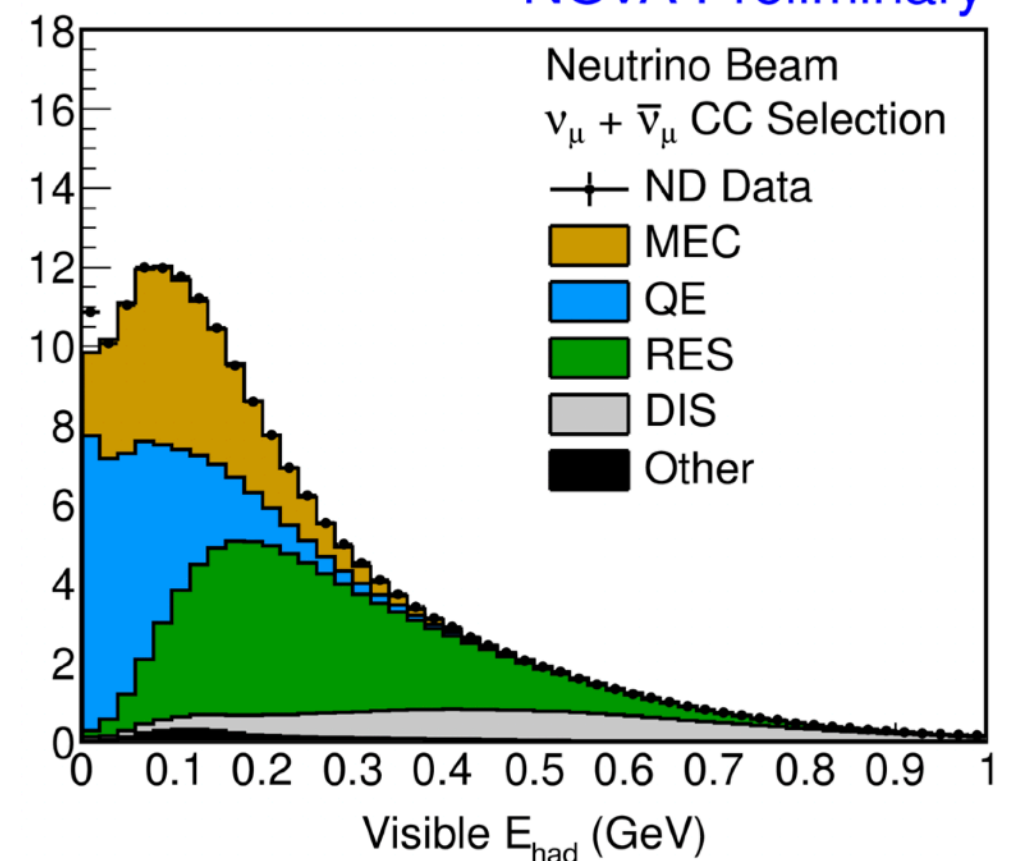
Симуляция событий и настройка нейтринных взаимодействий

- ❖ Моделирование нейтринного пучка: GEANT4 / Данные MINERvA.
- ❖ Атмосферные мюоны: Триггер данных.
- ❖ Нейтринные взаимодействия и настройка сечений: GENIE v2.12.2 / Данные MINERvA.
- ❖ Моделирование сигналов в детекторах: GEANT4 и собственные программы для световых сцинтиляторов и транспорт сигналов до фотодетекторов.
- ❖ Считывающая электроника и DAQ система: собственные программы.

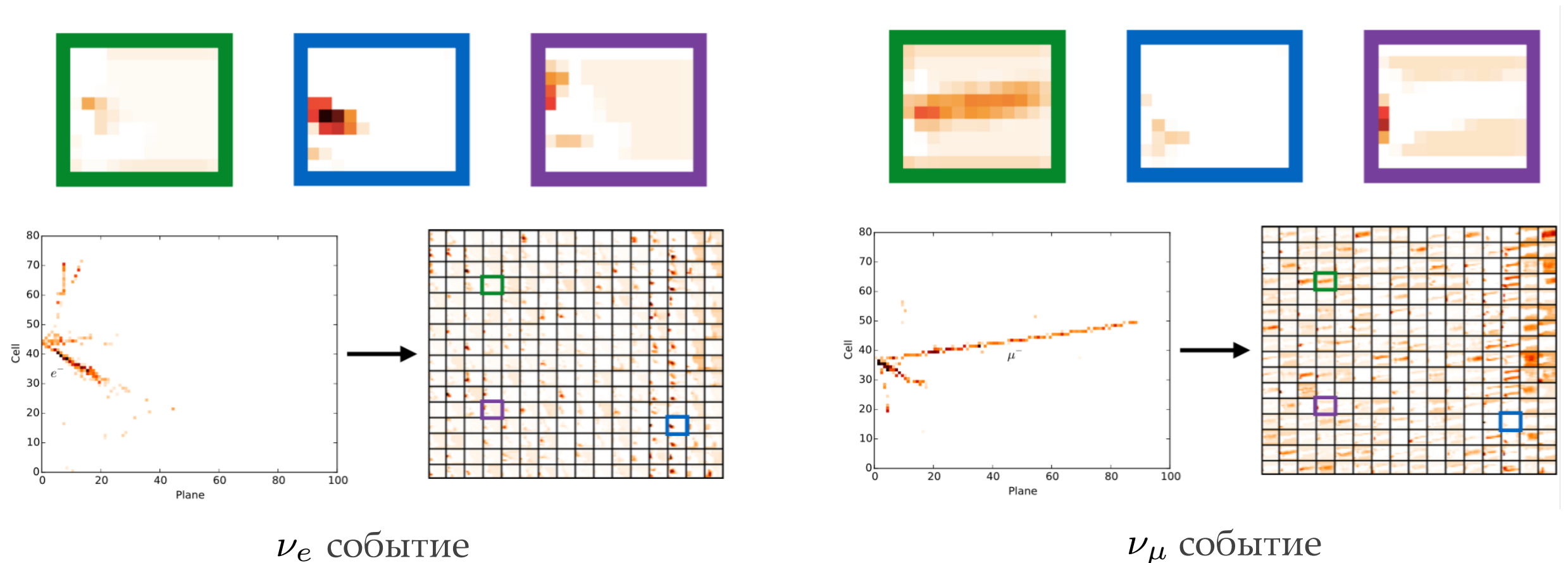
Simulation: Locations of neutrino interactions that produce activity in the Near Detector



NOvA Preliminary



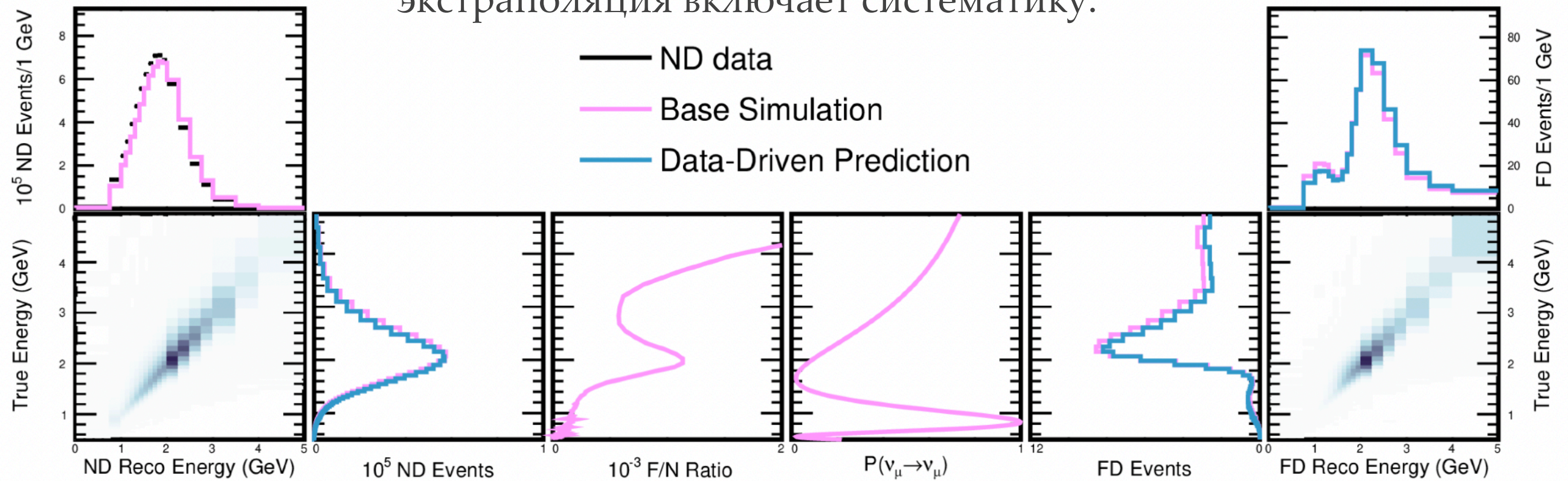
Отбор событий при помощи CVN



- ❖ Для идентификации событий используется свёрточная нейронная сеть CVN (Convolutional Visual Network).
 - ❖ Техника основана на алгоритмах GoogLeNet (компьютерное зрение и машинное обучение).
 - ❖ Классификатор по нескольким меткам - та же сеть, которая использовалась в нескольких анализах: ν_e , ν_μ , атмосферные мюоны, нейтральные токи, ...
- A. Aurisano et. al, JINST 11, P09001 (2016)

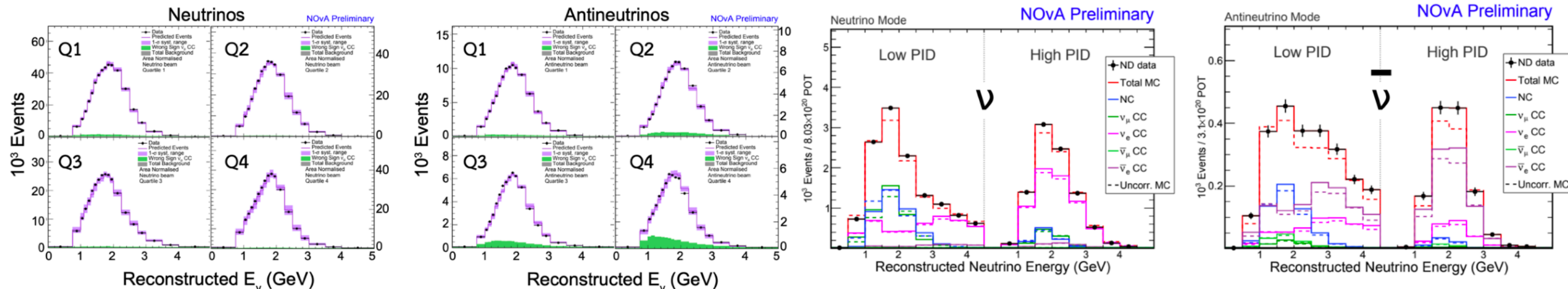
Предсказание событий в ДД

Большая статистика, неосцилляционные данные в БД,
экстраполяция включает систематику.

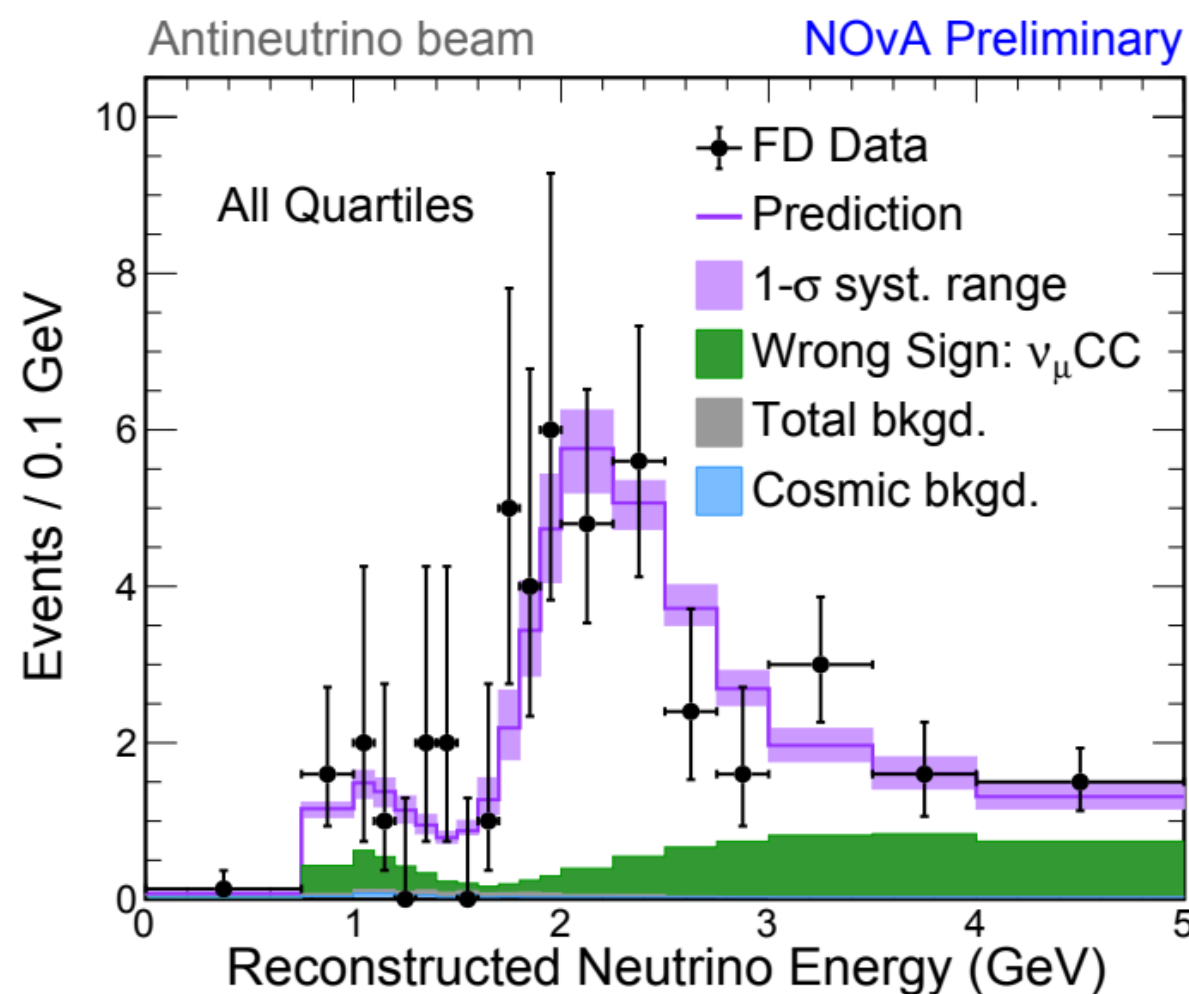
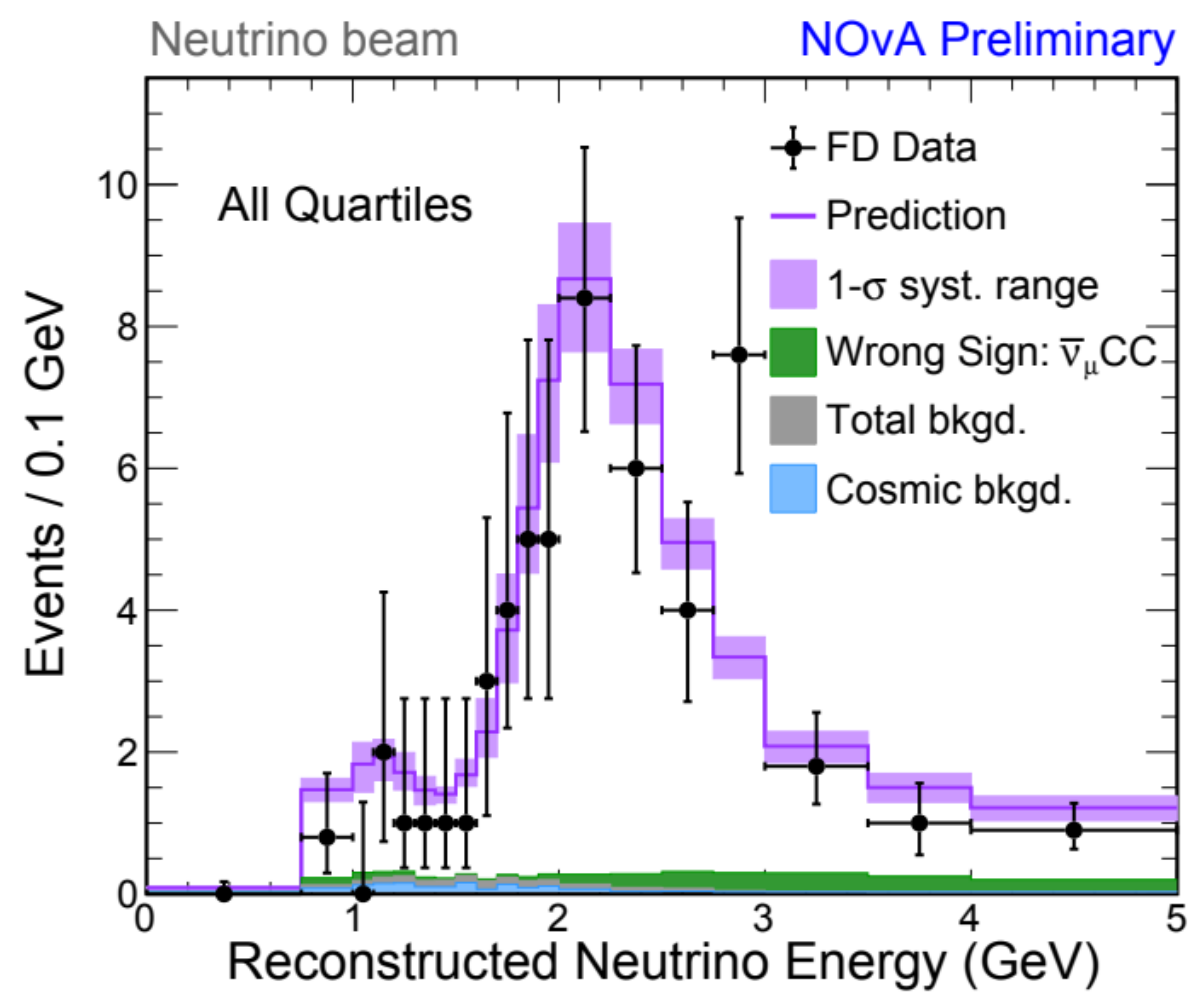


Данные БД для ν_μ (разделены по разрешению)

Данные БД для ν_e (только фон)



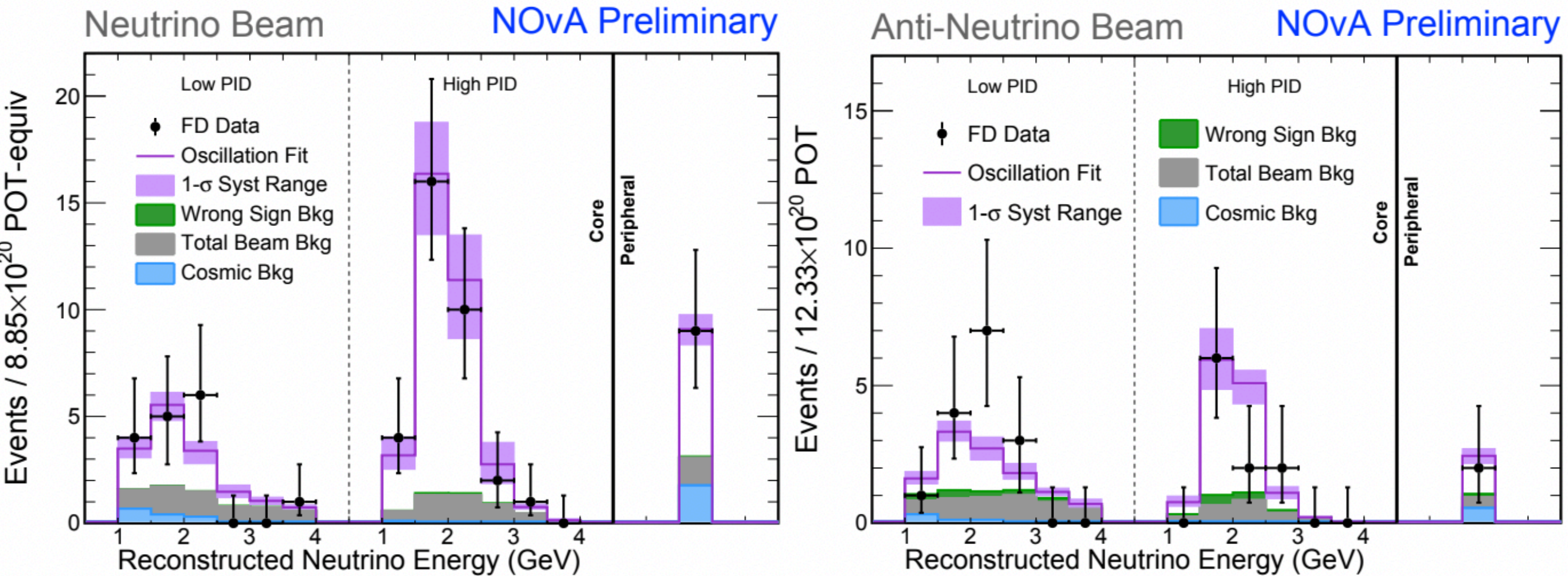
Полученная статистика ν_μ в ДД



ν_μ кандидаты в данных	113
Наилучшее предсказание	124
Суммарный фон	4.2
➡ атмосферные мюоны	2.1
➡ пучок	2.1
Предсказание без осцилляций	730

$\bar{\nu}_\mu$ кандидаты в данных	102
Наилучшее предсказание	96
Суммарный фон	2.2
➡ атмосферные мюоны	0.8
➡ пучок	1.4
Предсказание без осцилляций	476

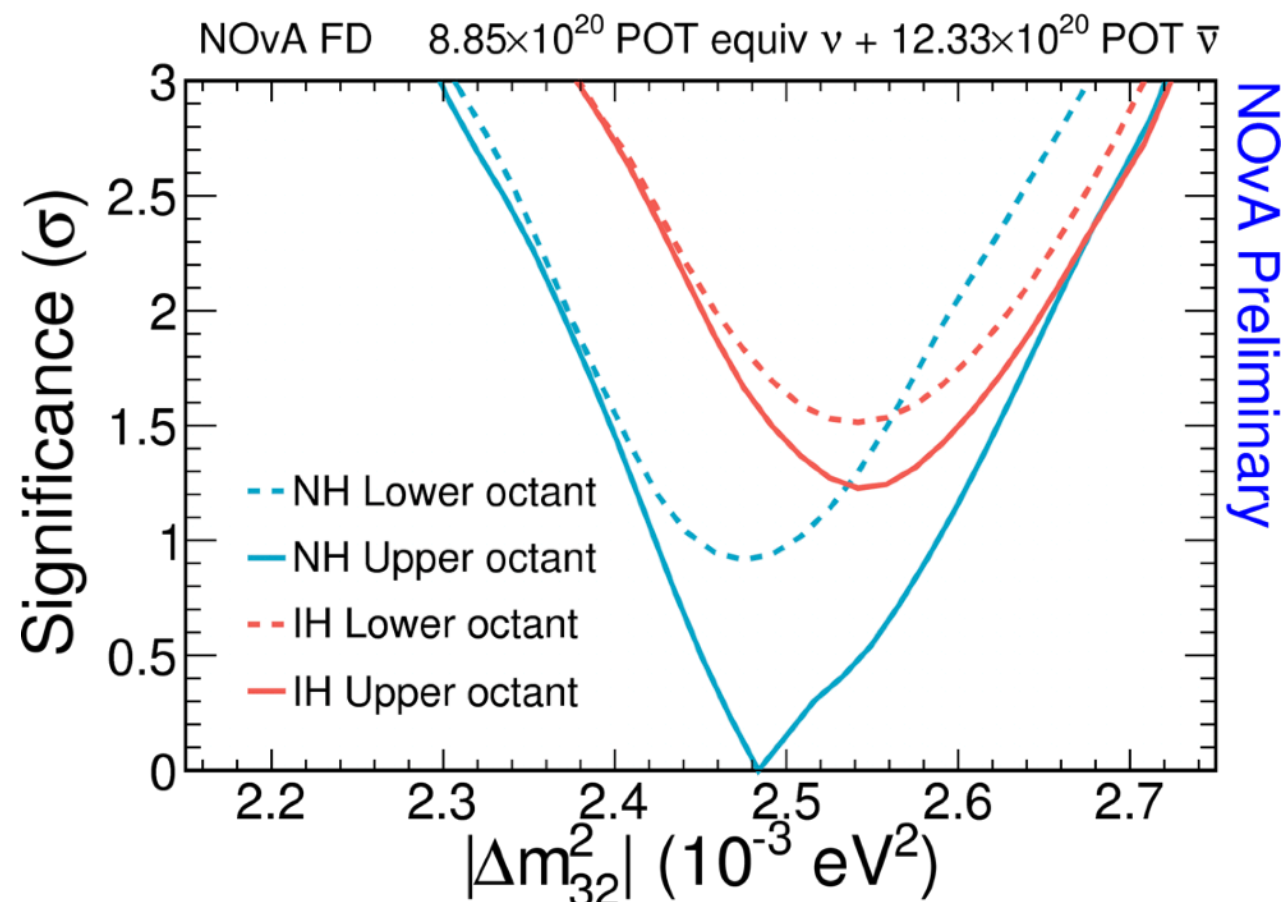
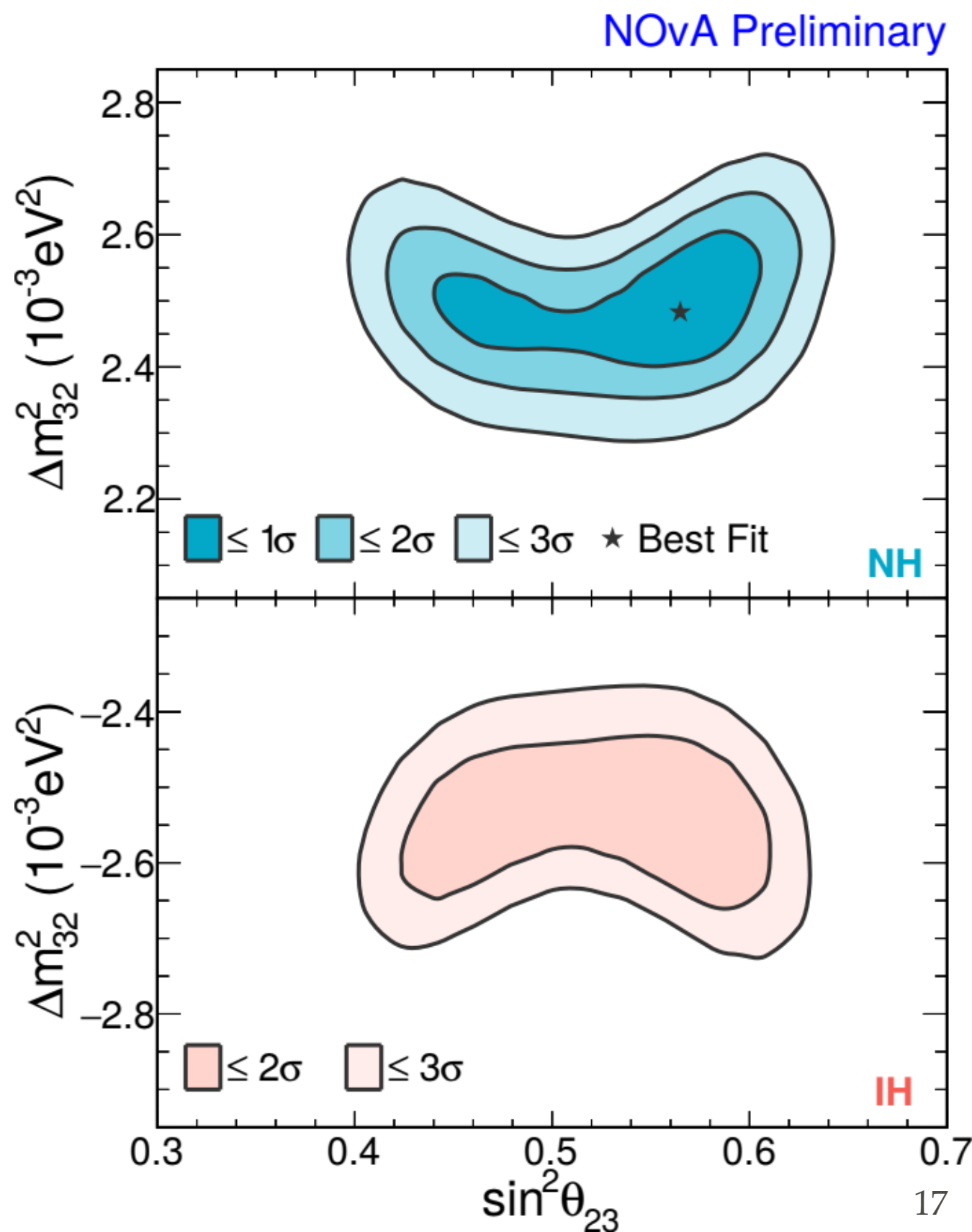
Полученная статистика ν_e в ДД



ν_e кандидаты в данных	58
Наилучшее предсказание	59
Суммарный фон	15.0
➡ атмосферные мюоны	3.3
➡ пучок	11.1
➡ “обратный знак” ($\bar{\nu}_e$)	0.7

$\bar{\nu}_e$ кандидаты в данных	27
Наилучшее предсказание	27
Суммарный фон	10.3
➡ атмосферные мюоны	1.1
➡ пучок	7.0
➡ “обратный знак” (ν_e)	2.2

Осцилляционные результаты (совместный фит)

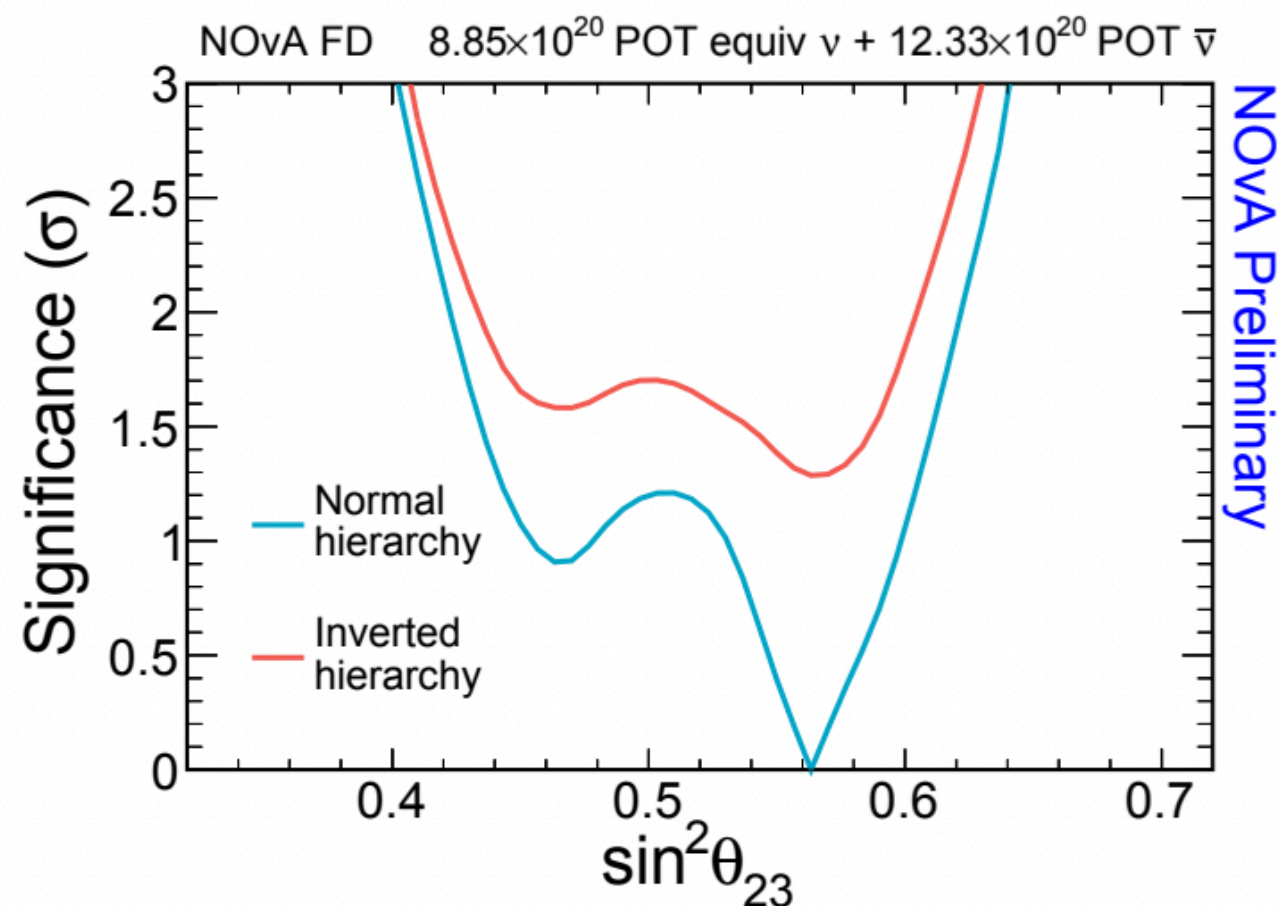
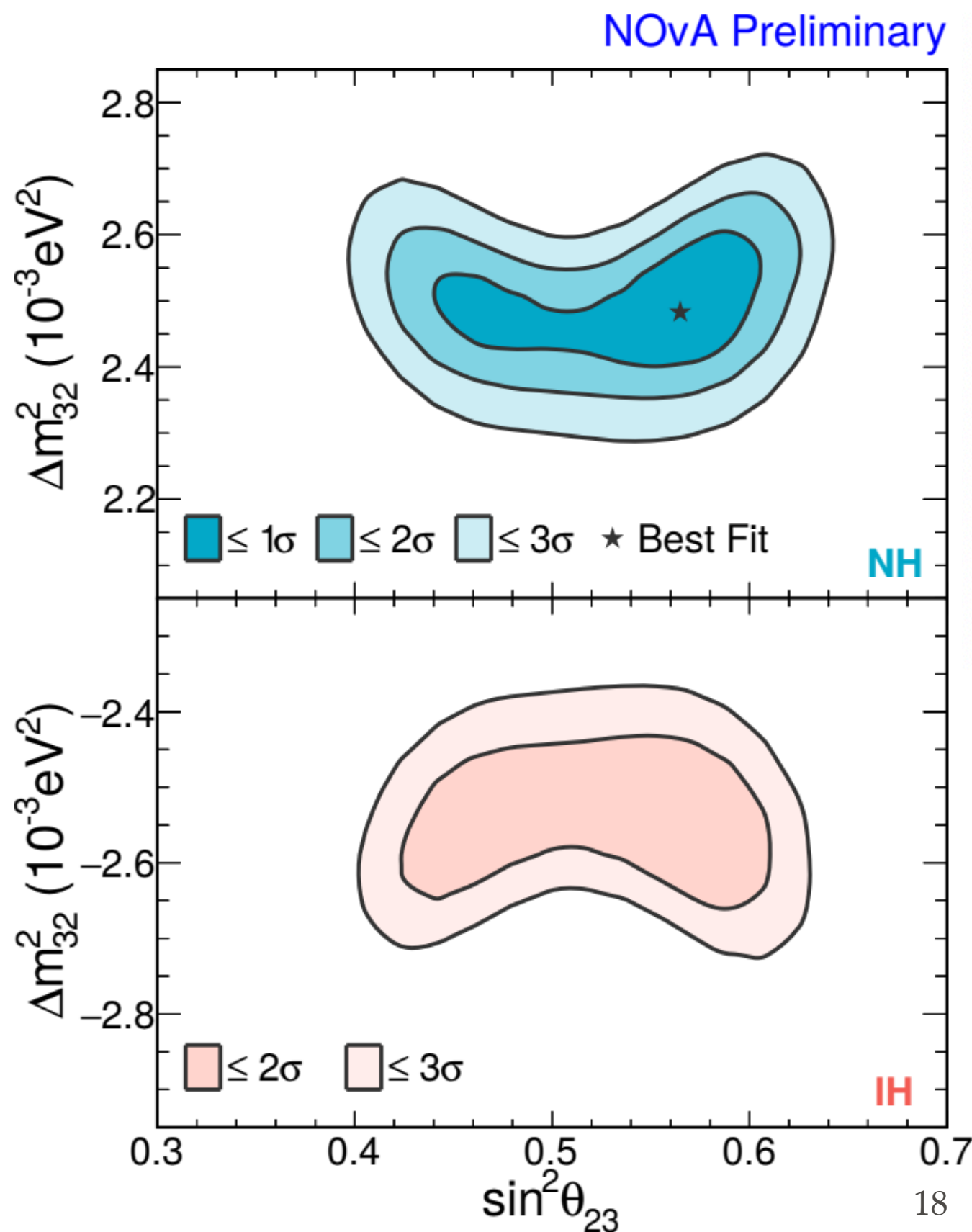


$$\sin^2 \theta_{23} = 0.56^{+0.04}_{-0.03}$$

$$\Delta m_{32}^2 = +2.48 \times 10^{-3} \text{eV}^2 \text{ (NH)}$$

$$\delta_{CP} = 0.0^{+1.3}_{-0.4} \pi.$$

Осцилляционные результаты (совместный фит)

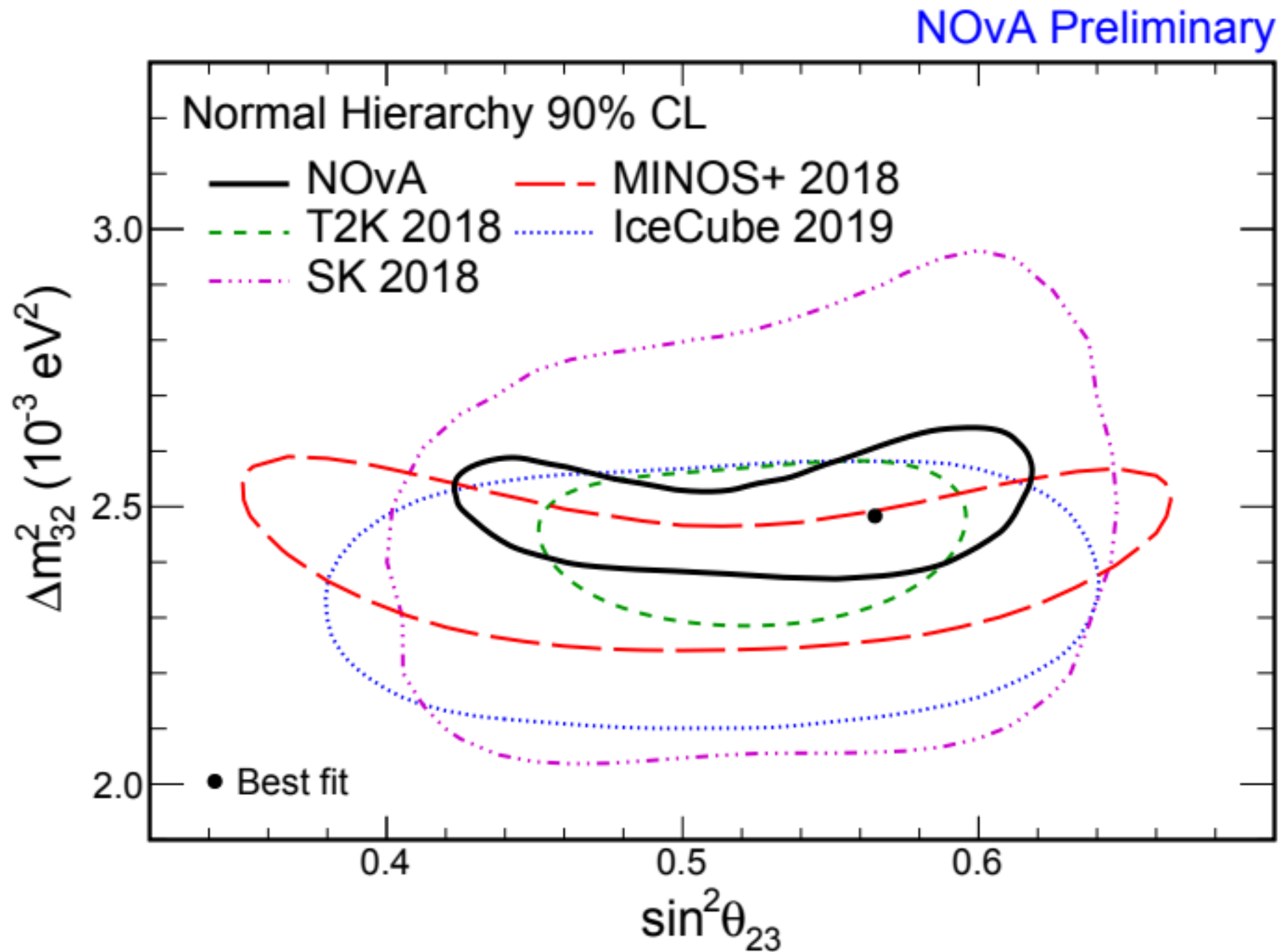


$$\sin^2 \theta_{23} = 0.56^{+0.04}_{-0.03}$$

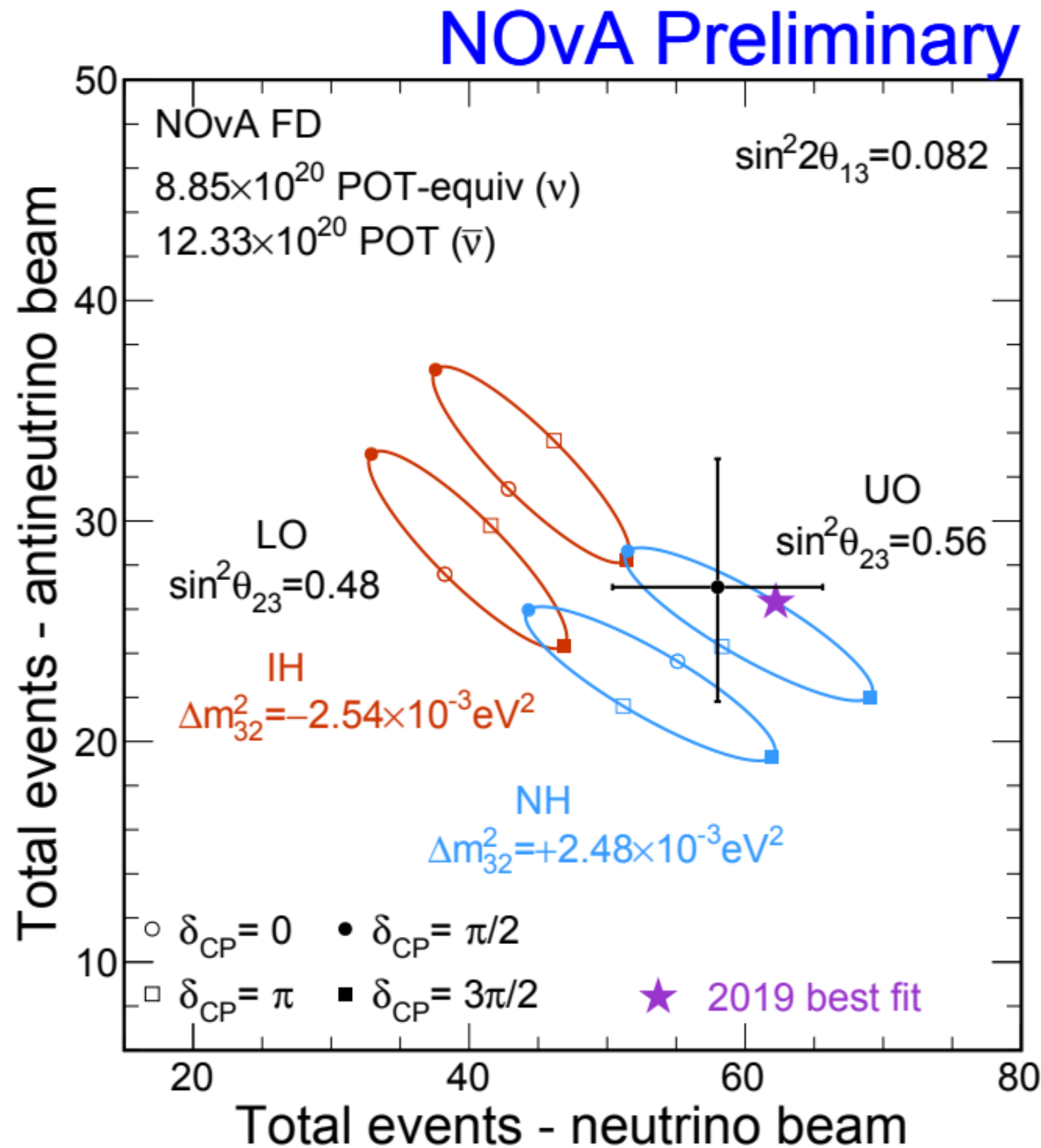
$$\Delta m_{32}^2 = +2.48 \times 10^{-3} \text{eV}^2 \text{ (NH)}$$

$$\delta_{CP} = 0.0^{+1.3}_{-0.4} \pi.$$

Осцилляционные результаты (совместный фит)



Осцилляционные результаты (совместный фит)

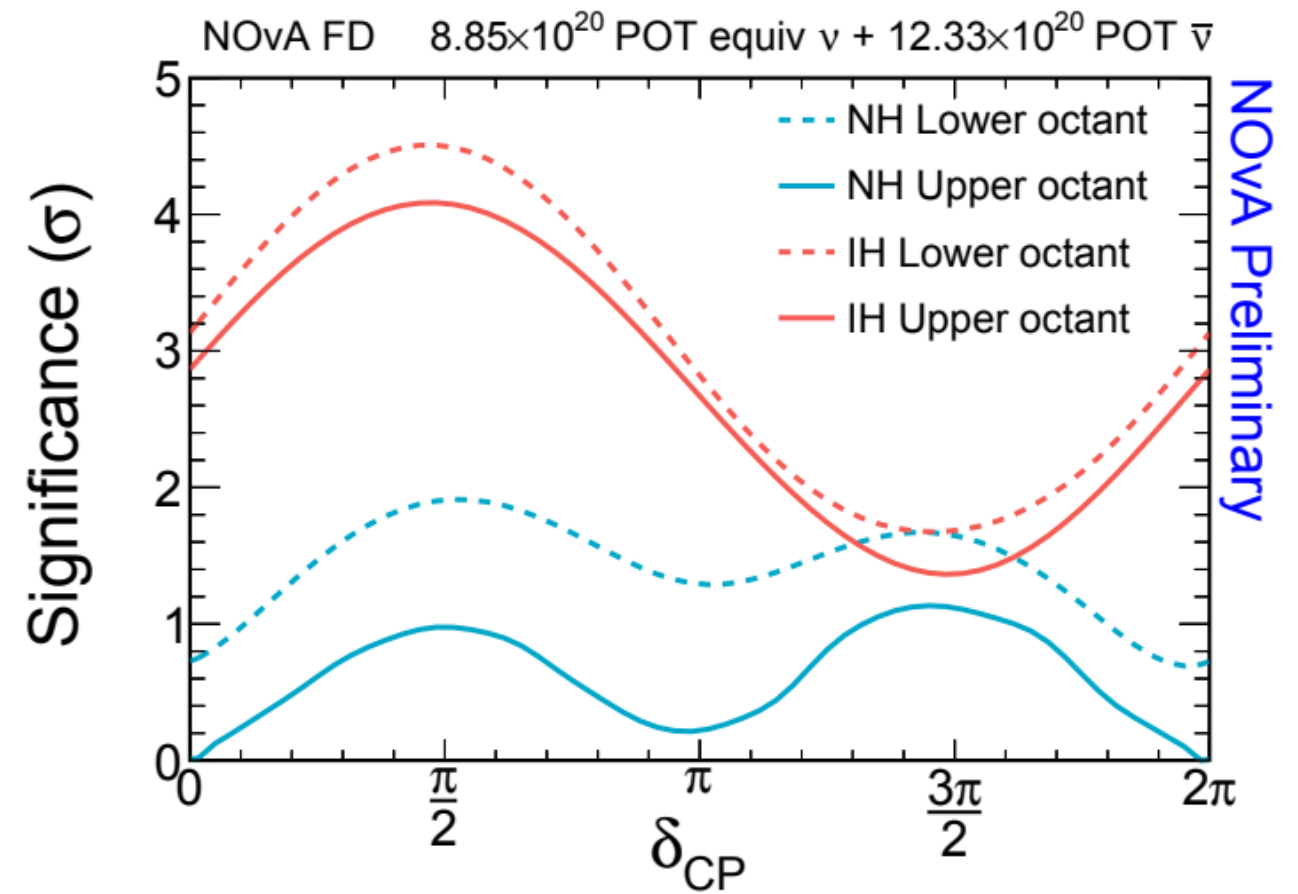
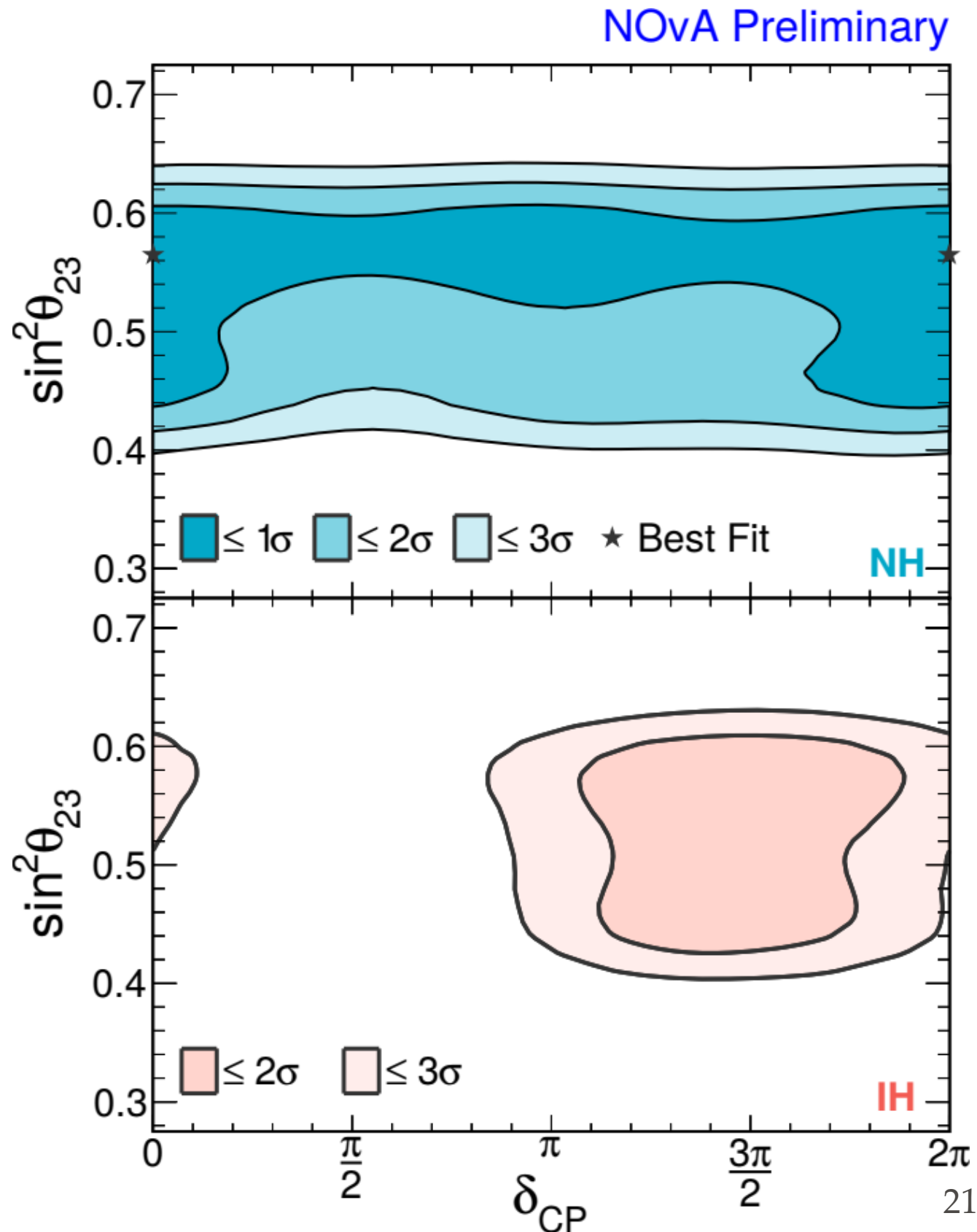


$$\sin^2 \theta_{23} = 0.56^{+0.04}_{-0.03}$$

$$\Delta m_{32}^2 = +2.48 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ (NH)}$$

$$\delta_{CP} = 0.0^{+1.3}_{-0.4} \pi.$$

Осцилляционные результаты (совместный фит)



$$\sin^2 \theta_{23} = 0.56^{+0.04}_{-0.03}$$

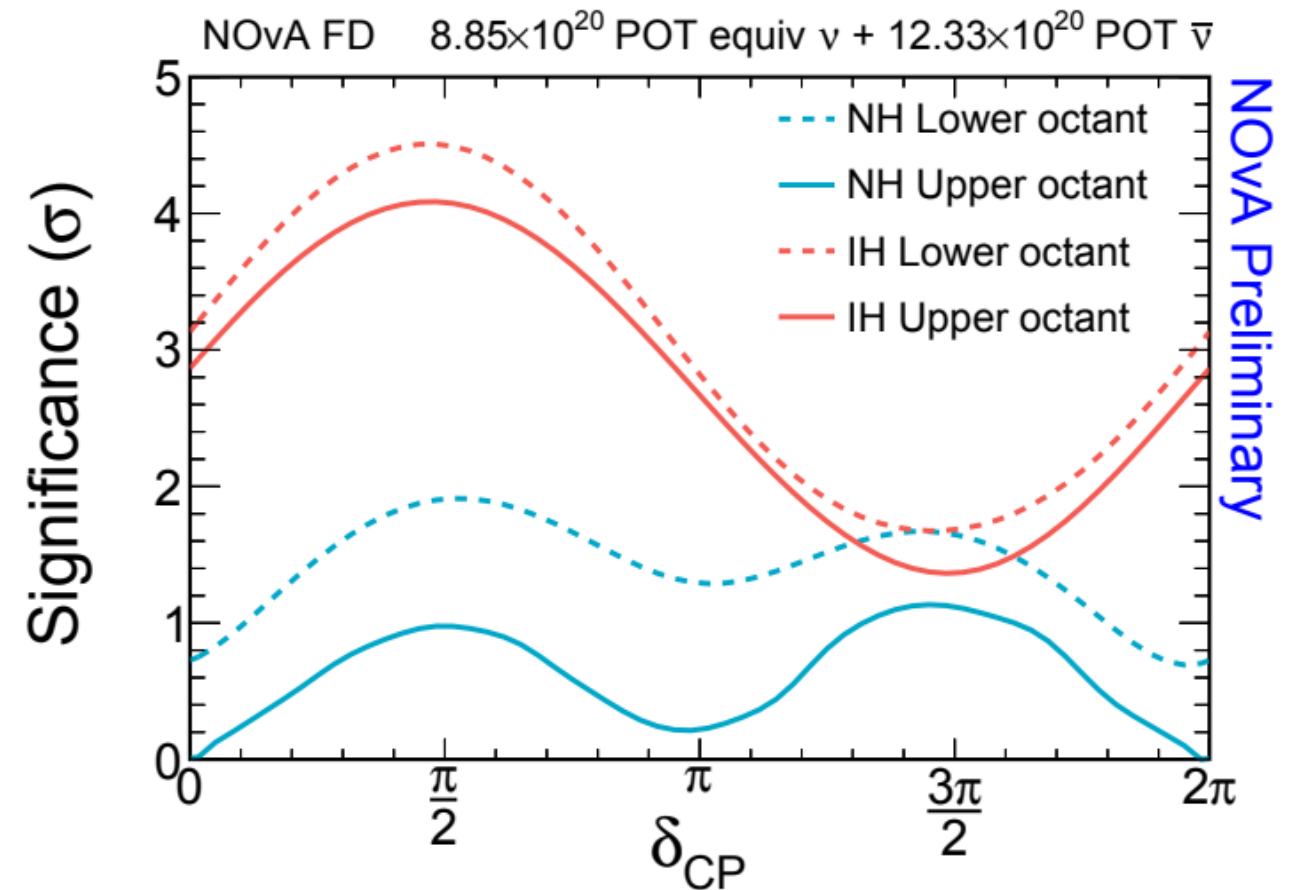
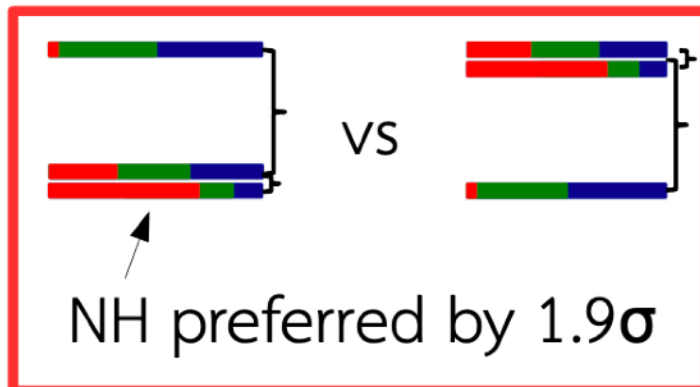
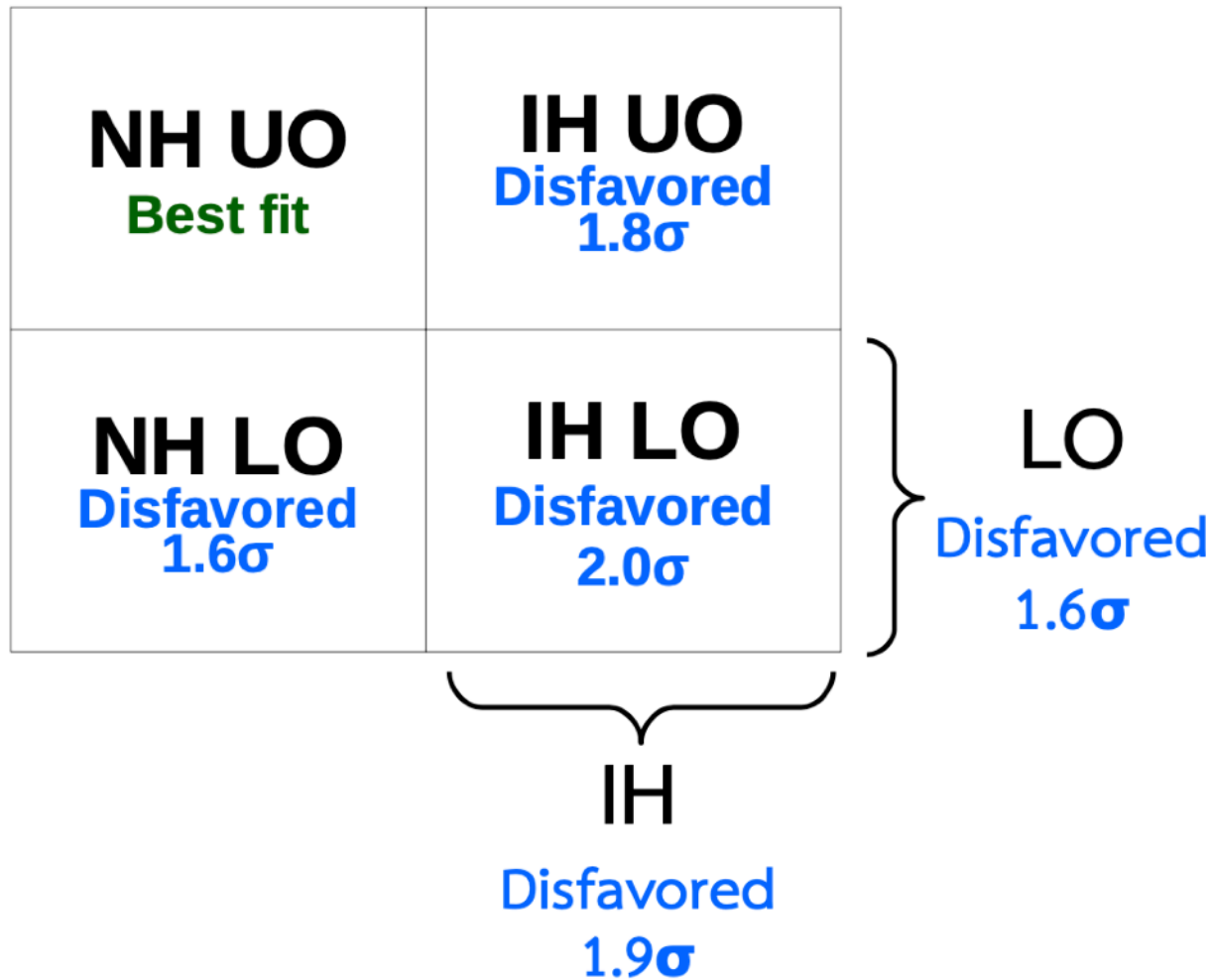
$$\Delta m_{32}^2 = +2.48 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ (NH)}$$

$$\delta_{CP} = 0.0^{+1.3}_{-0.4} \pi.$$

Результаты (вместо заключения)

→ M.A. Acero et al. Phys.Rev.Lett. 123 (2019) no.15, 151803

[Feldman-Cousins corrected significances]



$$\sin^2 \theta_{23} = 0.56^{+0.04}_{-0.03}$$

$$\Delta m_{32}^2 = +2.48 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ (NH)}$$

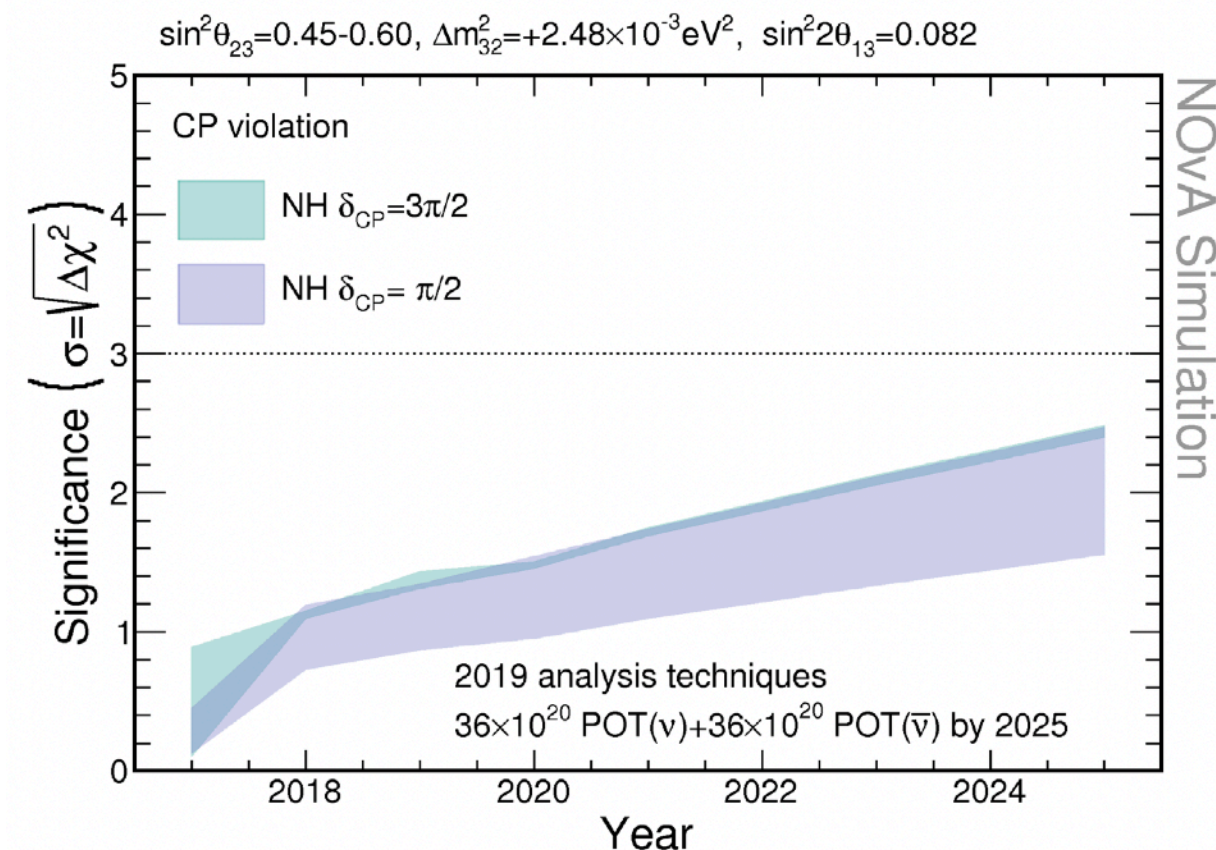
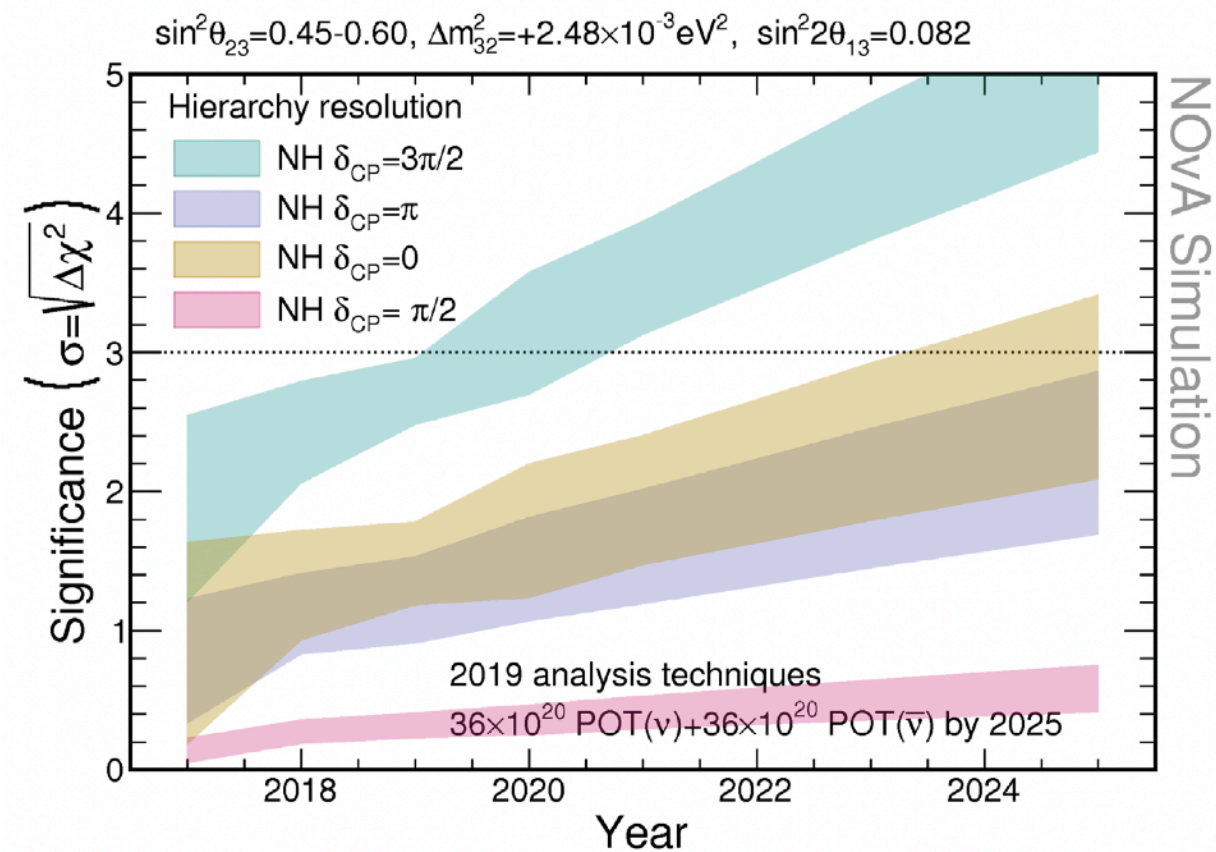
$$\delta_{CP} = 0.0^{+1.3}_{-0.4} \pi.$$

$$\Delta P_{\nu\bar{\nu}} \propto \sin \delta_{CP}$$

NH UO: All values of δ allowed at 1.1σ

IH: δ = π/2 ruled out > 4σ

Будущее



- ❖ Набор данных планируется до 2025 года:
 - ➔ 50:50 нейтрино и антинейтрино
 - ➔ Представленная статистика составит ~30%
- ❖ На основе текущих результатов ожидается:
 - ➔ 3-5 σ чувствительности к иерархии масс
 - ➔ $>2 \sigma$ чувствительности к CP нарушению
- ❖ Ожидаются также следующие улучшения:
 - ➔ увеличение мощности пучка
 - ➔ GENIE 3.0 (обновление моделей сечений)
 - ➔ Тестовый пучок (улучшение описание отклика детектора и идентификации частиц)

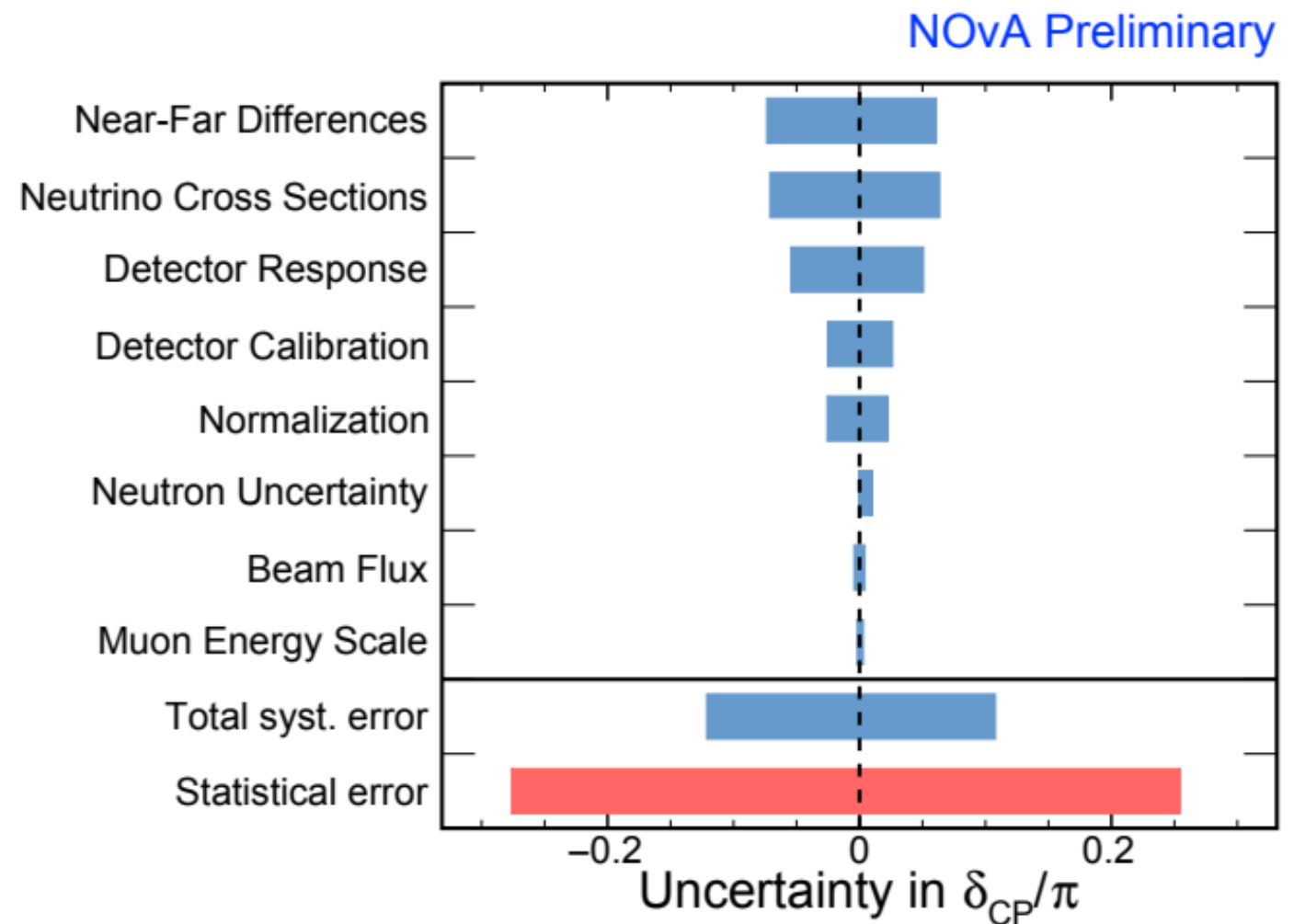
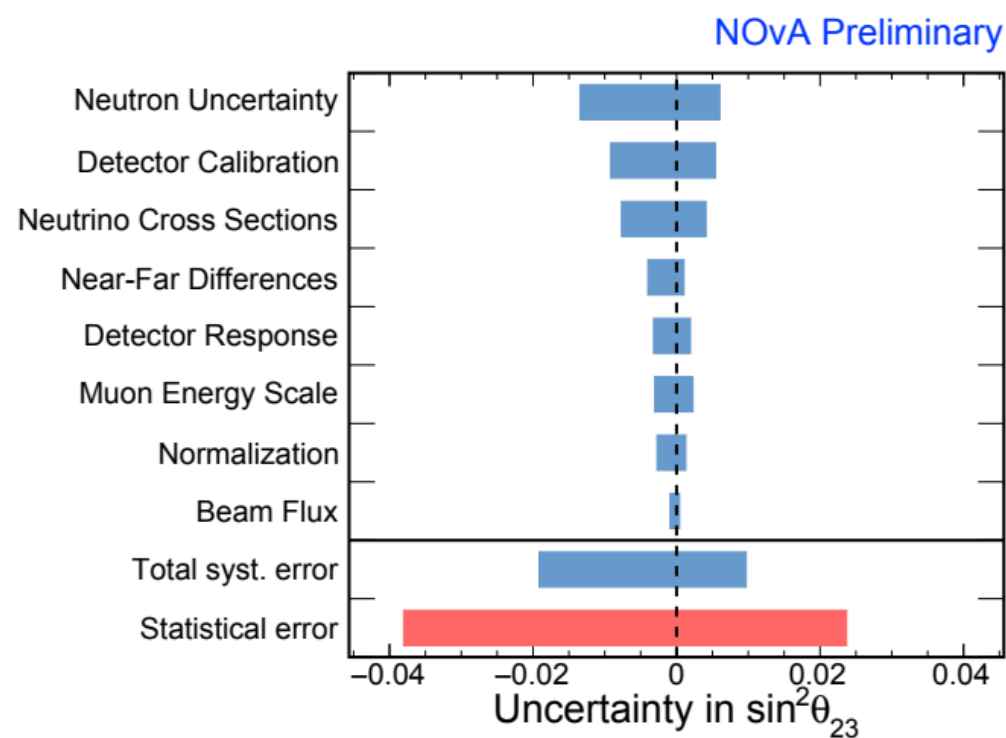
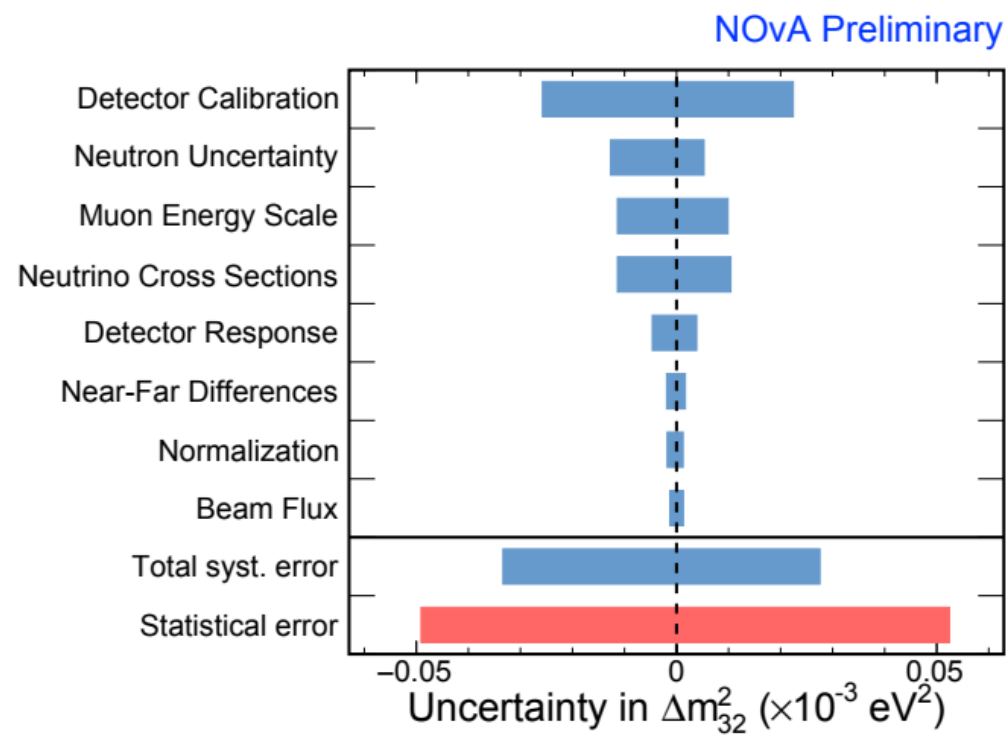


Спасибо за внимание!



[June 2019 meeting @ Sussex University, Brighton, UK]

Систематические неопределенности



Другие экспериментальные исследования NOvA

- ❖ Поиск осцилляций в стерильные нейтрино
 - Phys.Rev. D96 (2017) no.7, 072006.
- ❖ Измерения сечений нейтринных взаимодействий
 - arXiv:1902.00558.
- ❖ Исследование спектров атмосферных мюонов
 - Phys.Rev. D99 (2019) no.12, 122004.
- ❖ Детектирование нейтринного сигнала от взрывов Сверхновых в нашей Галактике
 - готовится статья к публикации.
- ❖ Другие экзотические анализы:
 - ✓ поиски магнитных монополей [готовится статья к публикации],
 - ✓ поиски темной материи,
 - ✓ нейтрон-антинейтронные осцилляции,
 - ✓ совпадение с сигналами гравитационных волн [arXiv:2001.07240].

Вклад ОИЯИ в NOvA

- ❖ Созданы два тестовых стенда для измерения параметров электроники и свойств сцинтиллятора. Измерения, проведенные на этих стендах в Дубне, сыграли существенную роль в уточнении процедуры моделирования установки.
- ❖ С 2015 года в ОИЯИ введен в эксплуатацию центр удаленного контроля (ROC-Dubna), позволяющий отслеживать работу и управлять экспериментом из Дубны. Создание этого центра существенно расширило возможности участия в эксперименте не только ОИЯИ, но и других российских коллег.
- ❖ Сотрудники ОИЯИ также участвуют в разработке программного обеспечения и анализе данных NOvA, используя вычислительные возможности Института и поддержку сотрудников ЛИТ

