

*Семинар ЛЯП, 16 марта 2023*

---

# Изучение нейтринных осцилляций в ускорительных экспериментах NO $\nu$ A / DUNE

Самойлов О.Б.  
для группы NO $\nu$ A / DUNE  
Лаборатория ядерных  
проблем  
им. В.П.Джелепова ОИЯИ

---

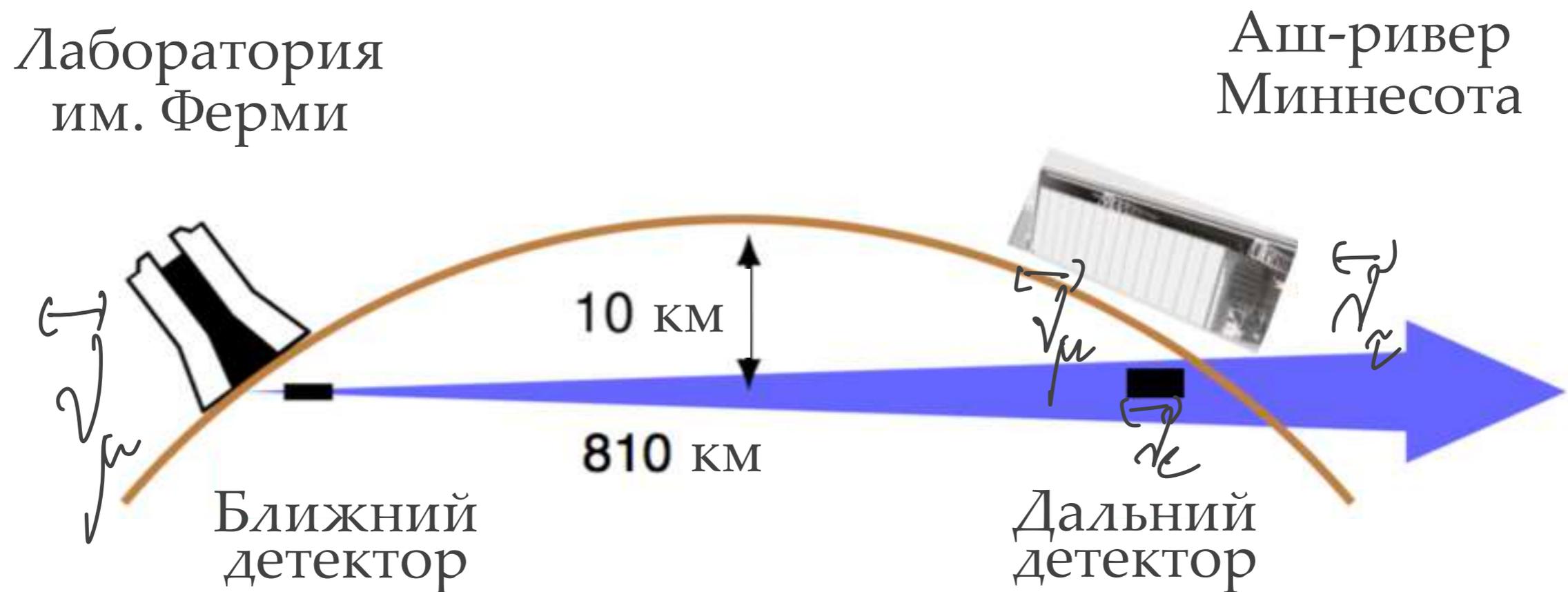
# Содержание семинара

---

- ❖ Основная цель проектов – изучение феномена нейтринных осцилляций, которые позволяют измерить неизвестные параметры нейтрино:
  - иерархию масс нейтрино,
  - фазу CP-нарушения в лептонном секторе, если она отлична от нуля,
  - значение угла смешивания  $\theta_{23}$  с определением так называемого октанта.
- ❖ План семинара:
  - NOvA, DUNE и другие эксперименты с похожими задачами.
  - Феномен нейтринных осцилляций.
  - Задачи группы ОИЯИ в обоих проектах.
  - Планы по набору данных и анализу в эксперименте NOvA на 2024-2026 гг.
  - Задачи группы ОИЯИ на этот период в эксперименте DUNE.
- ❖ Семинар проводится в связи с продлением проекта NOvA/DUNE в рамках темы 1099.

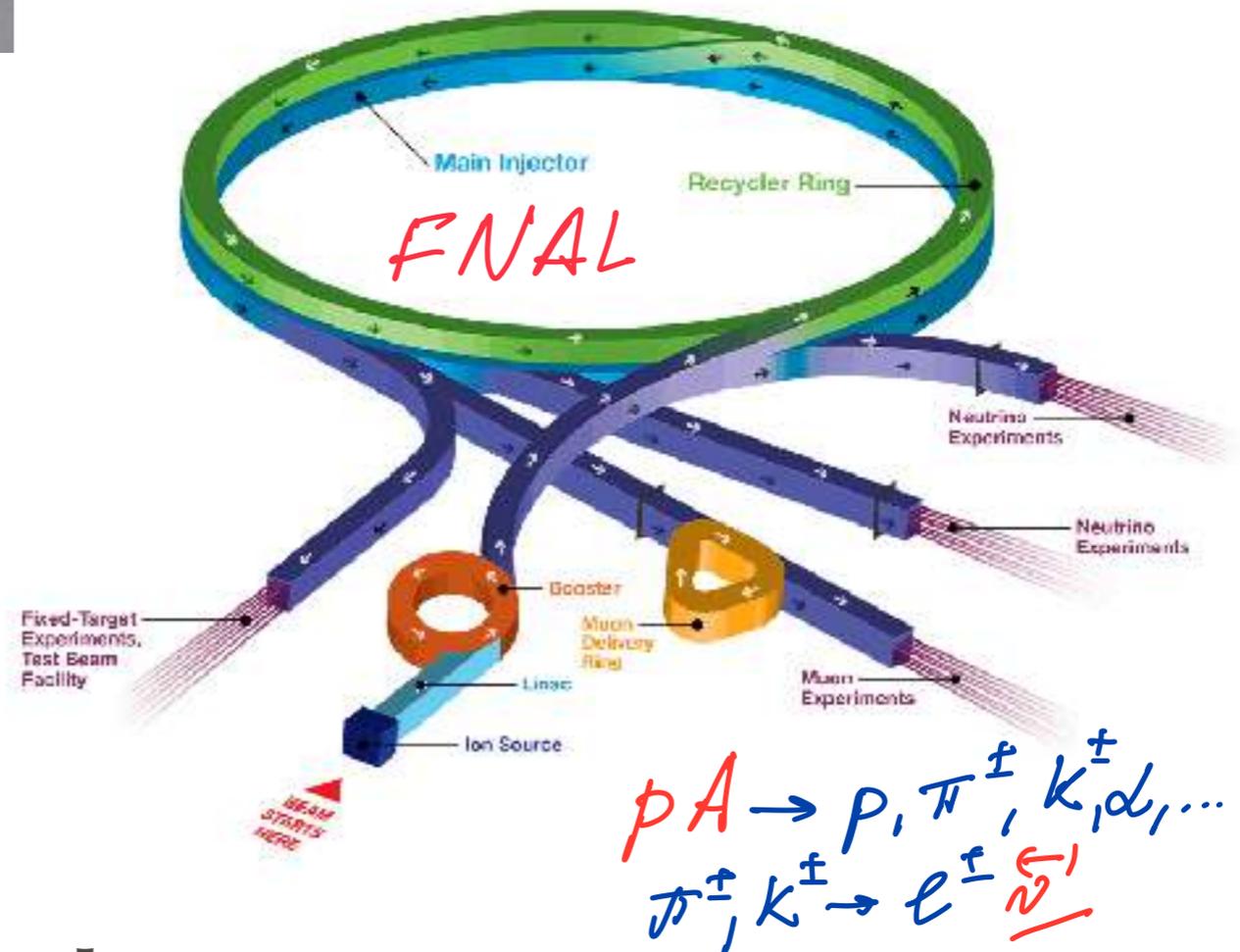
## NuMI Off-Axis $\nu_e$ Appearance Experiment

## NuMI Off-Axis $\nu_e$ Appearance Experiment



Поколения LBNE во FNAL: MINOS → NOvA → DUNE

# Почему ускорители?



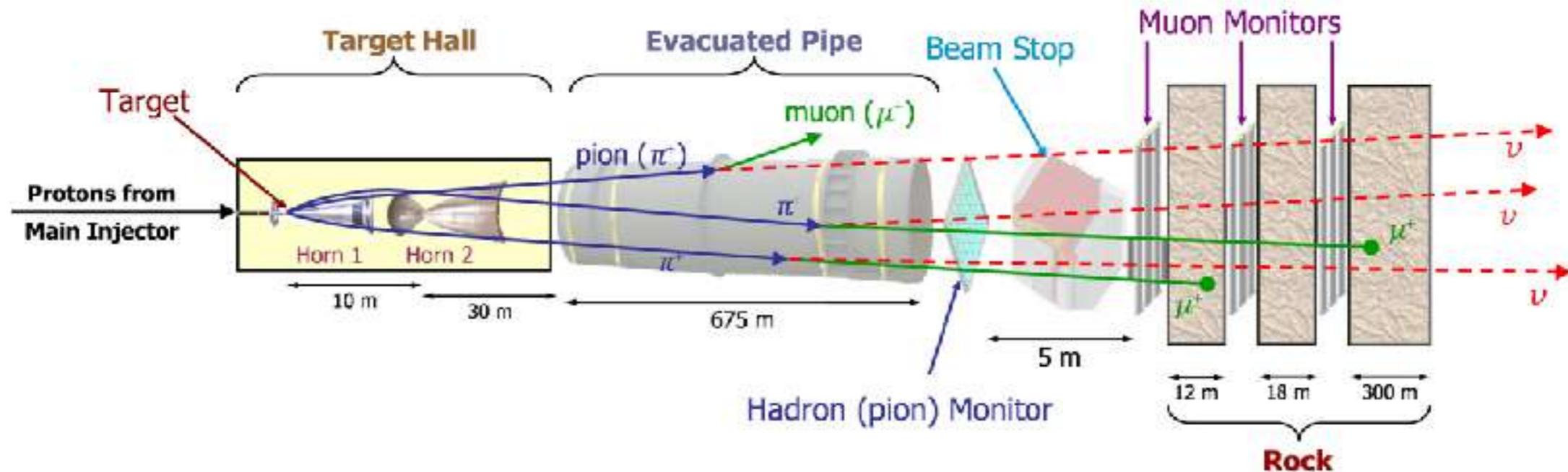
# Ускорительный комплекс в Лаборатории Ферми

- ❖ Нейтрино рождается в Главном Инжекторе (Main Injector, NuMI) протонов в следующей цепочке:
  - Линак 750 кэВ
  - Бустер 400 МэВ
  - Ресайклер 8 ГэВ
  - NuMI 120 ГэВ
  - на углеродную мишень



Пучок протонов для нейтринных экспериментов

# Поток нейтрино



- ❖ Ускоренный пучок протонов (120 ГэВ) сбрасывается на углеродную мишень, рождая мезоны, которые в свою очередь рождают нейтрино (в основном мюонного типа).
- ❖ Каждый 1.3 сек протонный сброс формирует 6+6 батчей нейтрино во временном окне 10 мкс.
- ❖ Первоначальная проектируемая мощность для NOvA составляет 700 кВт, интенсивность  $6 \times 10^{20}$  POT/год. (POT = Proton On Target, протонов-на-мишень).
- ❖ Пиковая мощность достигала 895 кВт 7 июля 2022.
- ❖ Плановая до 2026 года — 900 кВт.

# Осцилляции нейтрино (в вакууме)

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

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

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

# Осцилляции нейтрино (в вакууме)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{e2} & V_{e3} \\ V_{\mu 1} & V_{\mu 2} & V_{\mu 3} \\ V_{\tau 1} & V_{\tau 2} & V_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$H = U E U^\dagger$$

# Осцилляции нейтрино (~~в вакууме~~)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{e2} & V_{e3} \\ V_{\mu 1} & V_{\mu 2} & V_{\mu 3} \\ V_{\tau 1} & V_{\tau 2} & V_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

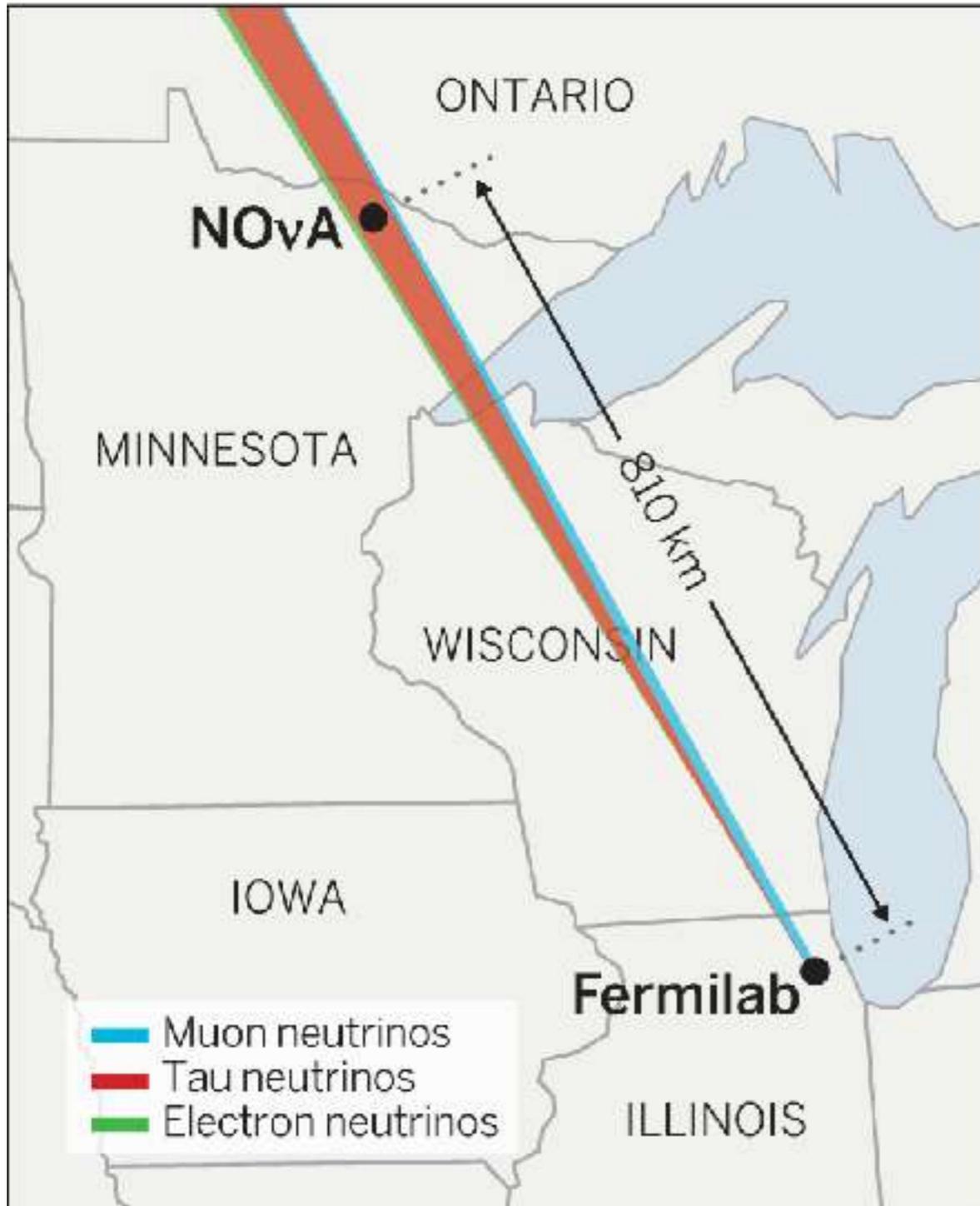
$$H_0 = U E_0 U^\dagger \Rightarrow H = H_0 + H_{\text{вещество}} + H_{\text{NSI}}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{e2} & V_{e3} \\ V_{\mu 1} & V_{\mu 2} & V_{\mu 3} \\ V_{\tau 1} & V_{\tau 2} & V_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{e2} & V_{e3} & V_{e4} \\ V_{\mu 1} & V_{\mu 2} & V_{\mu 3} & V_{\mu 4} \\ V_{\tau 1} & V_{\tau 2} & V_{\tau 3} & V_{\tau 4} \\ V_{s1} & V_{s2} & V_{s3} & V_{s4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \end{pmatrix}$$

# NOvA



## The NuMI Off-Axis $\nu_e$ Appearance Experiment

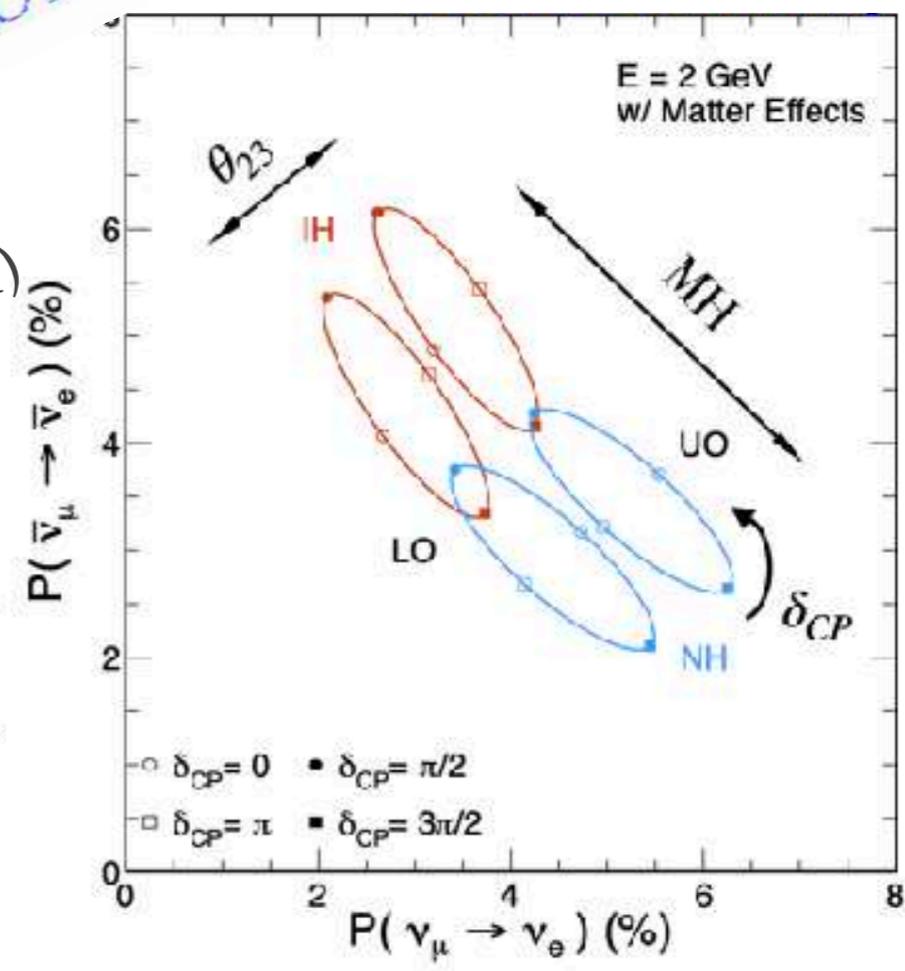
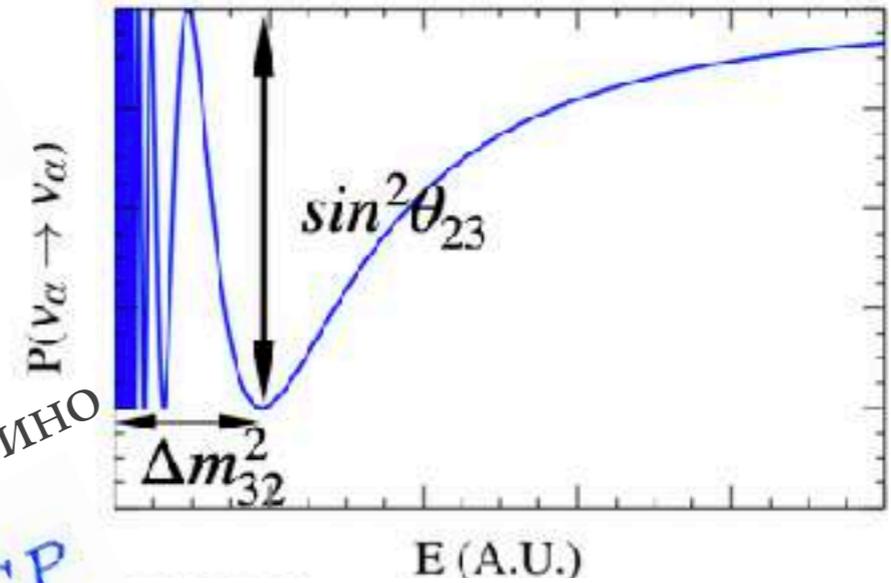
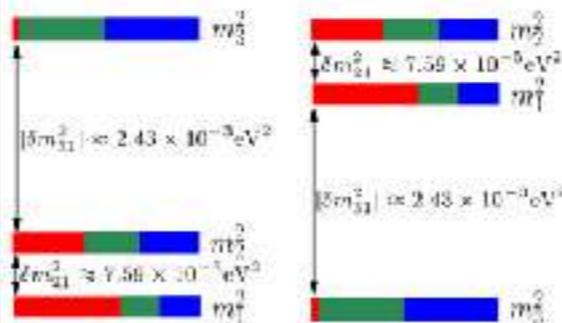


Мода выживания  
мюонного нейтрино

Мода появления  
электронного нейтрино

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

Иерархия масс  
Mass Hierarchy  
(прямая / обратная)



# NOvA



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

# Схема работы с двумя детекторами



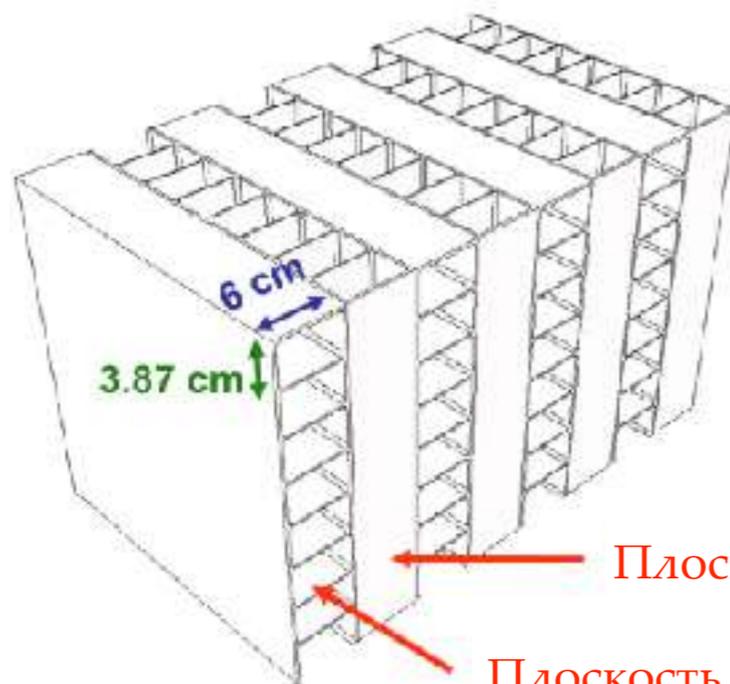
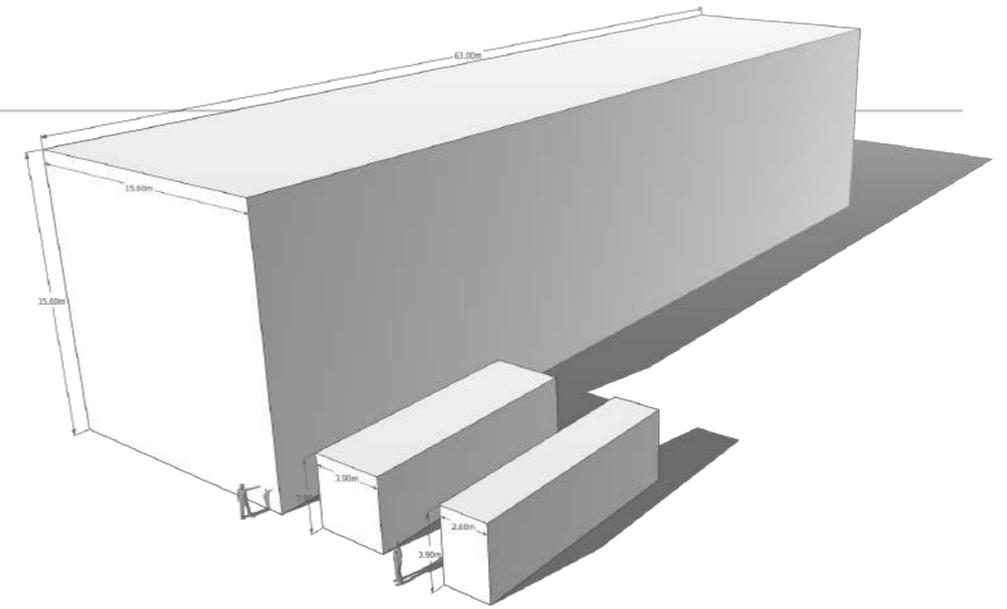
- ❖ **Ближний детектор**
- ➔ расположен в 1 км после пучковой мишени, вес 300 тонн.
- ➔ выполняет роль монитора и измеряет неосцилляционный спектр пучка
- ➔ данные БД используются для предсказания числа событий в ДД (процедура экстраполяции)



- ❖ **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

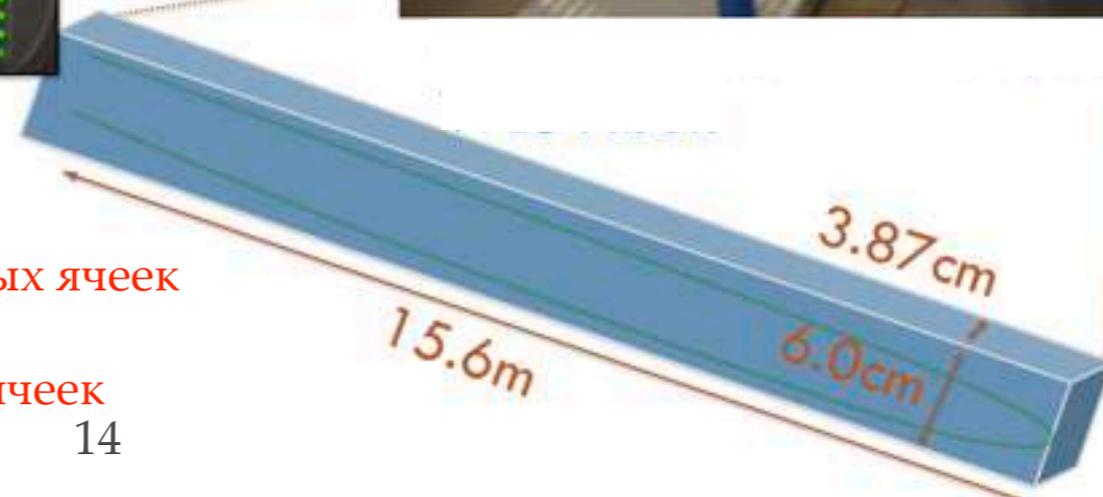
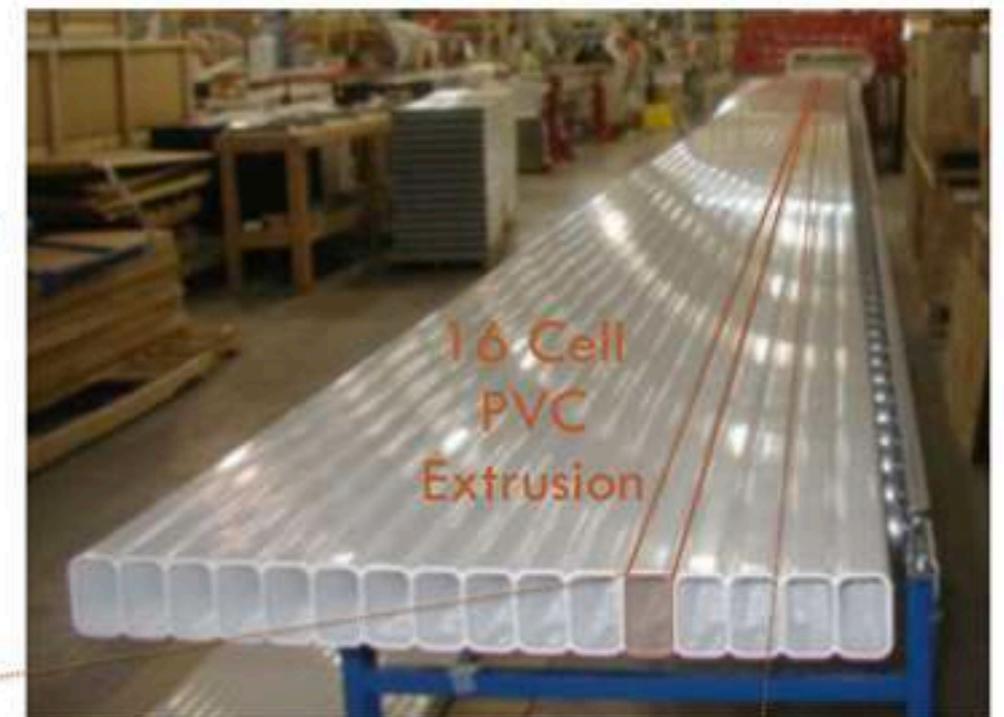
# Детекторы NOvA

- ❖ ПВХ экструзия,  $\text{TiO}_2$  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.



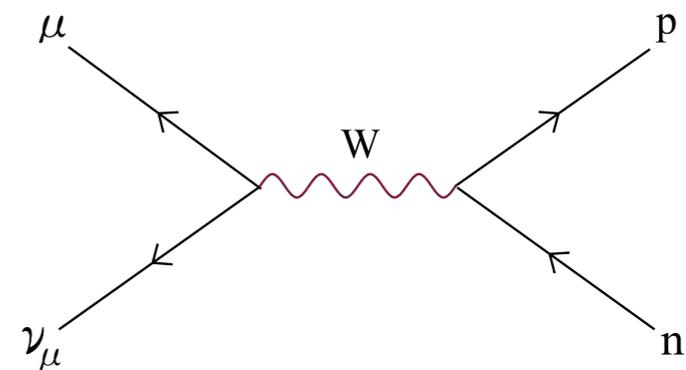
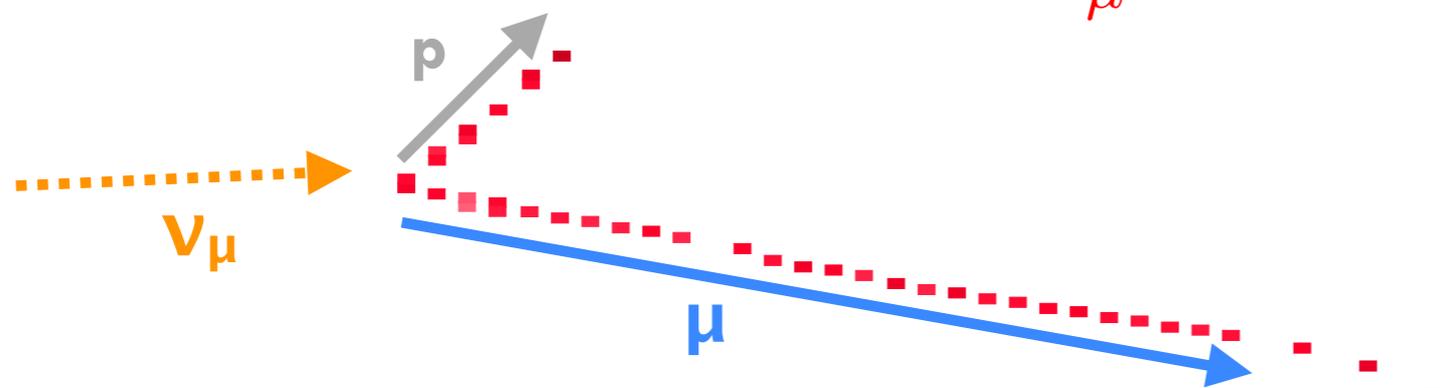
← Плоскость вертикальных ячеек

← Плоскость горизонтальных ячеек

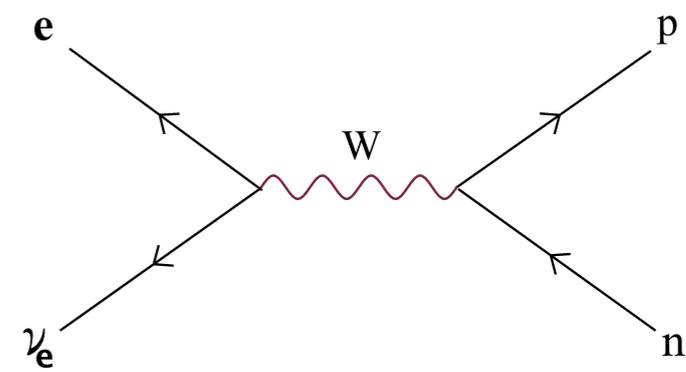
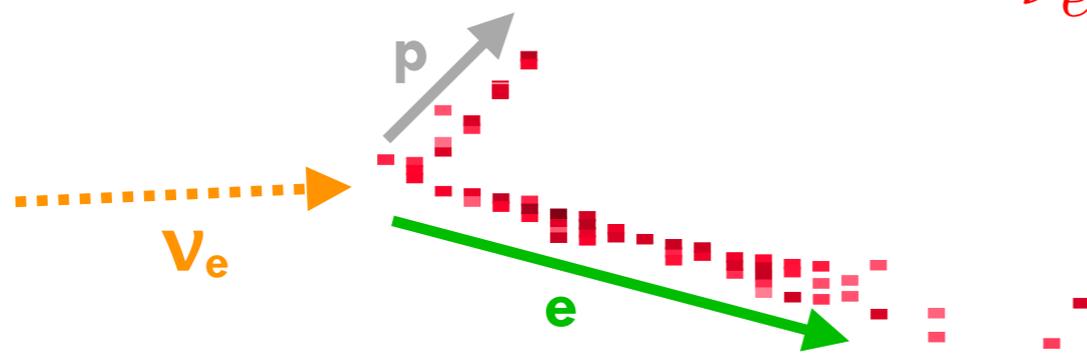


# Топология событий

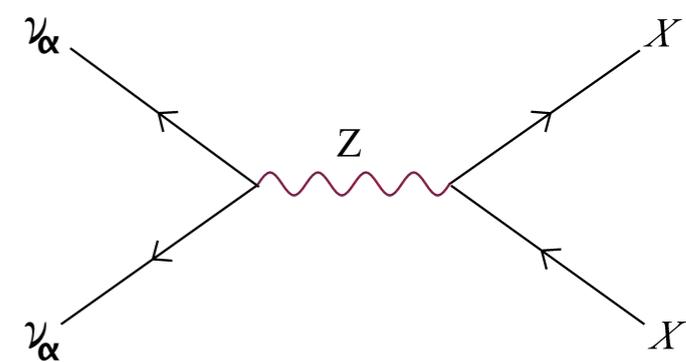
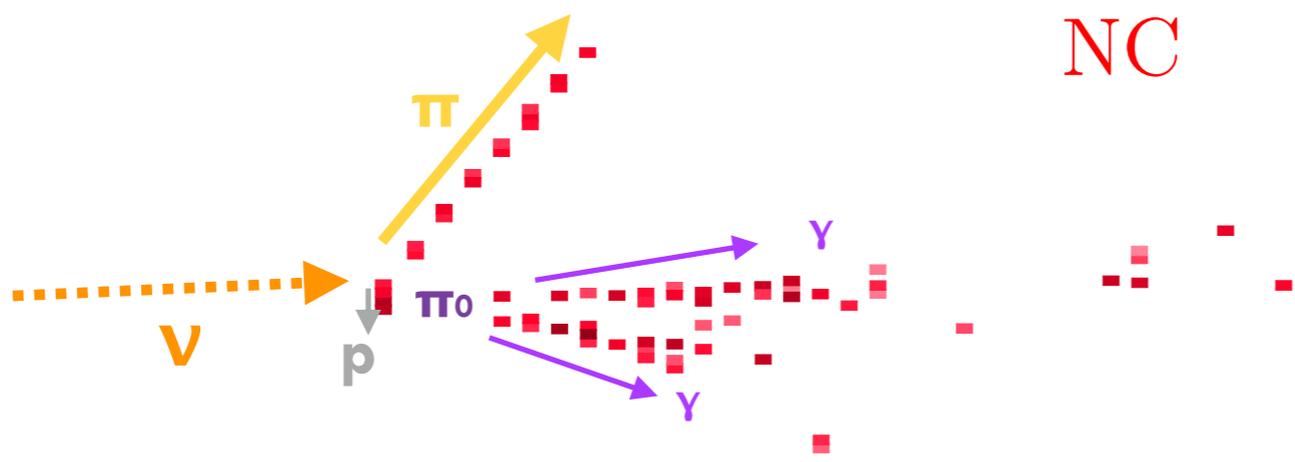
## $\nu_\mu CC$



## $\nu_e CC$



## NC



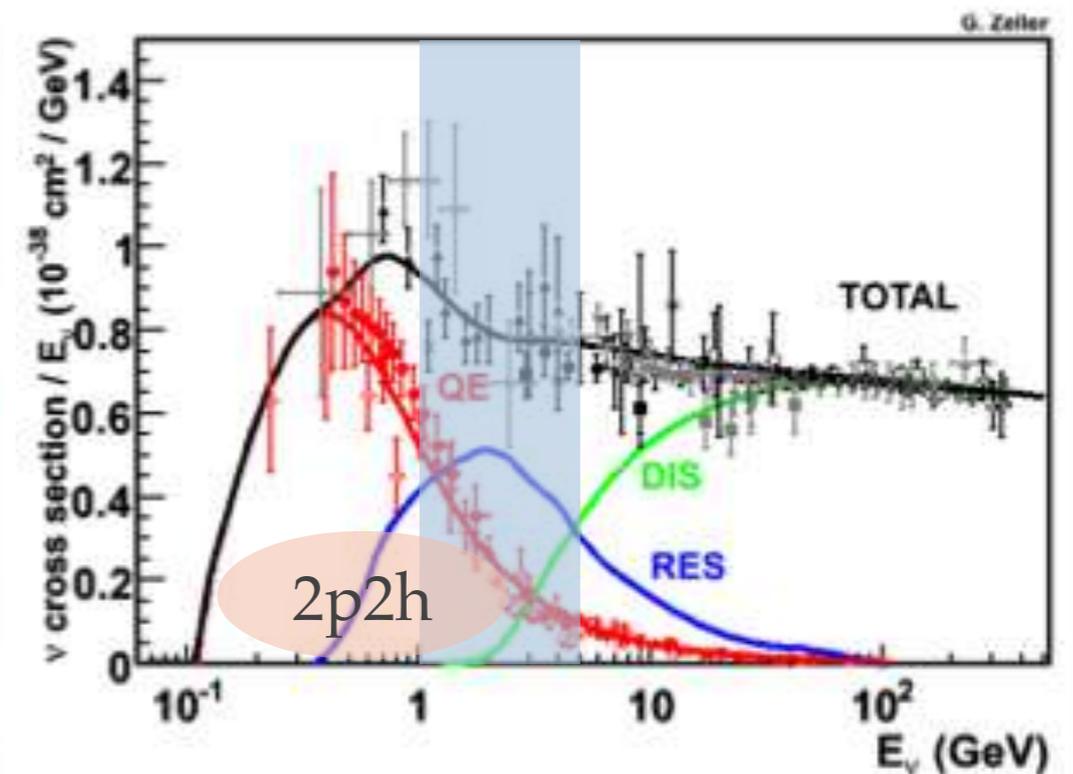
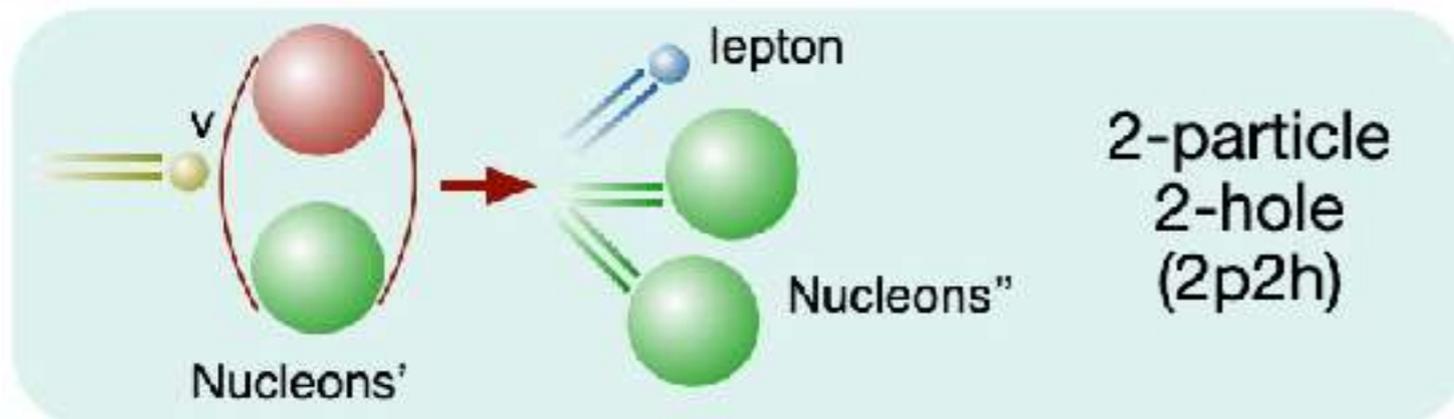
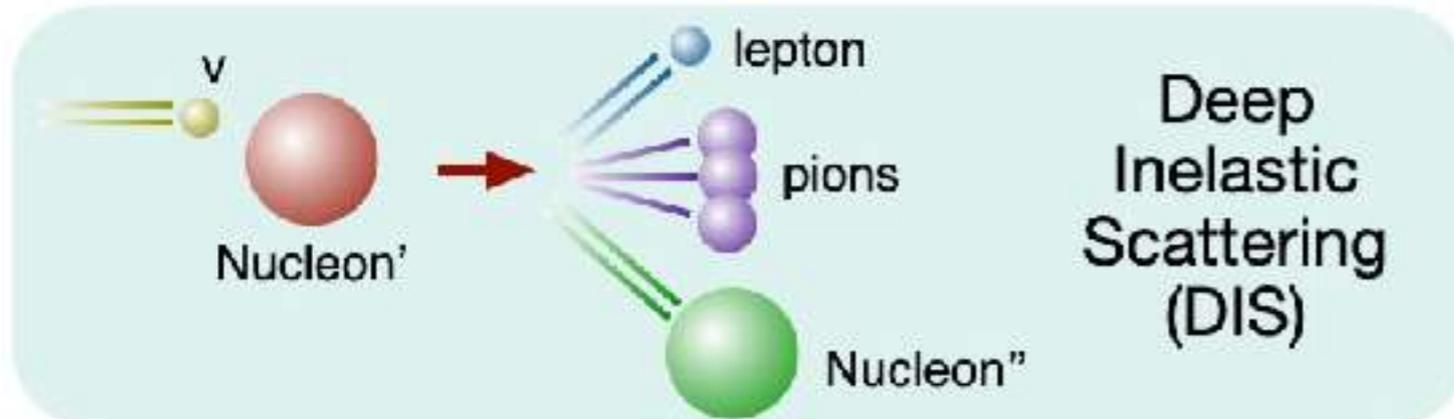
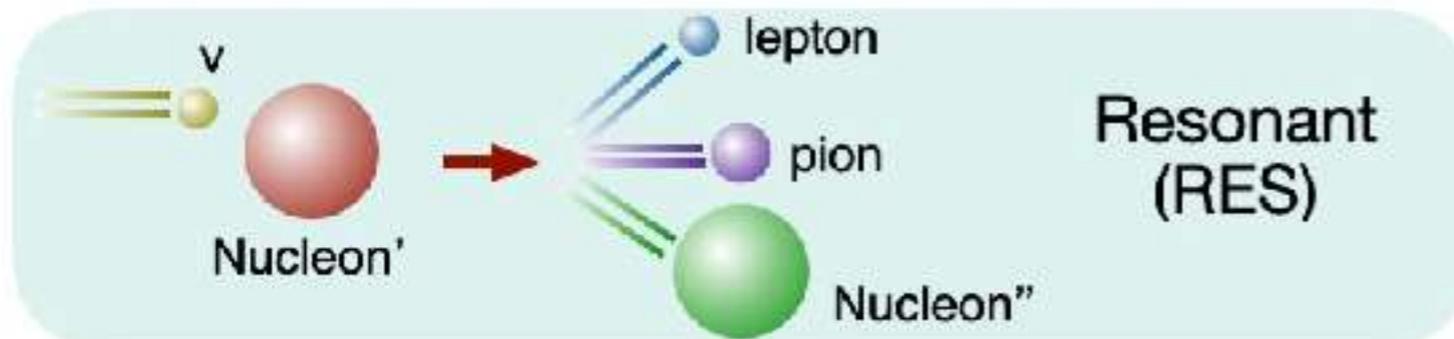
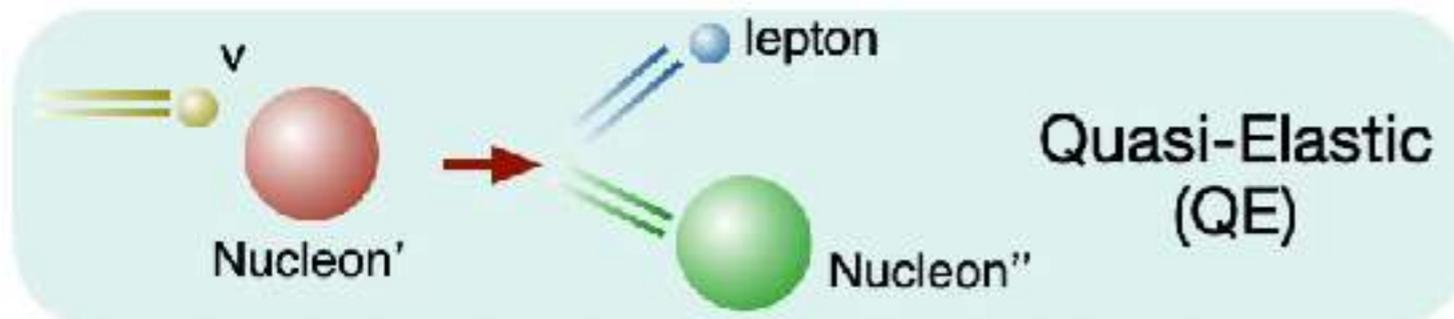
1m

1m

15

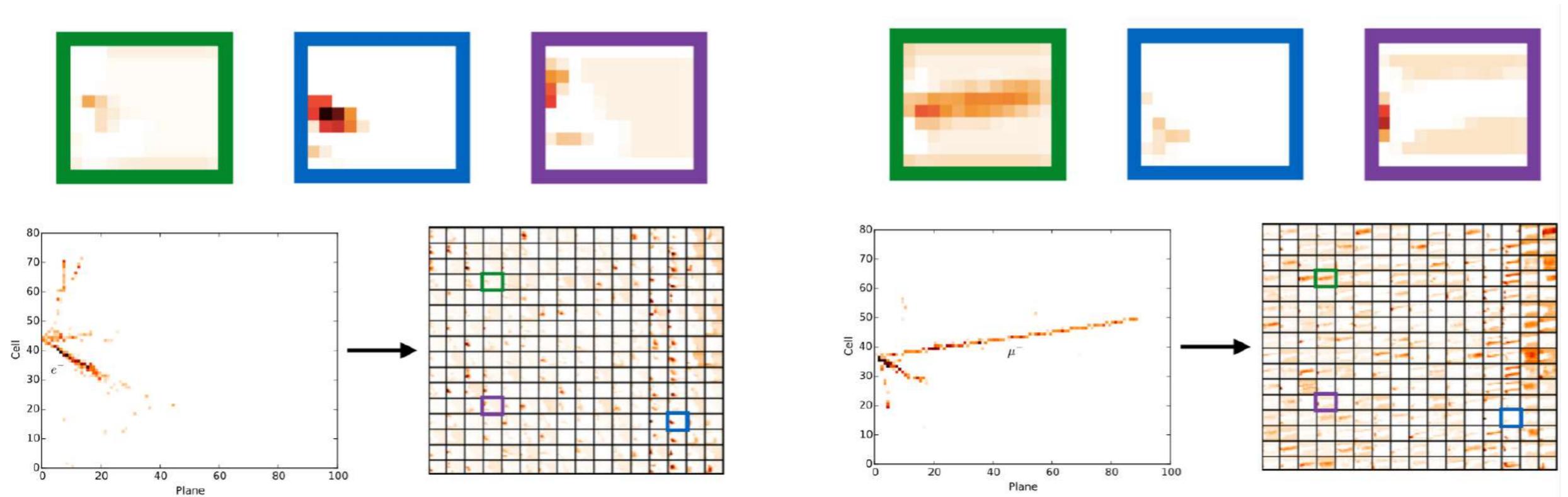
10 10<sup>2</sup> 10<sup>3</sup> q (ADC)

# Нейтринные взаимодействия



- ❖ Все типы нейтринных взаимодействий в области исследования.
- ❖ Измерение сечений важно для уменьшения систематических неопределенностей осцилляционного анализа.

# Отбор событий при помощи CVN



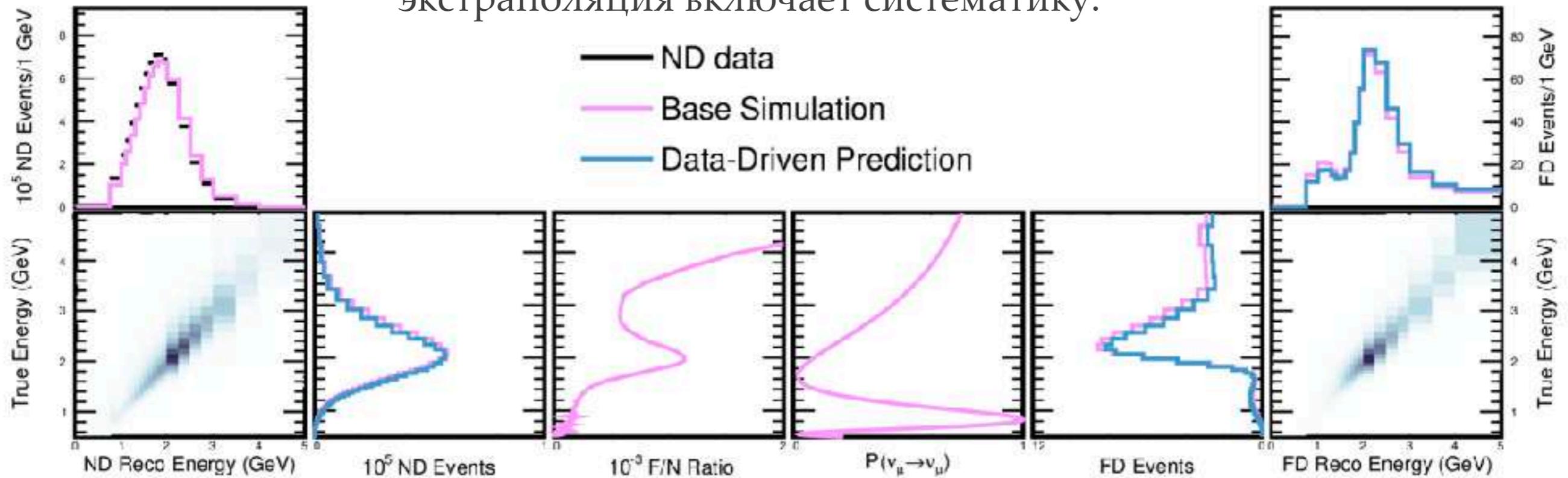
$\nu_e$  событие

$\nu_\mu$  событие

- ❖ 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:  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ , атмосферные мюоны, нейтральные токи, ...
- A. Aurisano et. al, JINST 11, P09001 (2016)

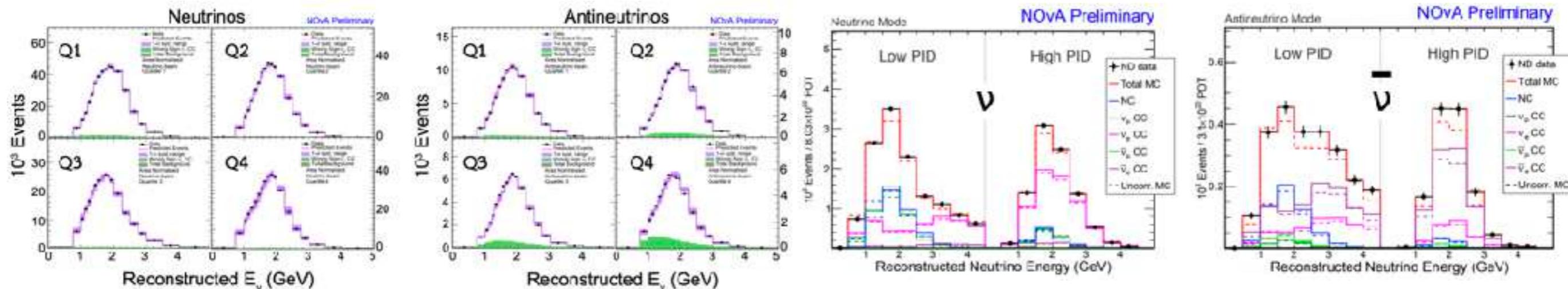
# Предсказание событий в ДД

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

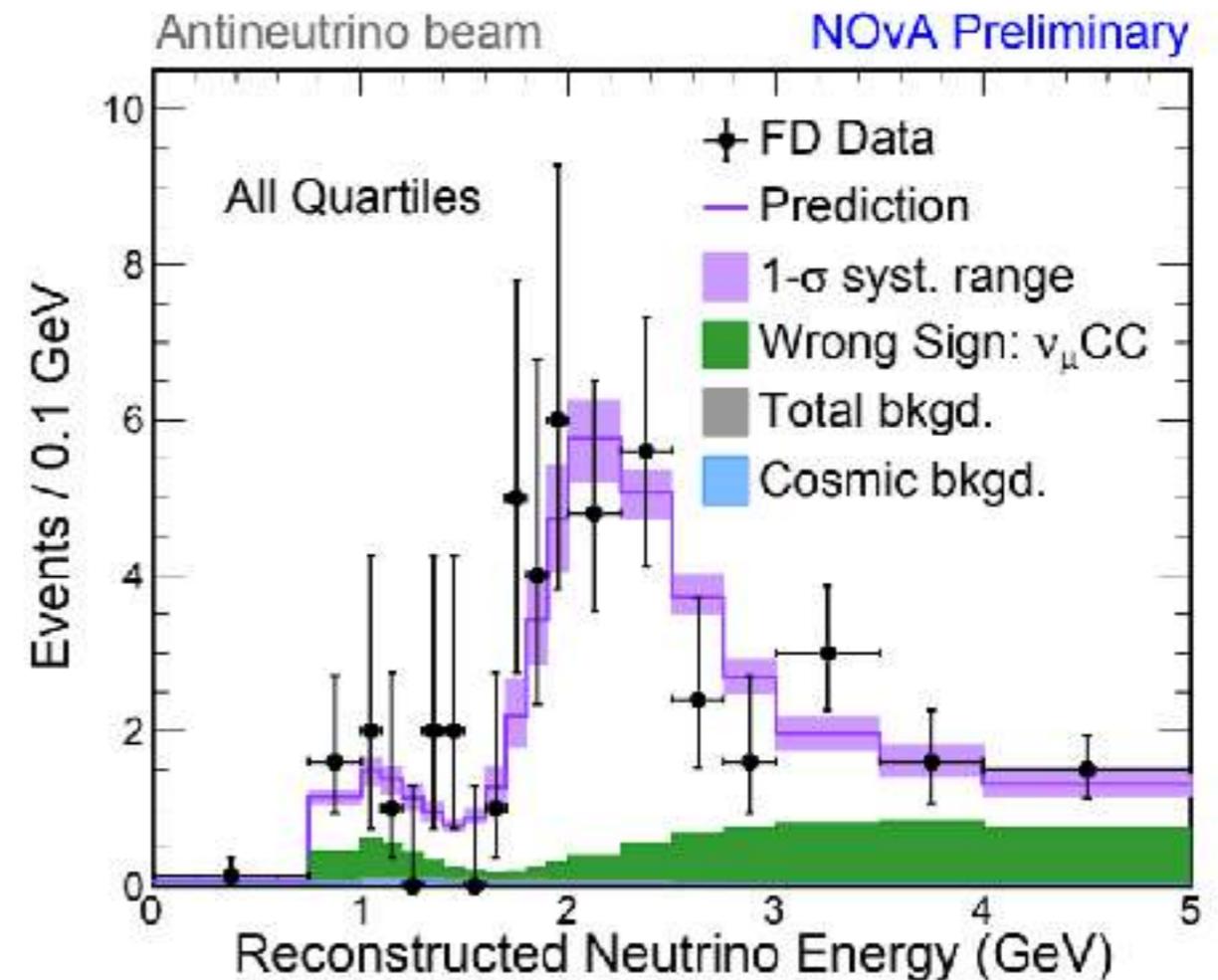
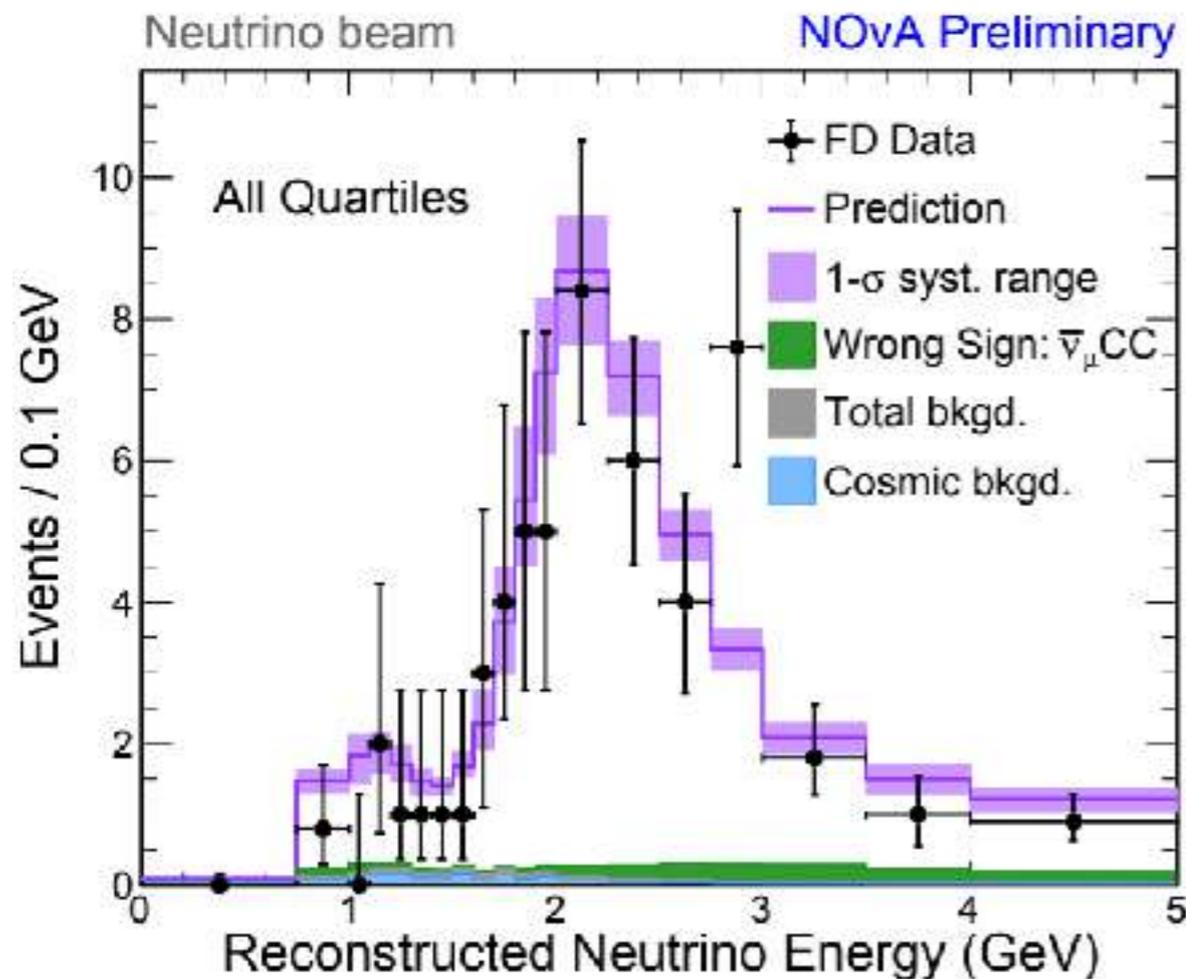


Данные БД для  $\nu_\mu$  (разделены по разрешению)

Данные БД для  $\nu_e$  (только фон)



# Результат 2020 $\nu_\mu$ в дальнем детекторе



$\nu_\mu$  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

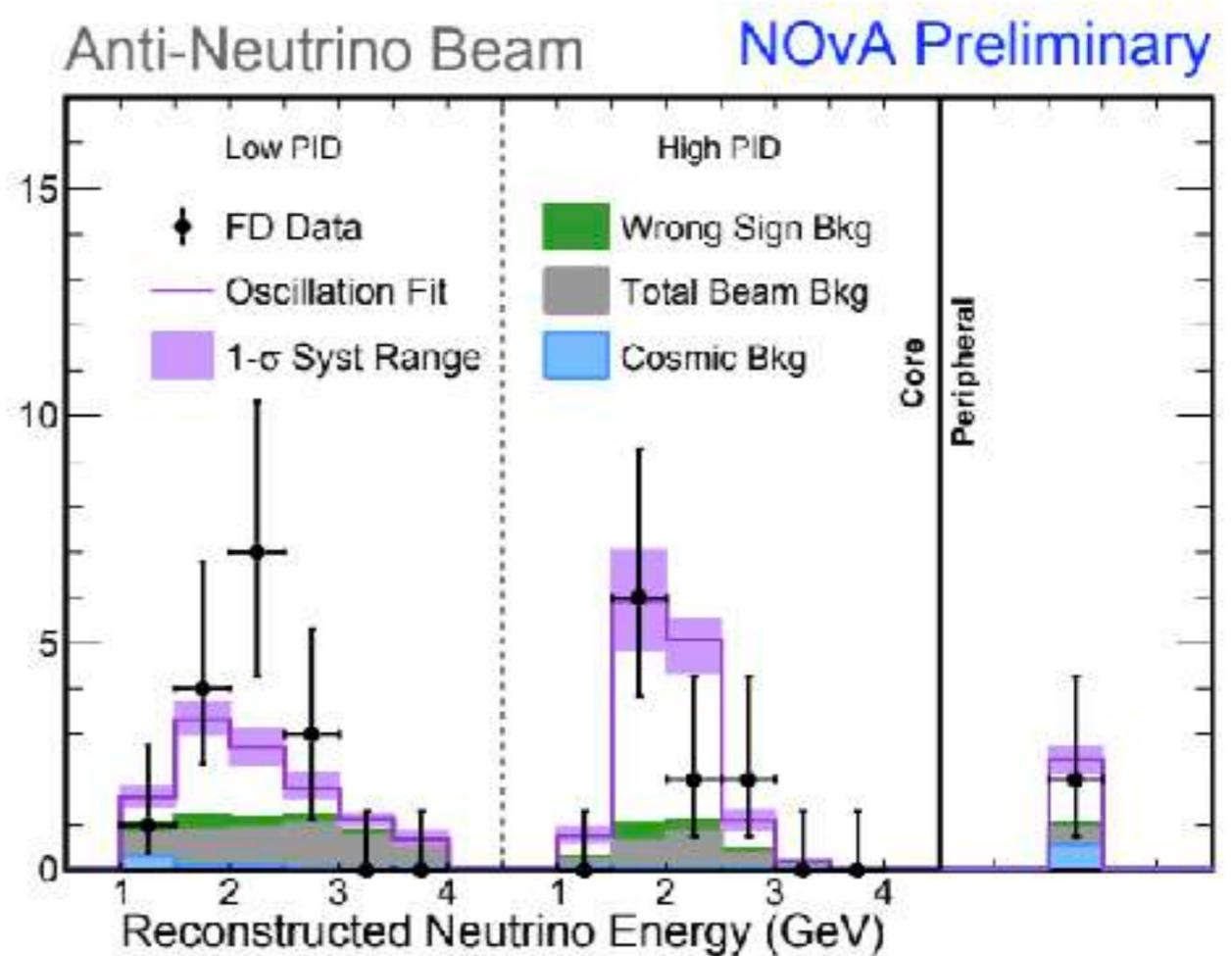
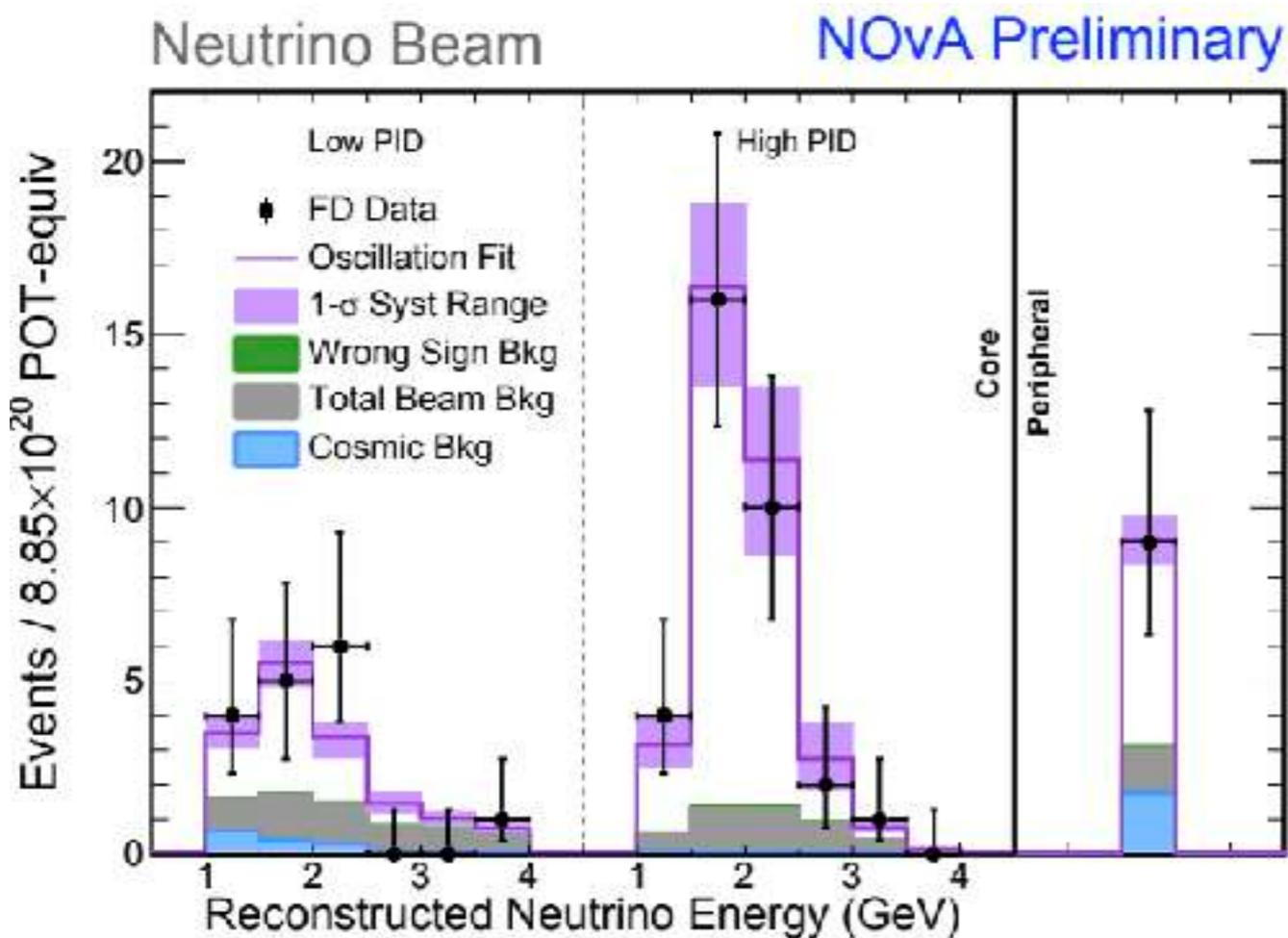
Суммарный фон 2.2

➔ атмосферные мюоны 0.8

➔ пучок 1.4

19 Предсказание без осцилляций 476

# Результат 2020 $\nu_e$ в дальнем детекторе



$\nu_e$  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

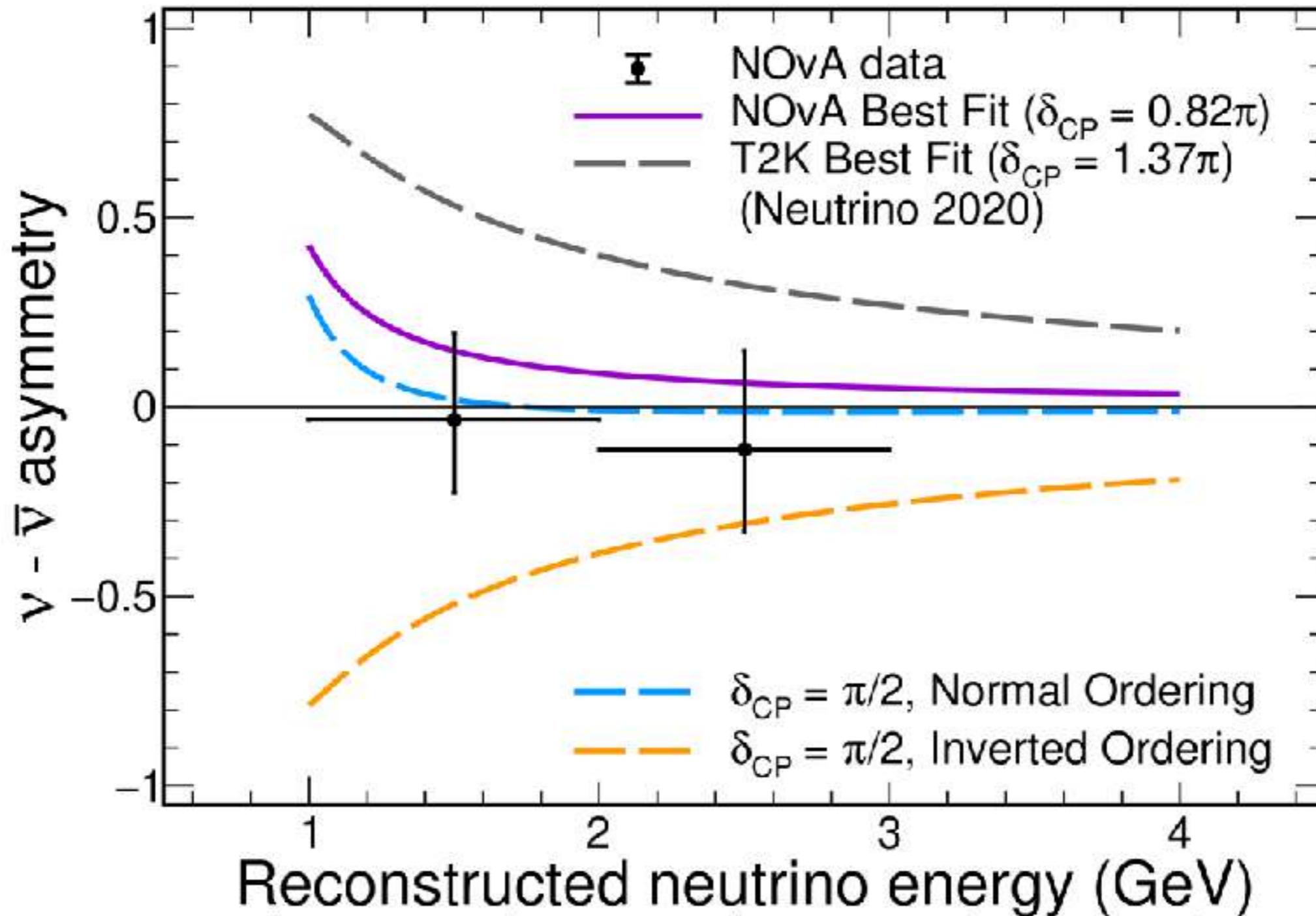
Суммарный фон 10.3

➔ атмосферные мюоны 1.1

➔ пучок 7.0

➔ “обратный знак” ( $\nu_e$ ) 2.2

# Асимметрия $\mathcal{P}(\nu_e) - \mathcal{P}(\bar{\nu}_e) / \mathcal{P}(\nu_e) + \mathcal{P}(\bar{\nu}_e)$



На 25% согласуется с нулем.

# Альтернативный статистический подход

❖ Байесовский анализ согласуется с фриквентистским.

❖ Лучший фит:

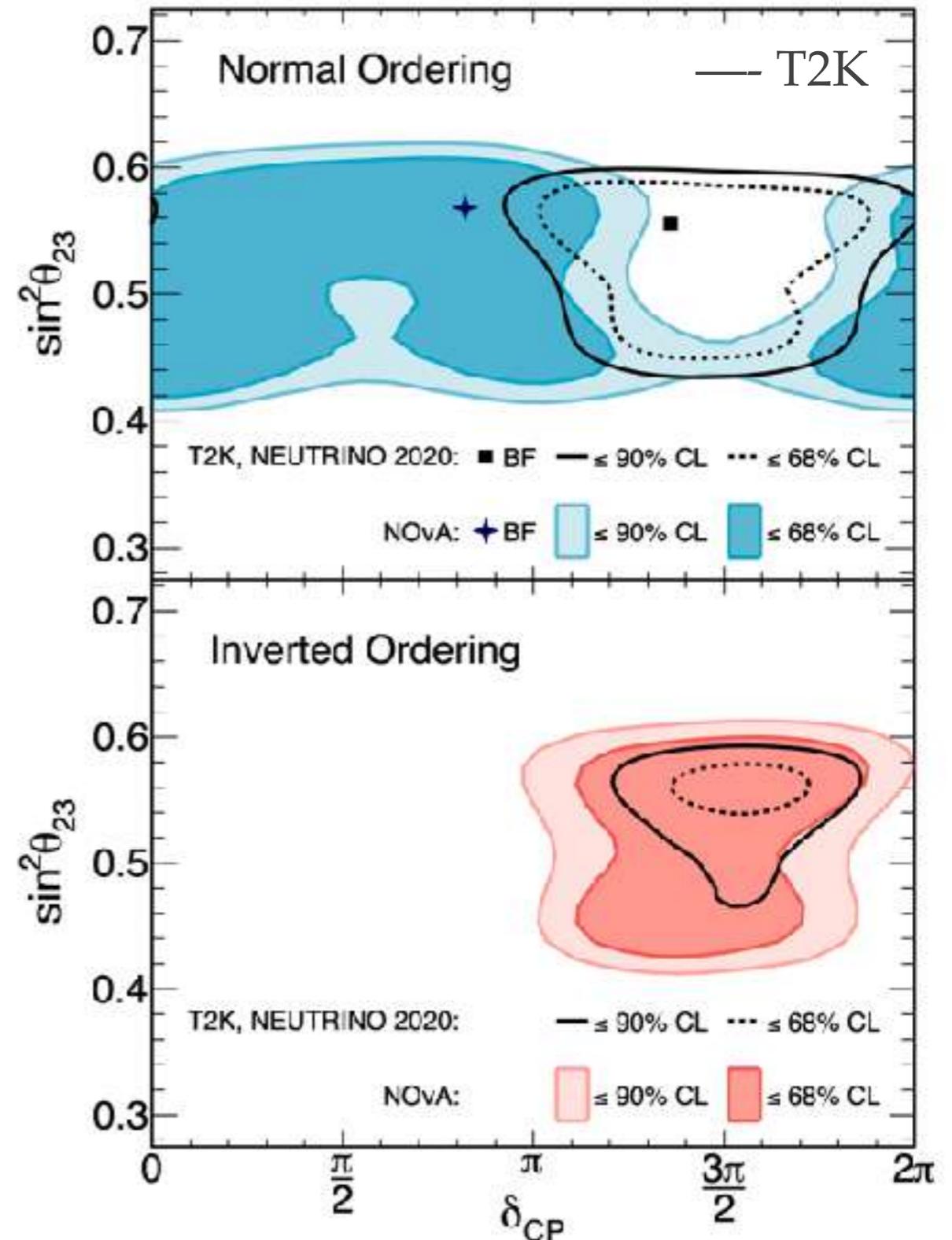
$$\Delta m_{3L}^2 = (2.41 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.57^{+0.04}_{-0.03}$$

$$\delta = 0.82 \pi$$

Нормальная иерархия

❖ Прогресс с совместным анализом NOvA+T2K.



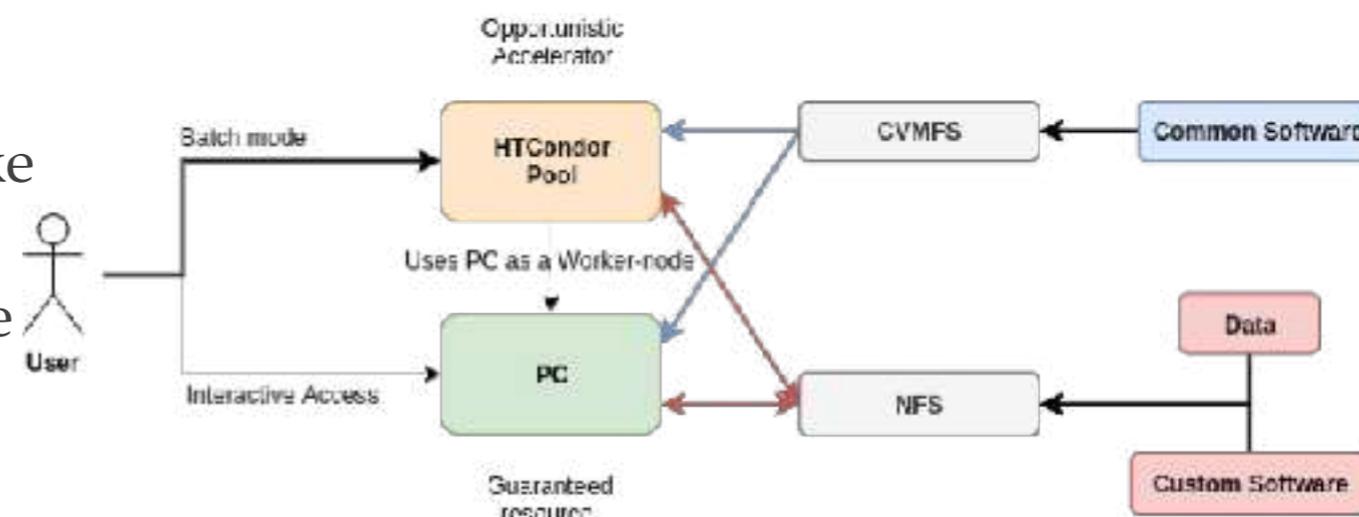
# Будущее

---

- ❖ Набор данных планируется до 2026 года:
  - 50 : 50 нейтрино и антинейтрино
  - Представленная статистика составляет ~30%
- ❖ На основе текущих результатов ожидается:
  - до  $4 \sigma$  чувствительности к иерархии масс
  - $>2 \sigma$  чувствительности к CP нарушению
- ❖ Совместный анализ с результатами T2K.

# 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 участвуют в разработке программного обеспечения и анализе данных NOvA, используя вычислительные возможности Института и поддержку сотрудников ЛИТ.



# NOVA-ВЦЫ В “КОНТРОЛ-РУМЕ” ROC-Dubna

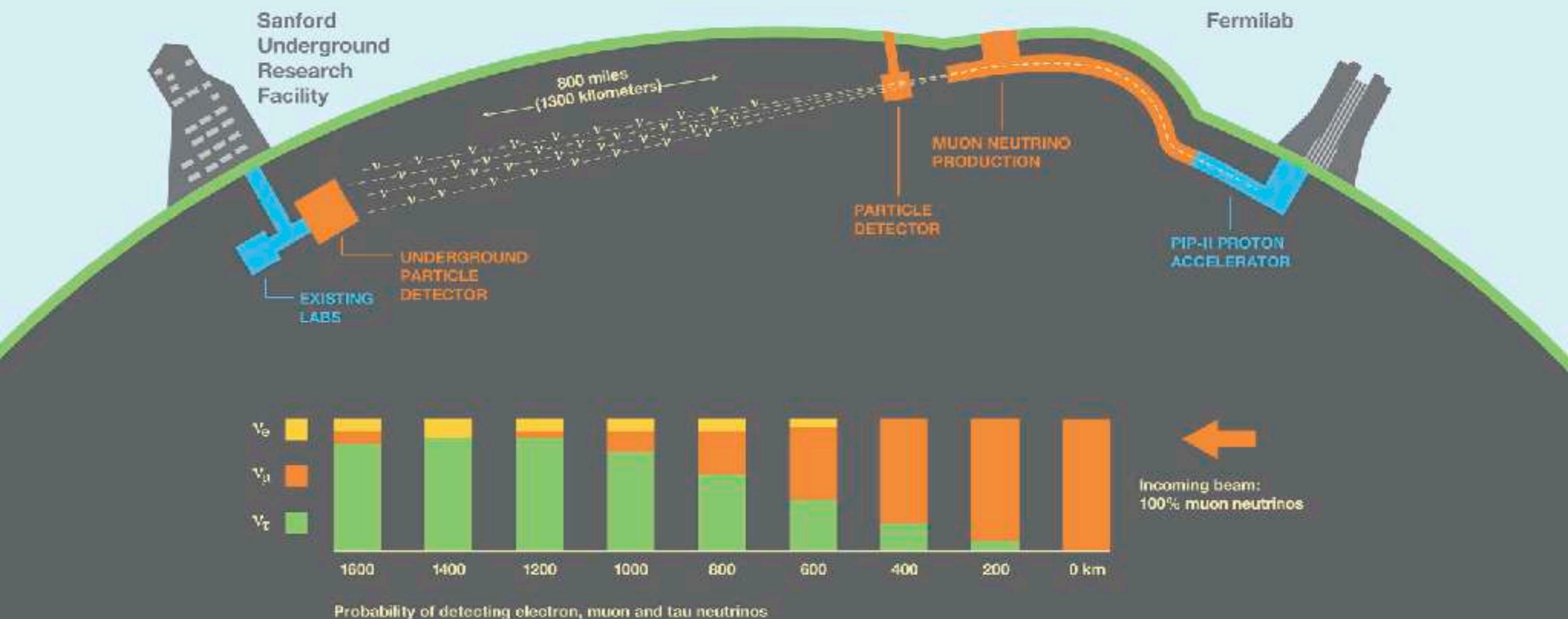


# Люди из ОИЯИ

- **Людмила Колупаева** – работает над основным осцилляционным анализом в группе “3flavor”, является со-координатором группы продакшн, вовлечена в работу группы GNA ЛЯП ОИЯИ, а также группе совместного осцилляционного анализа NOvA-T2K.
- **Анастасия Калиткина** – работает над основным осцилляционным анализом в группе “3flavor”.
- **Андрей Шешуков** – разработал, протестировал и запустил систему детектирования сигнала от вспышек сверхновых в нашей Галактике, ждем сигнала! Конвинер одной из групп в SNEWS. Готовится защищать кандидатскую диссертацию в 2023 году.
- **Никита Балашов и облачная группа ЛИТ** – работает над ИТ-поддержкой эксперимента NOvA (в основном на базе “Облаков” ЛИТ), контакт ОИЯИ и Фермилаба (группы FIFE).
- **Игорь Какорин и теоретическая группа ЛТФ** – включили модель сечения взаимодействия с бегущей MA(run) в нейтринный генератор GENIE.
- **Николай Анфимов и Александр Антошкин** – создали два измерительных стенда для отдельных компонентов детекторов NOvA (работа электроники, отклик сцинтиллятора). Работа востребована в коллаборации.
- **Александр Антошкин** занимается поиском медленных магнитных монополей в дальнем детекторе NOvA.
- **Олег Самойлов** – со-координатор рабочей группы Экзотических анализов.
- **Ольга Петрова, Анна Морозова, Александра Иванова** проводят анализы потоков атмосферных мюонов и нейтрино.

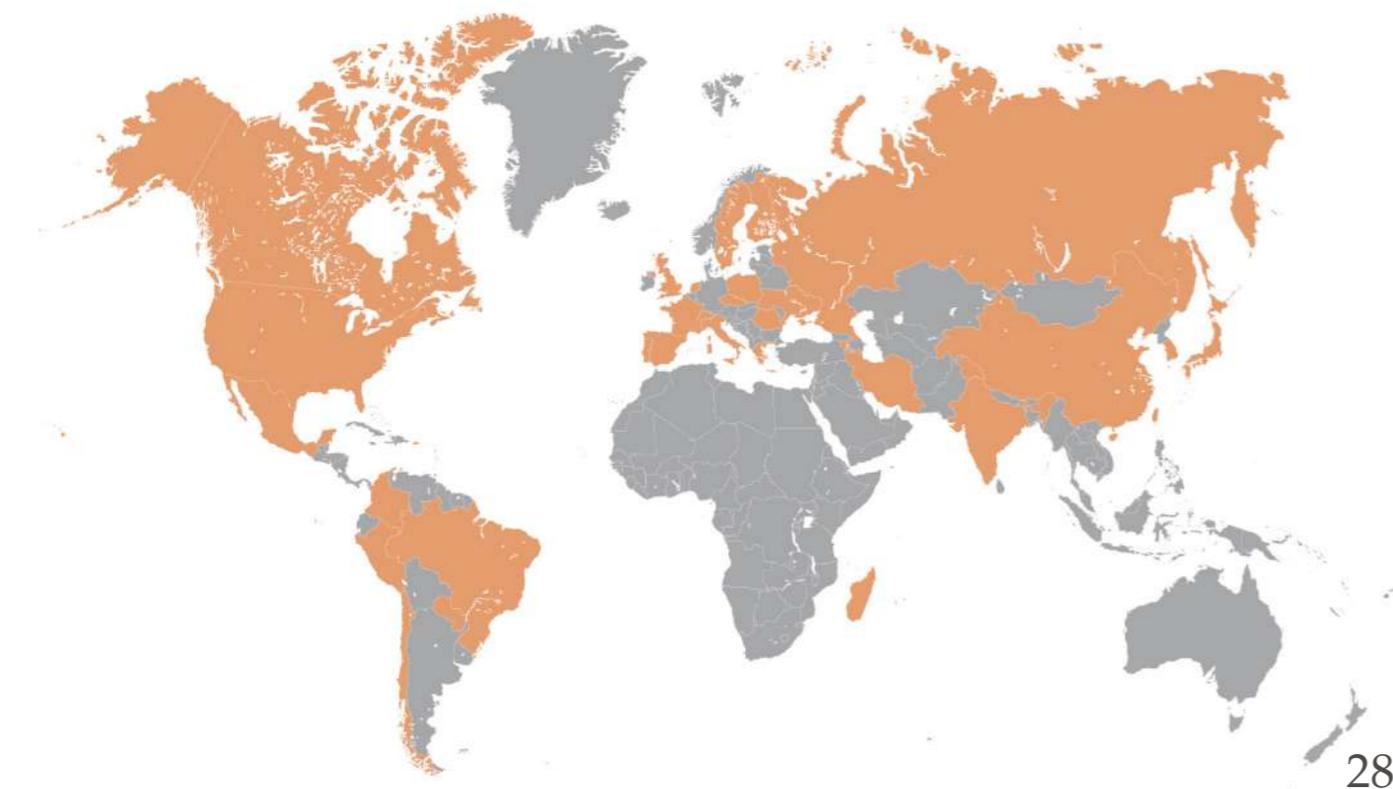
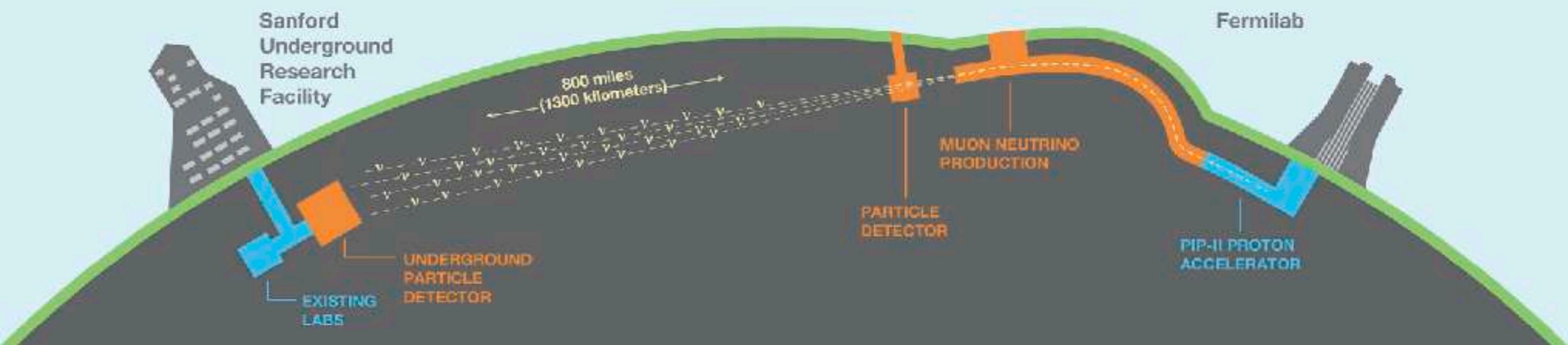
# Эксперимент DUNE

## Deep Underground Neutrino Experiment



# Эксперимент DUNE

## Deep Underground Neutrino Experiment



- ❖ Коллаборация DUNE:
  - >1300 участников
  - >120 организаций
  - 37 стран + ЦЕРН
- ❖ ОИЯИ официально участвует с мая 2020 года.

# DUNE Collaboration



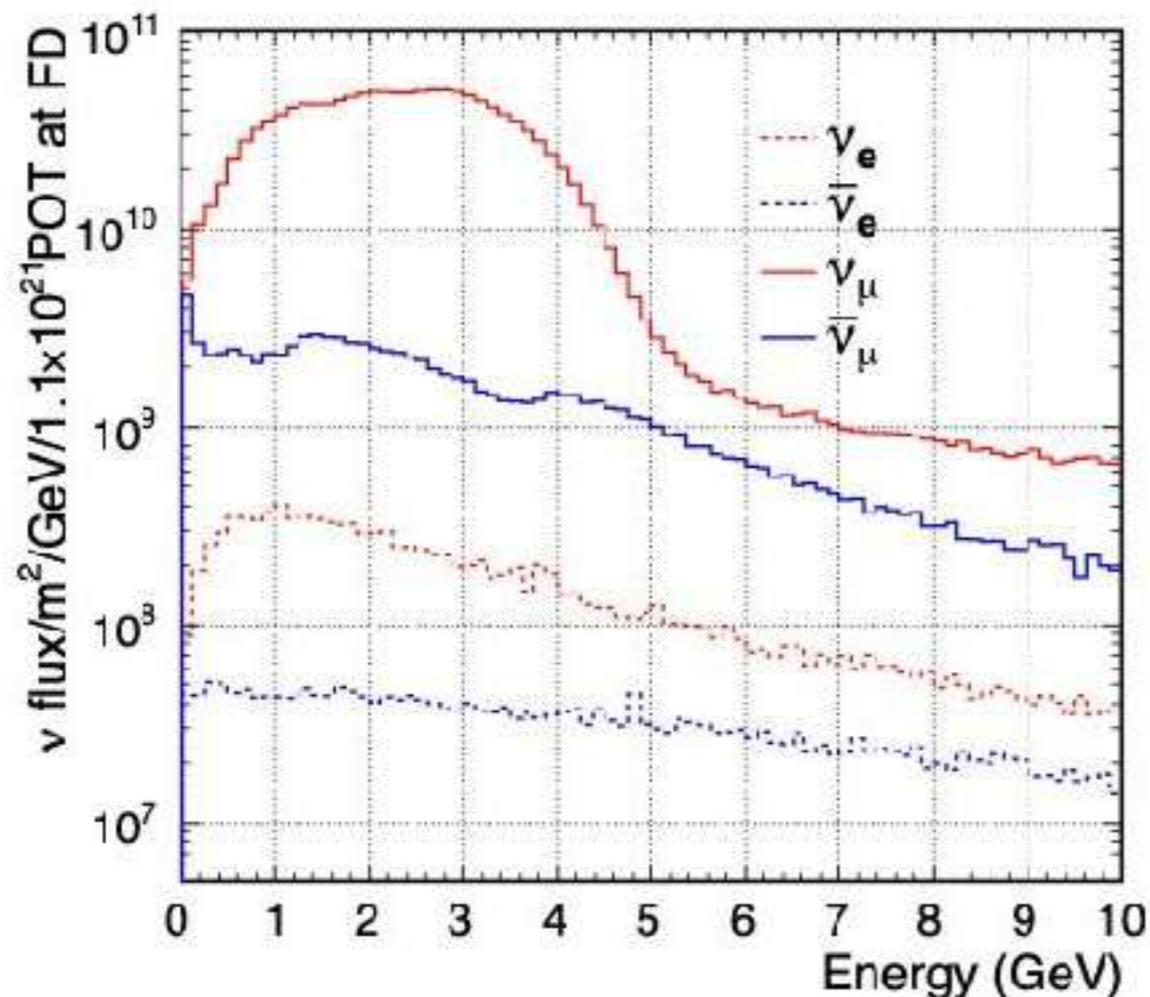
Коллаборационное совещание DUNE 23-27 января 2023 в ЦЕРН

# Основные задачи DUNE

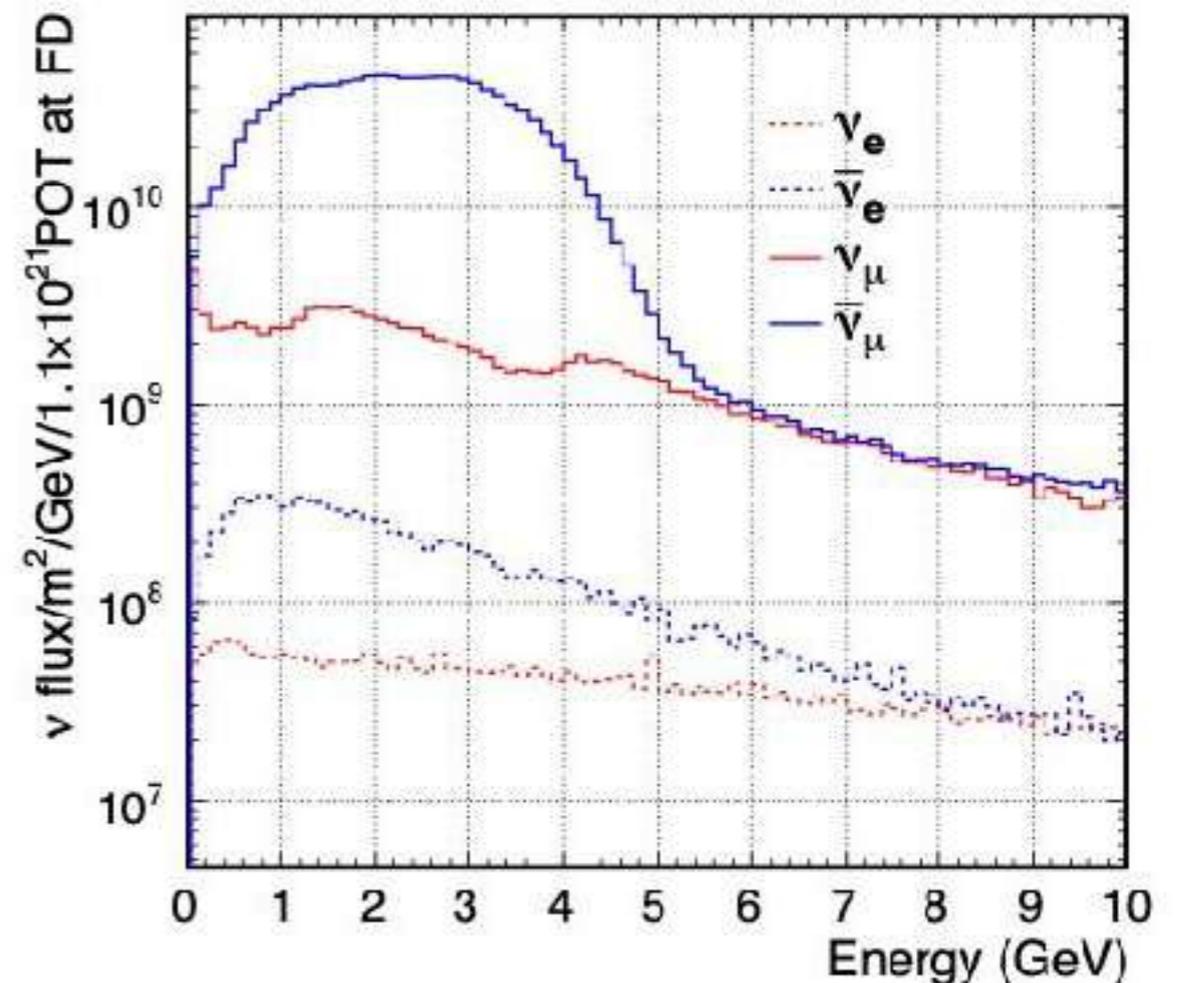
- ❖ Измерение неизвестных параметров нейтринных осцилляций:
  - иерархия масс нейтрино,
  - фаза CP-нарушения в лептонном секторе, если она отлична от нуля,
  - значение угла смешивания  $\theta_{23}$  с определением так называемого октанта.
- ❖ Детектирование МэВ-ных нейтрино, например, от вспышек Сверхновых звёзд.
- ❖ Низкофоновые измерения, такие как поиски тёмной материи и обнаружения физики за рамками Стандартной модели.

# Нейтринный пучок

- ❖ Обновленный ускорительный комплекс NuMI будет обеспечивать мощность 1.2 МВт (Phase I) и затем планируется увеличить до 2.4 МВт (Phase II).
- ❖ Широкий спектр нейтрино и антинейтрино в диапазоне 0-5 ГэВ.
- ❖ Ожидаемые спектры в дальнем детекторе приведены ниже (моделирование).

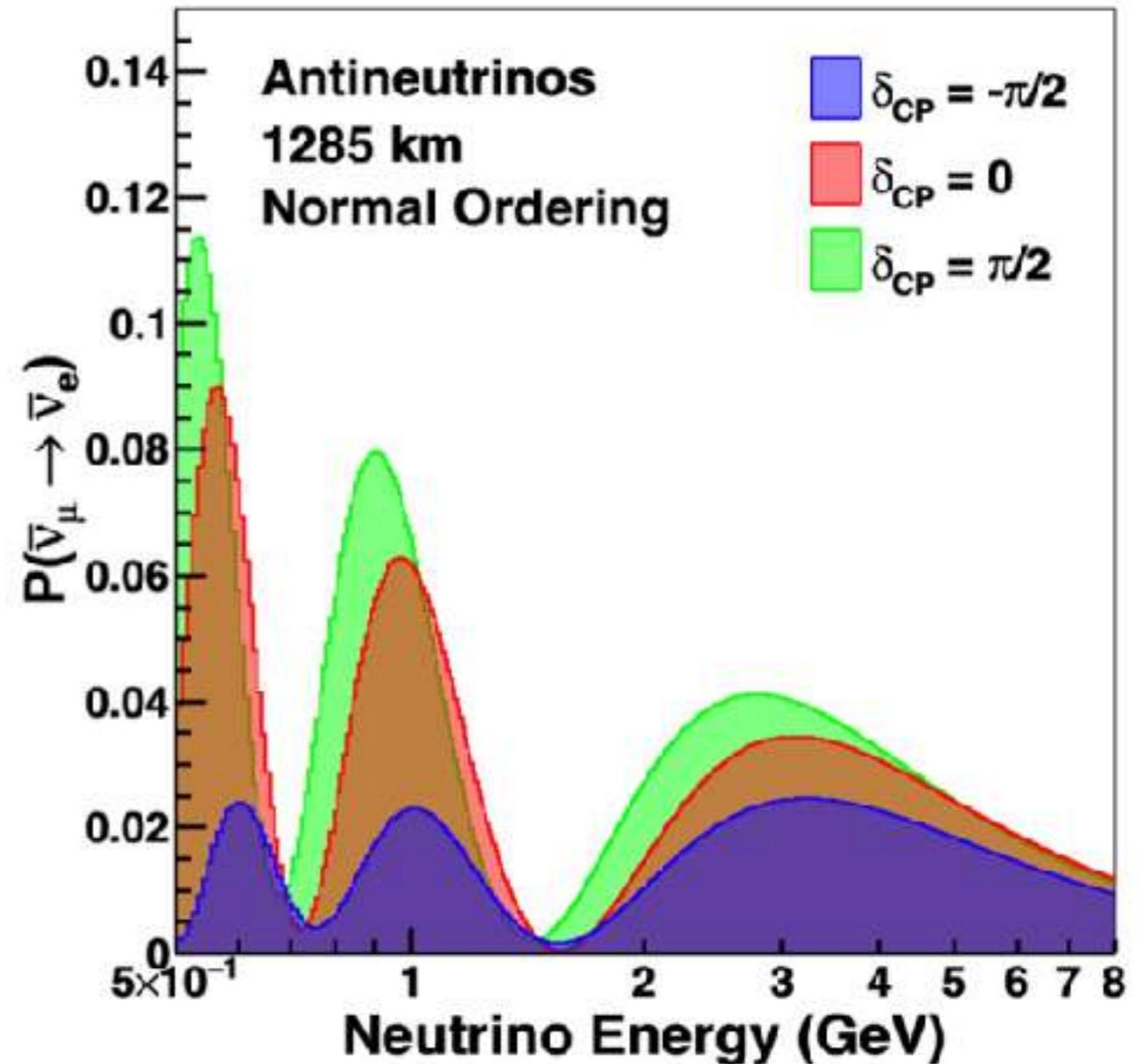
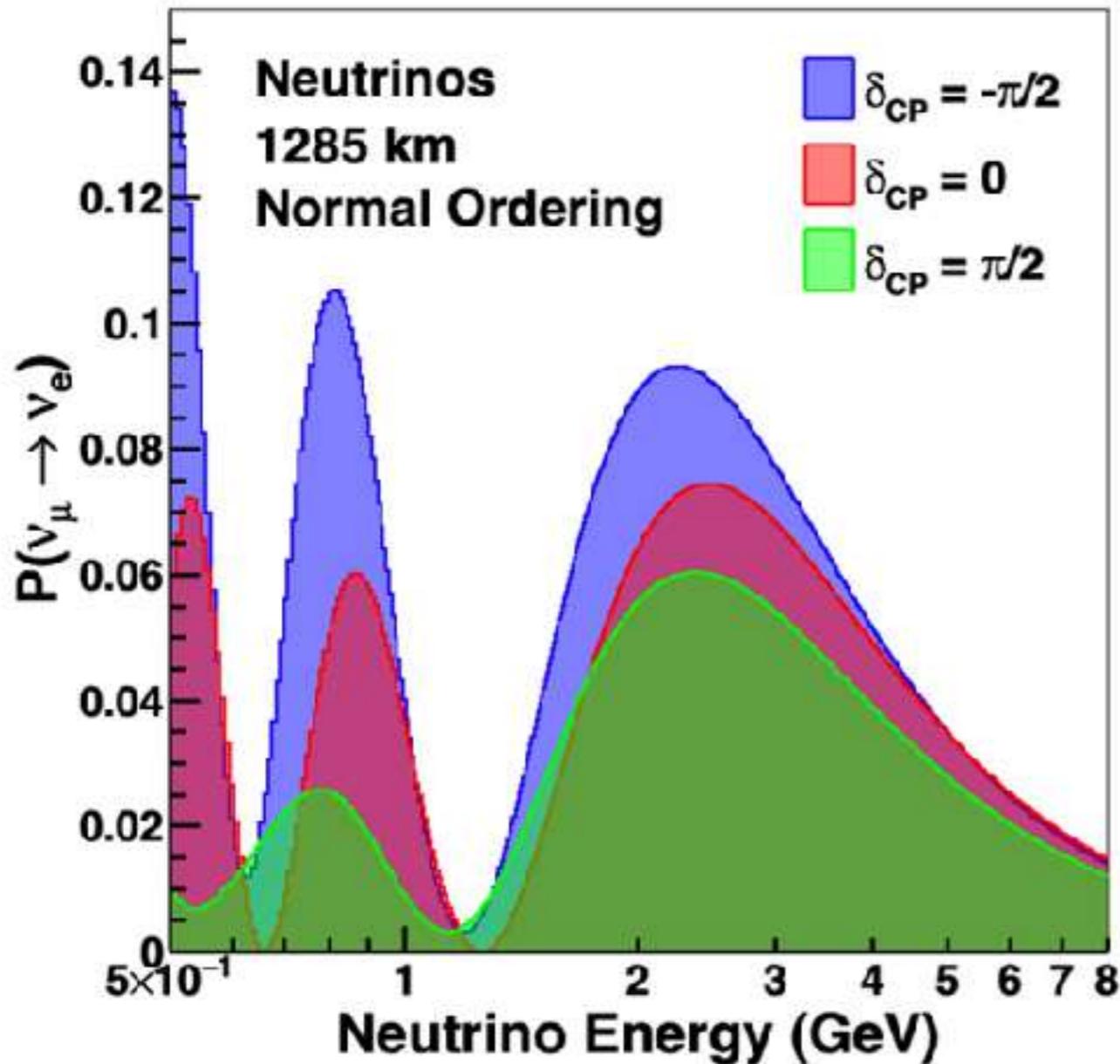


Нейтрино (Forward Horn Current, FHC)



Антинейтрино (Reverse Horn Current, RHC)

# Длинная база осцилляции 1300 км

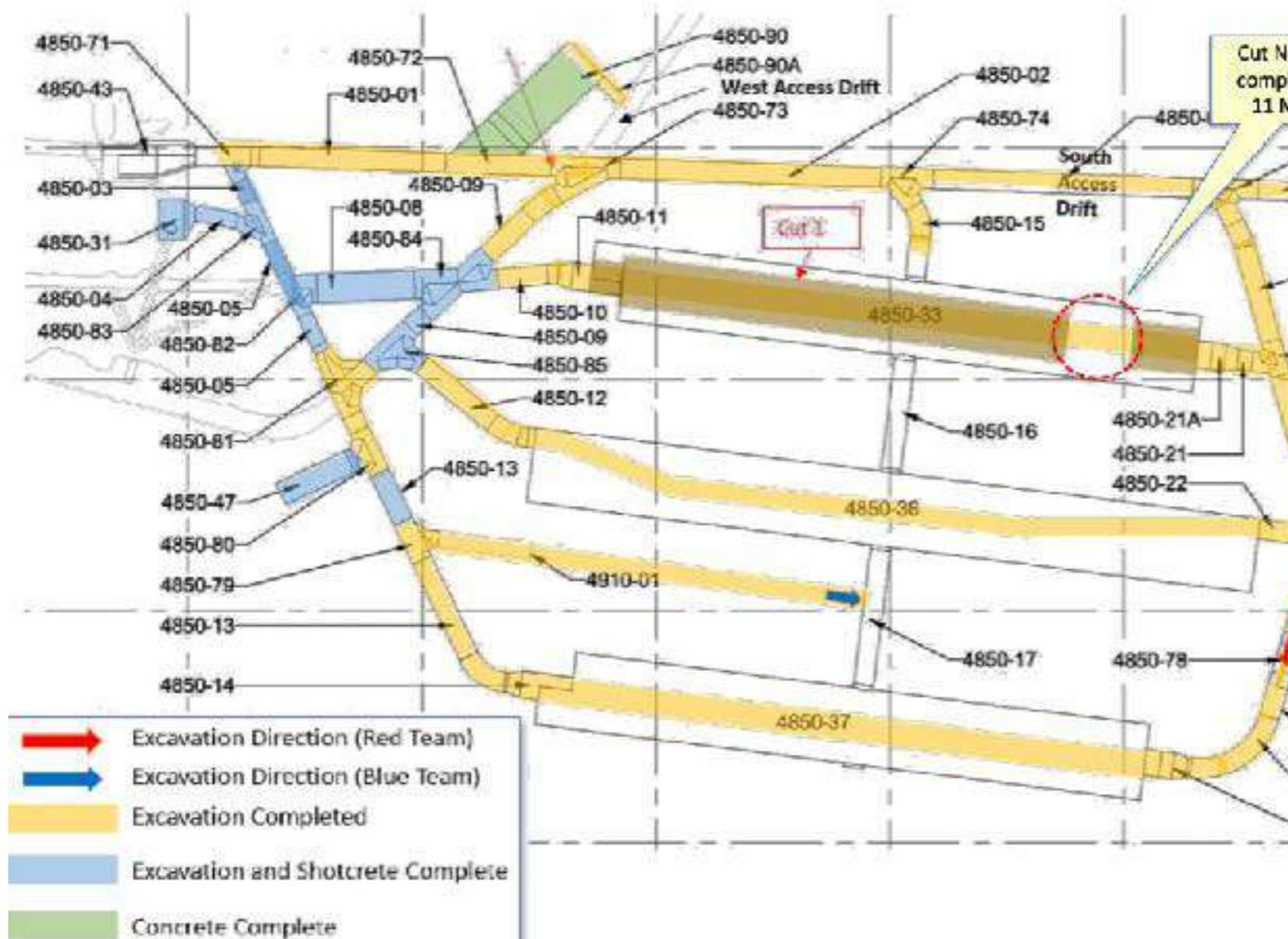


Нейтрино (Forward Horn Current, FHC)

Антинейтрино (Reverse Horn Current, RHC)

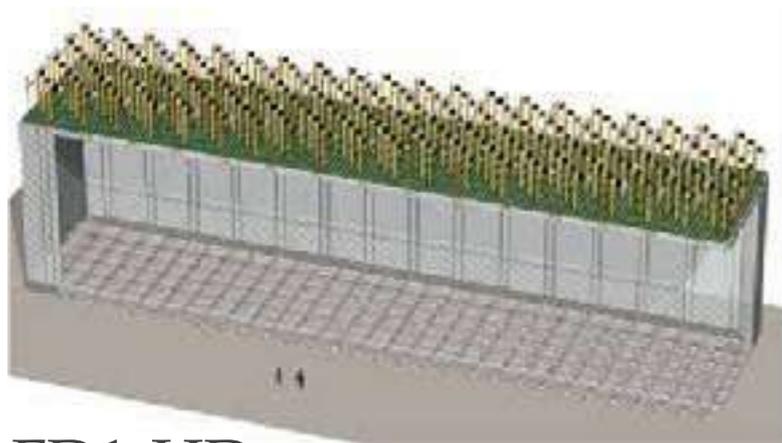
# Дальний детектор DUNE

❖ Подземная лаборатория Сэндфорд.

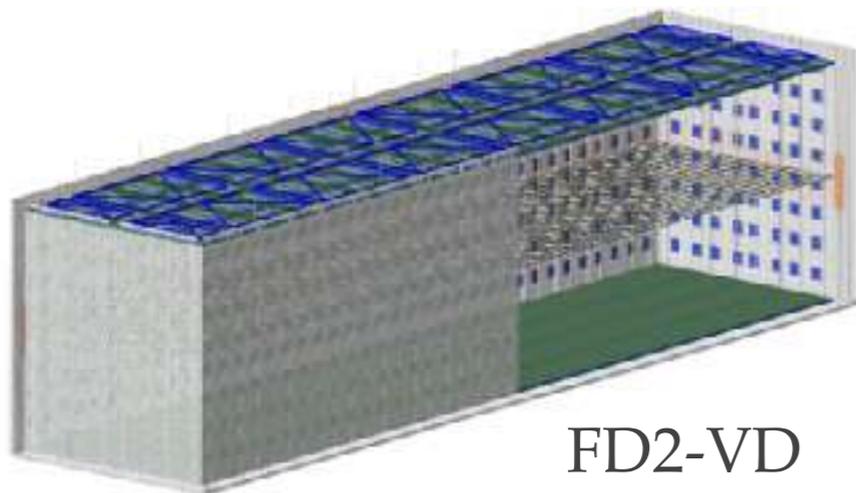


# Дальний детектор DUNE

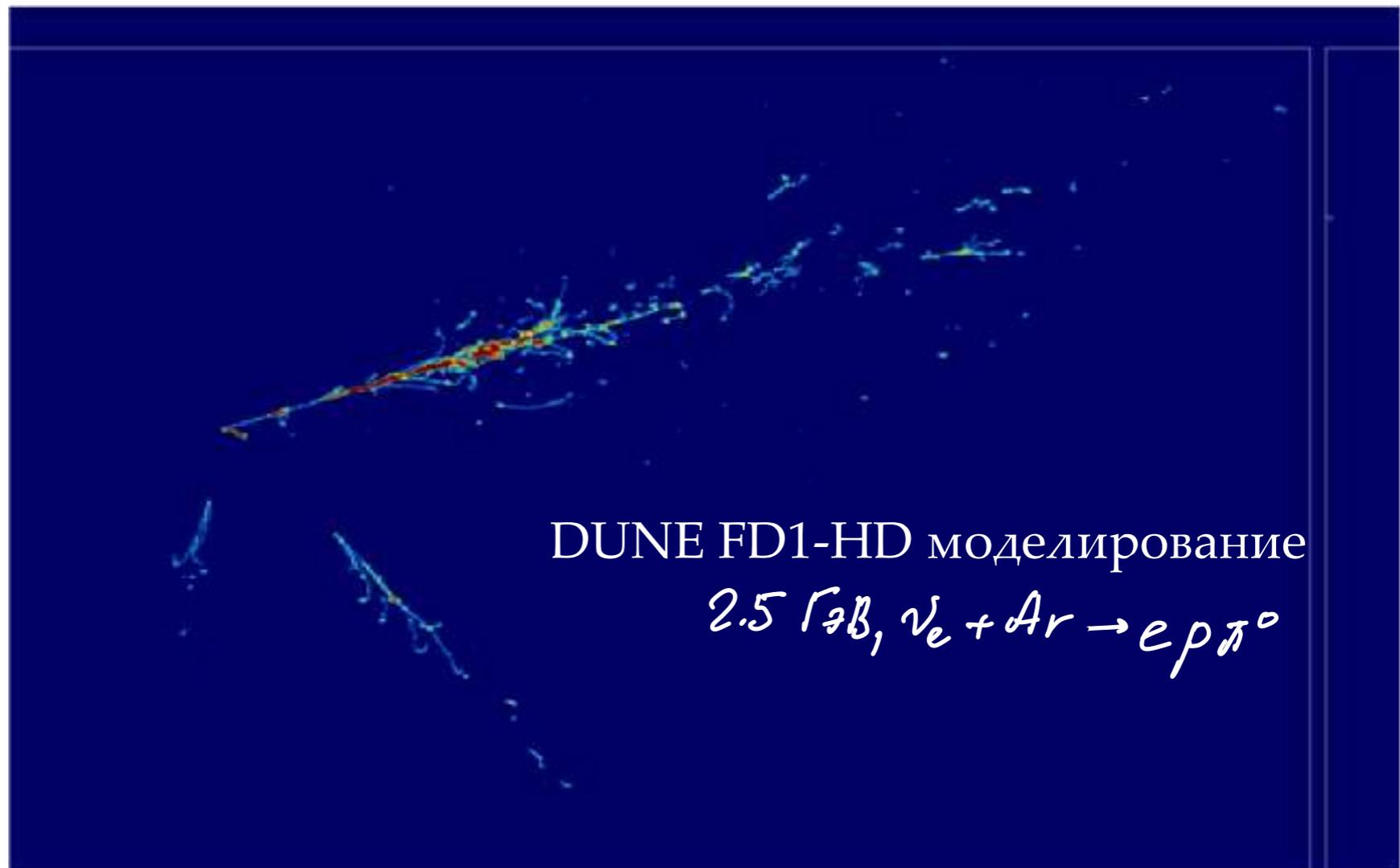
- ❖ Большой комплекс с использованием технологии жидко-аргоновых детекторов (ВПК, ТРС) с горизонтальным и вертикальным дрейфом электронов для идентификации частиц и измерения энергии.



FD1-HD

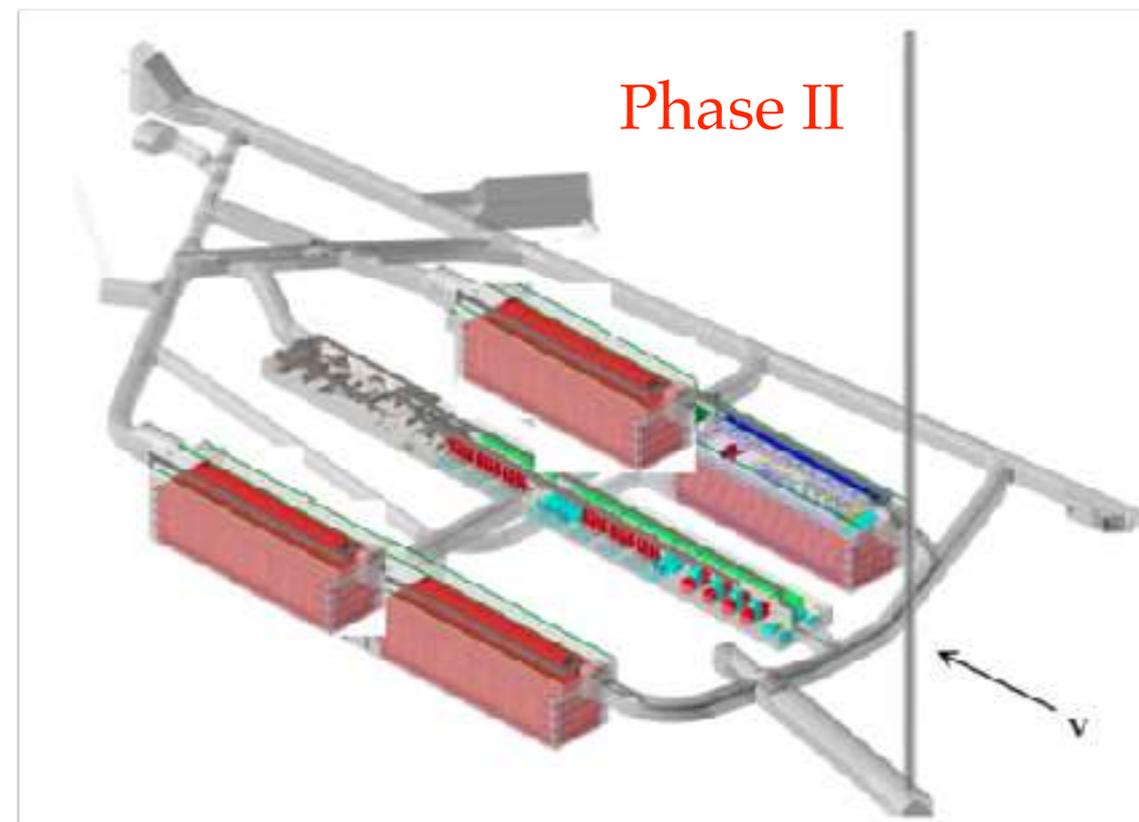
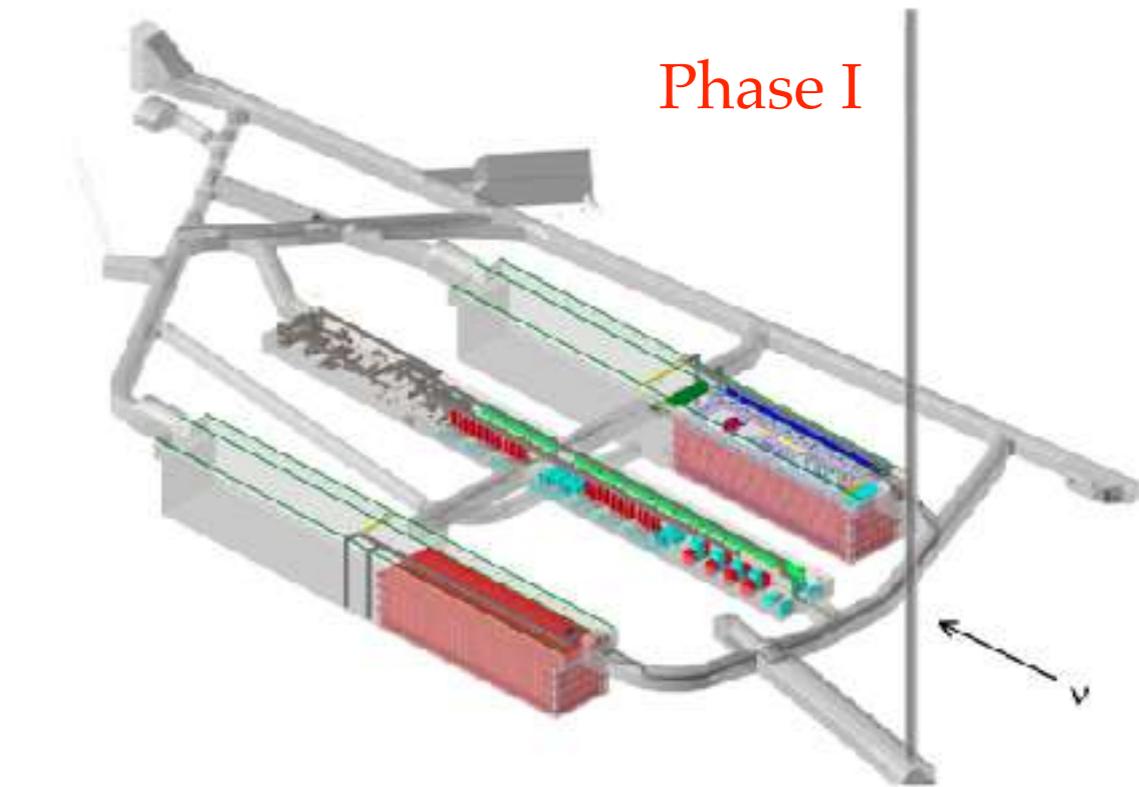


FD2-VD



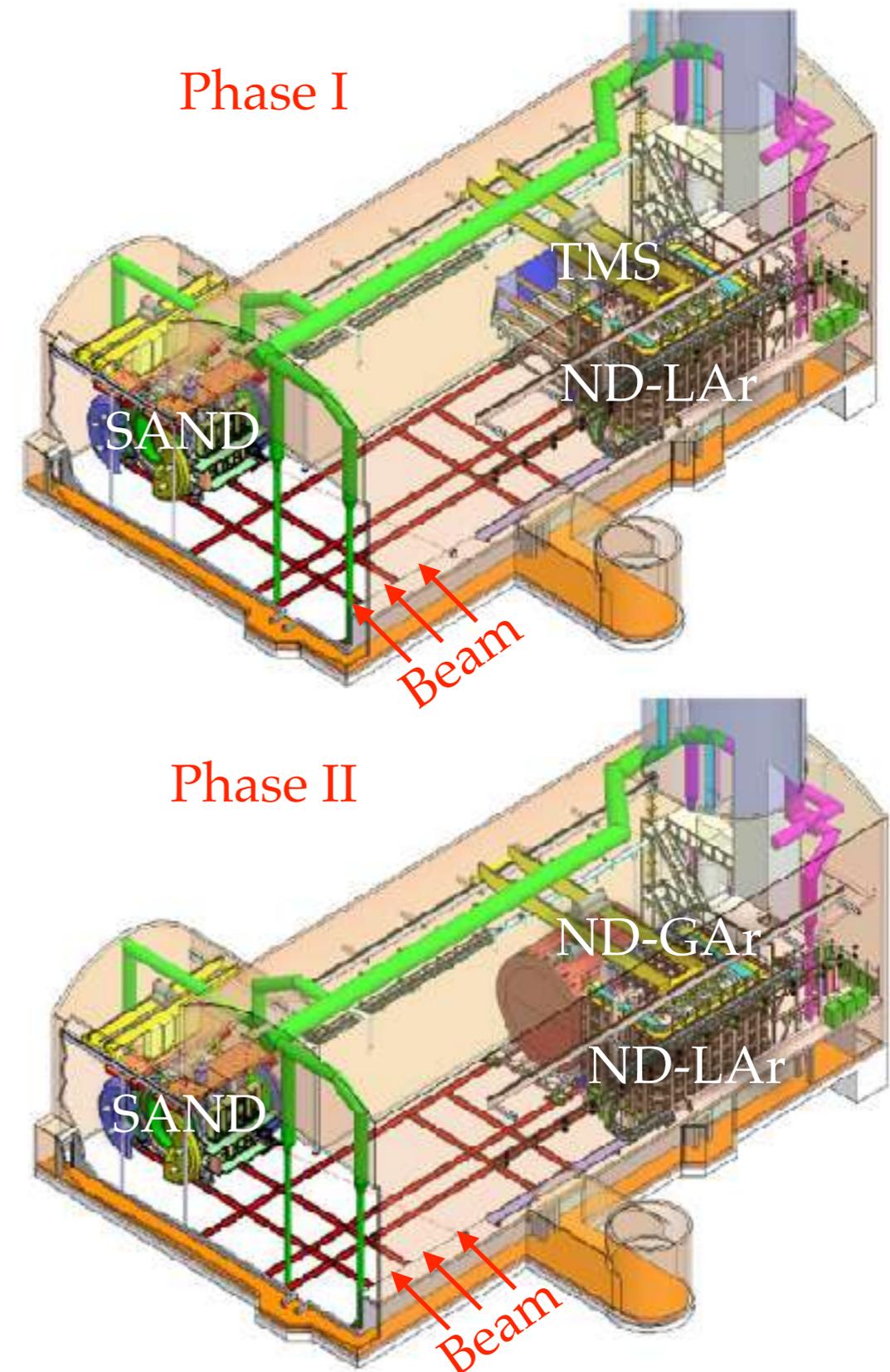
# Дальний детектор DUNE

- ❖ В первой фазе работы эксперимента планируемая мощность пучка составит 1.2 МВт.
- ❖ Будет работать два 17 кт (10 кт полезного объёма) LAr TPC модуля, один ND и один VD.
- ❖ Во второй фазе — 2.4 МВт.
- ❖ Четыре 17 кт LAr TPC модуля.



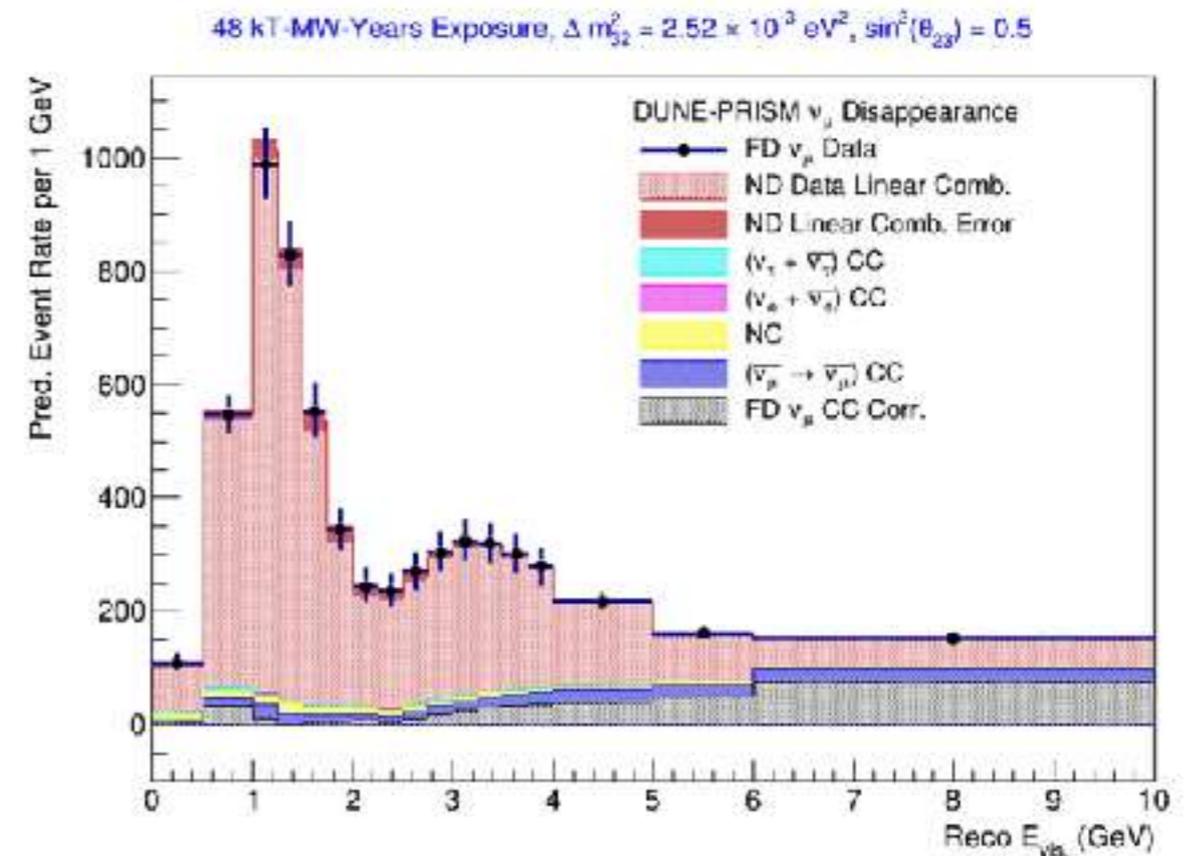
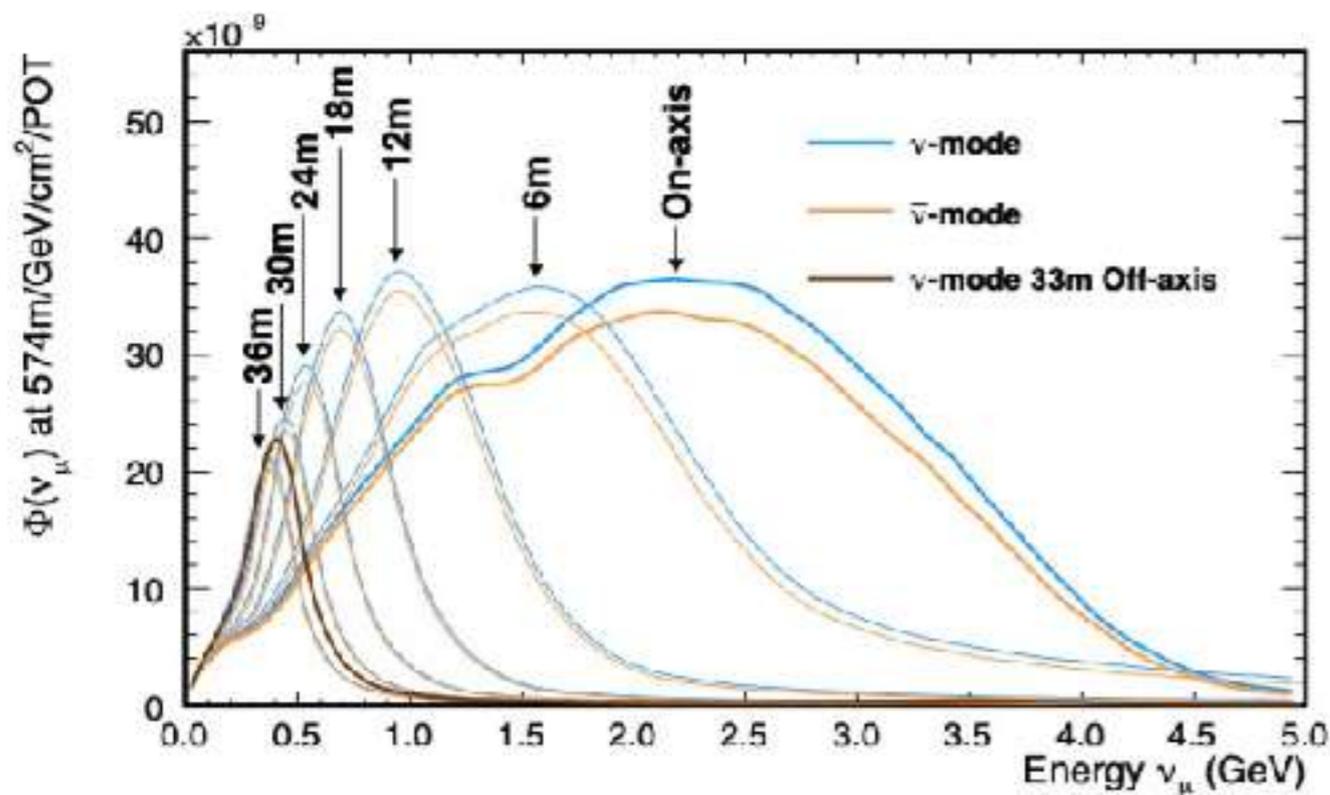
# Ближний детектор DUNE

- ❖ Сложный комплекс детекторов, оптимизированный под измерение нейтринных взаимодействий и максимальное сокращение систематических неопределенностей в анализе данных.
- ❖ ND-LAr с той же жидко-аргоновой технологией, что и дальний детектор.
- ❖ ND-GAr — ВПК с газообразным аргоном под высоким давлением.
- ❖ В начальной конфигурации (первая фаза) будет установлен временный мюонный спектрометр TMS.
- ❖ SAND — детектор “монитор” нейтринного пучка.
- ❖ Подвижная платформа DUNE-PRISM.



# DUNE-PRISM

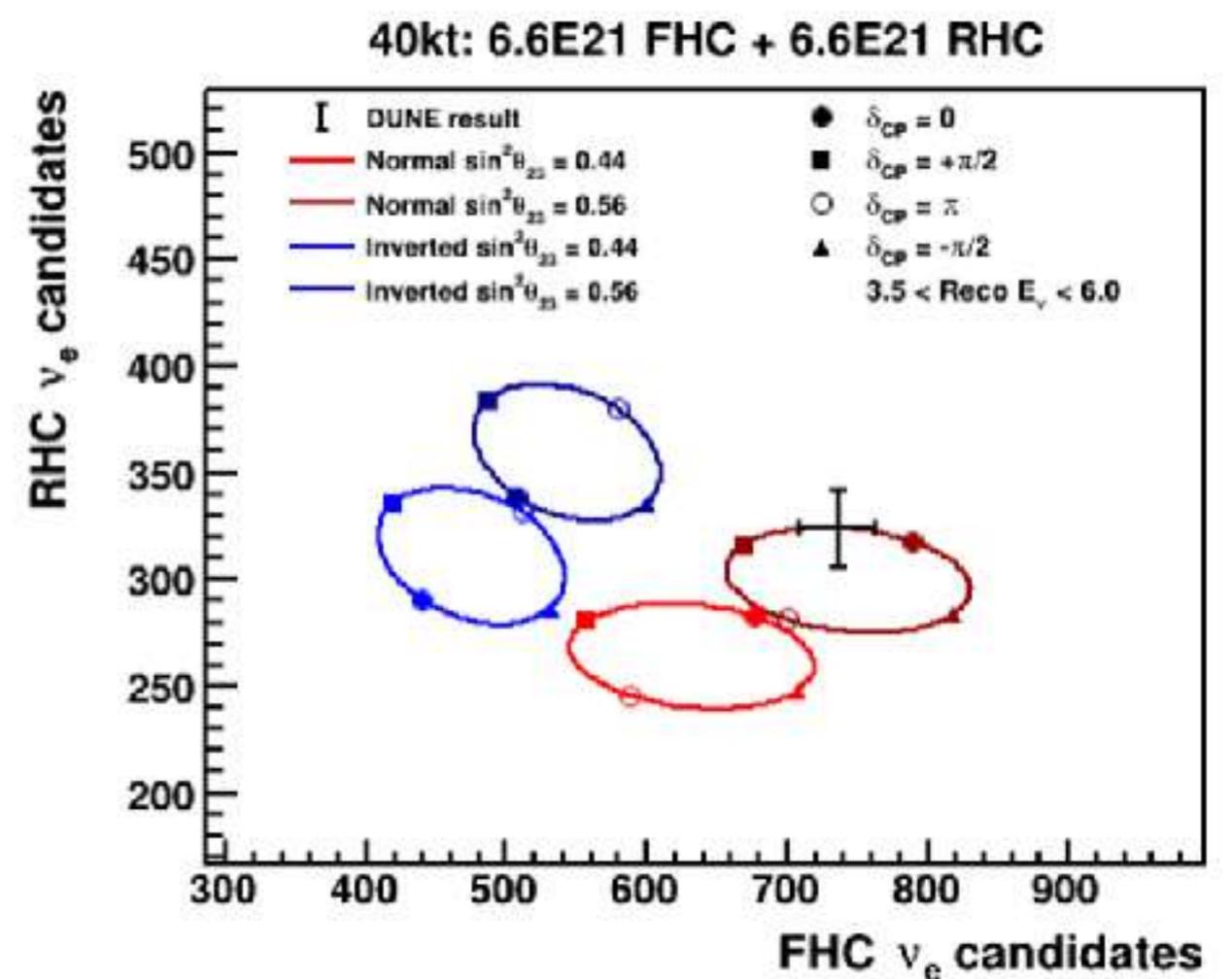
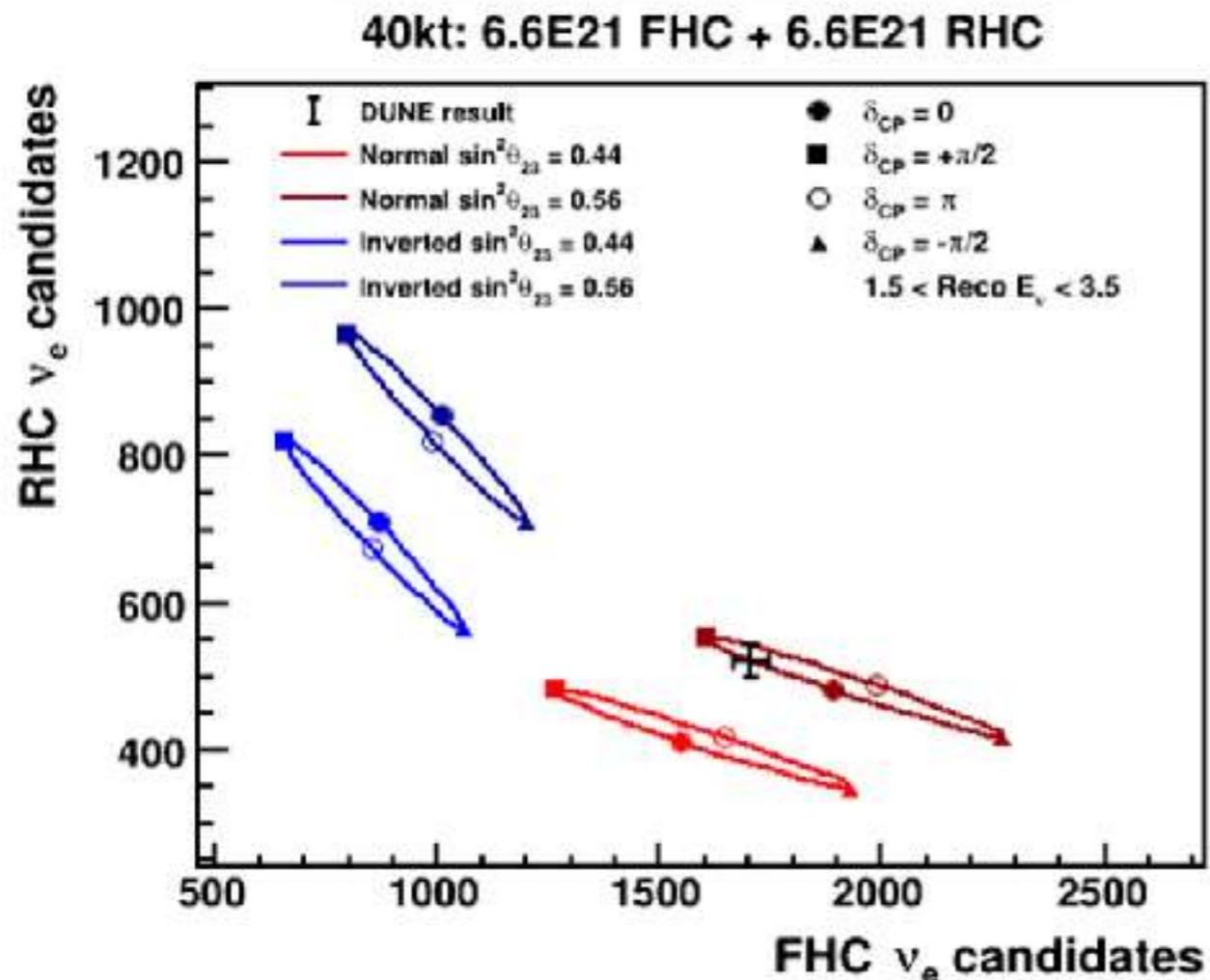
- ❖ ND-LAr и TMS (или ND-GAr) могут передвигаться перпендикулярно пучку (Off-Axis) для изменения соотношения нейтринных событий в спектре.
- ❖ Изучение различных нейтринных потоков и применение их линейной комбинации в анализе позволит лучше предсказывать спектр в дальнем детекторе.
- ❖ Анна Степанова (студент МГУ) является участником группы.



# Контурсы появления

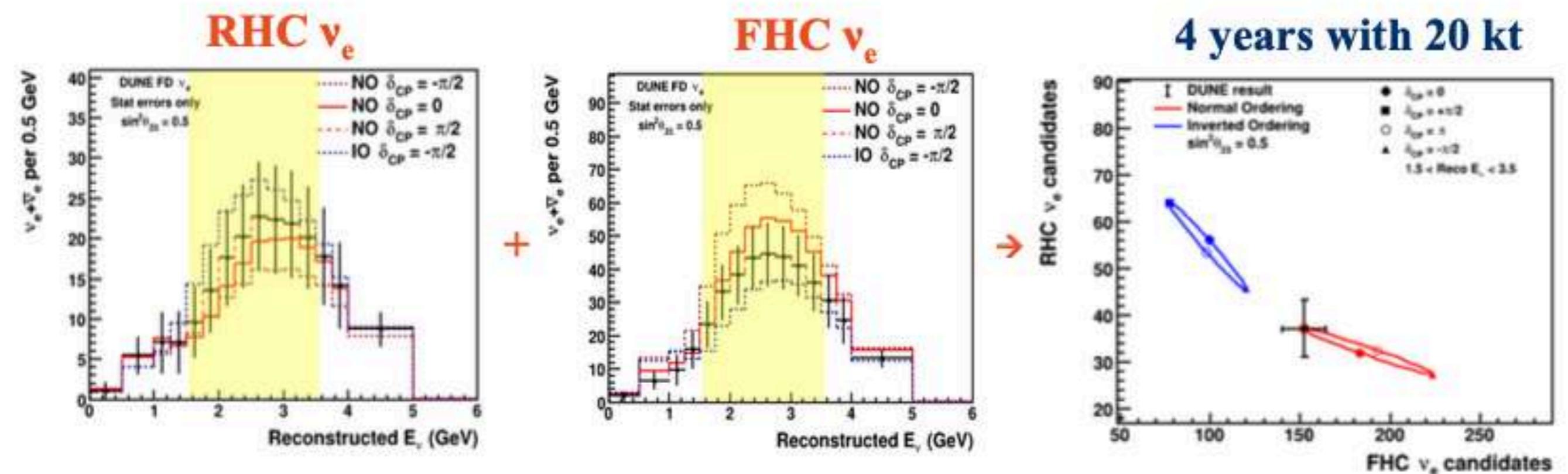
$$\nu_e / \bar{\nu}_e$$

- ❖ В полной фазе работы (2.4 МВт и четыре модуля FD) DUNE позволит провести осцилляционный анализ со статистической точностью в несколько процентов.
- ❖ Контурсы событий появления электронных нейтрино и антинейтрино для низких и высоких энергий будут выглядеть следующим образом.



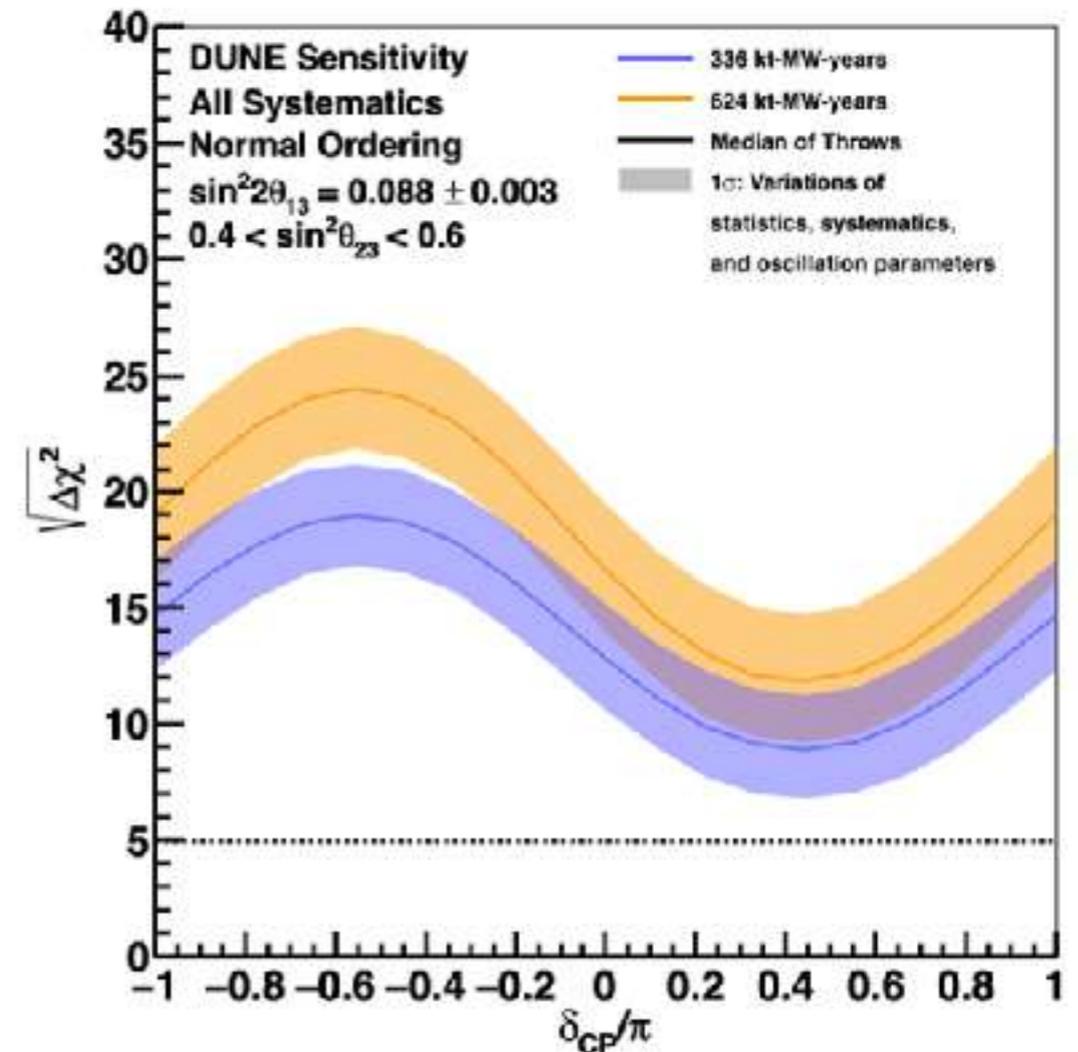
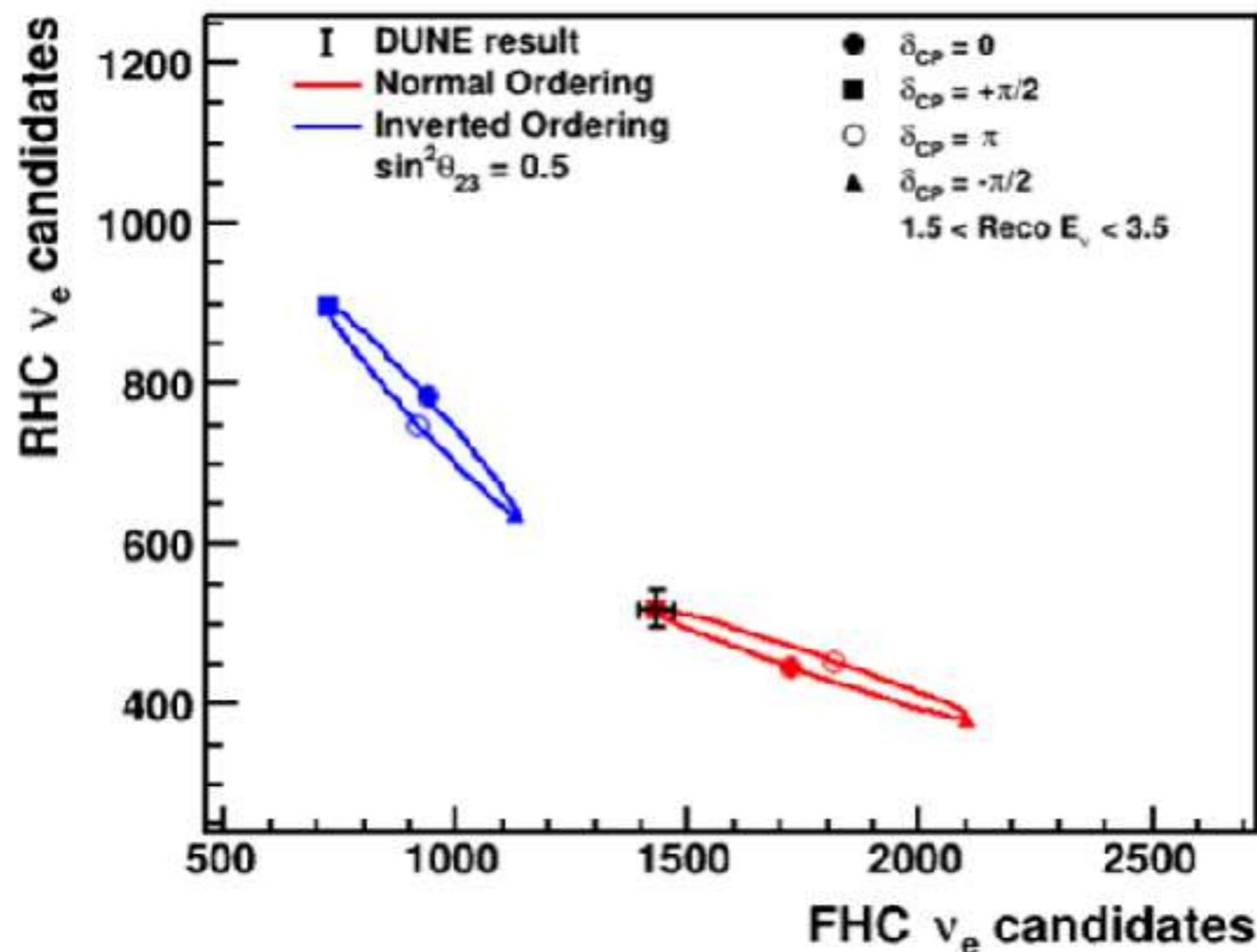
# Иерархия масс нейтрино

- ❖ DUNE (и только DUNE) может определить иерархию масс нейтрино без помощи других экспериментов.
- ❖ Несколько лет достаточно для открытия и определения иерархии масс в первой фазе работы (1.2 МВт и 2 модуля дальнего детектора).



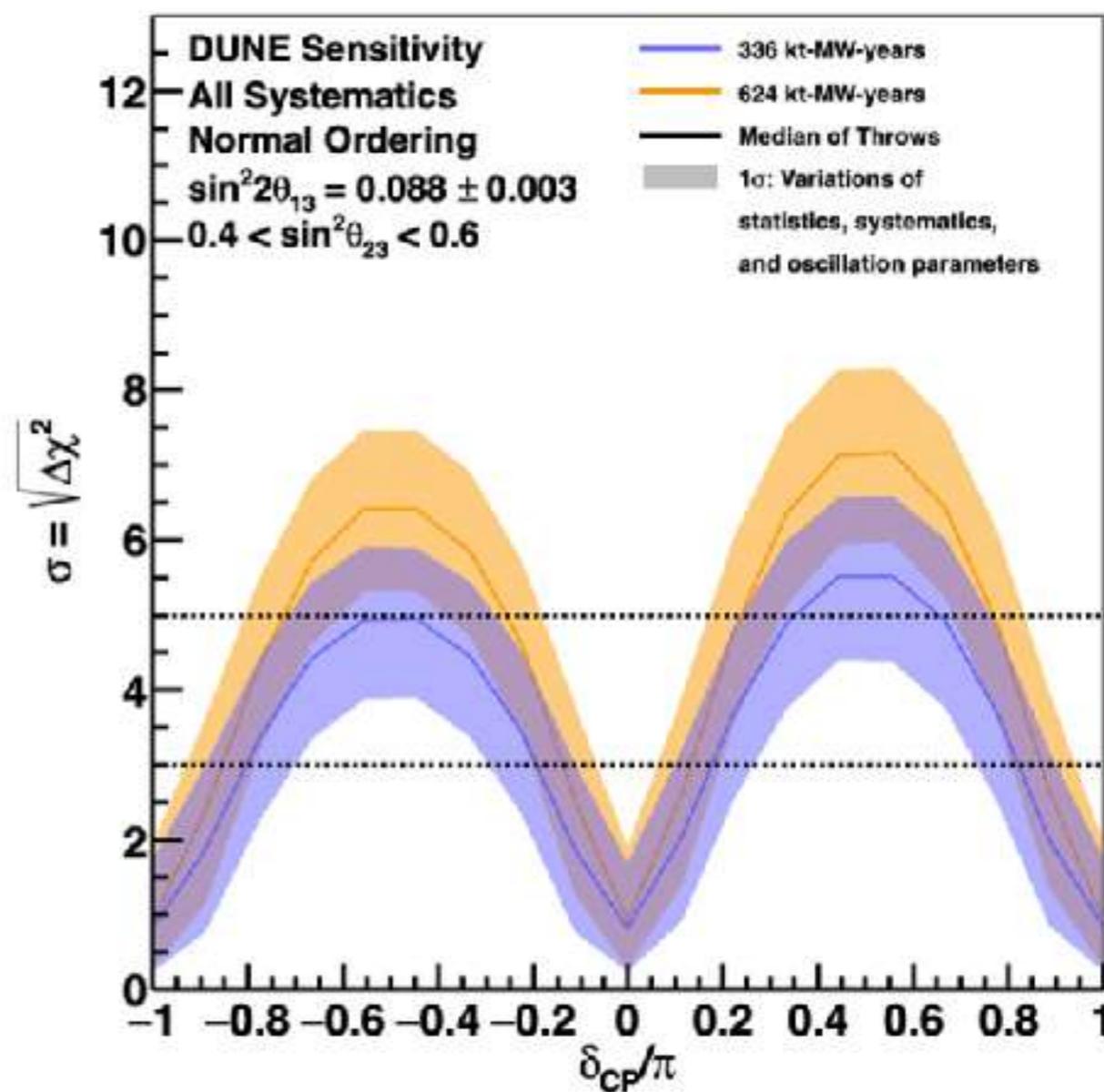
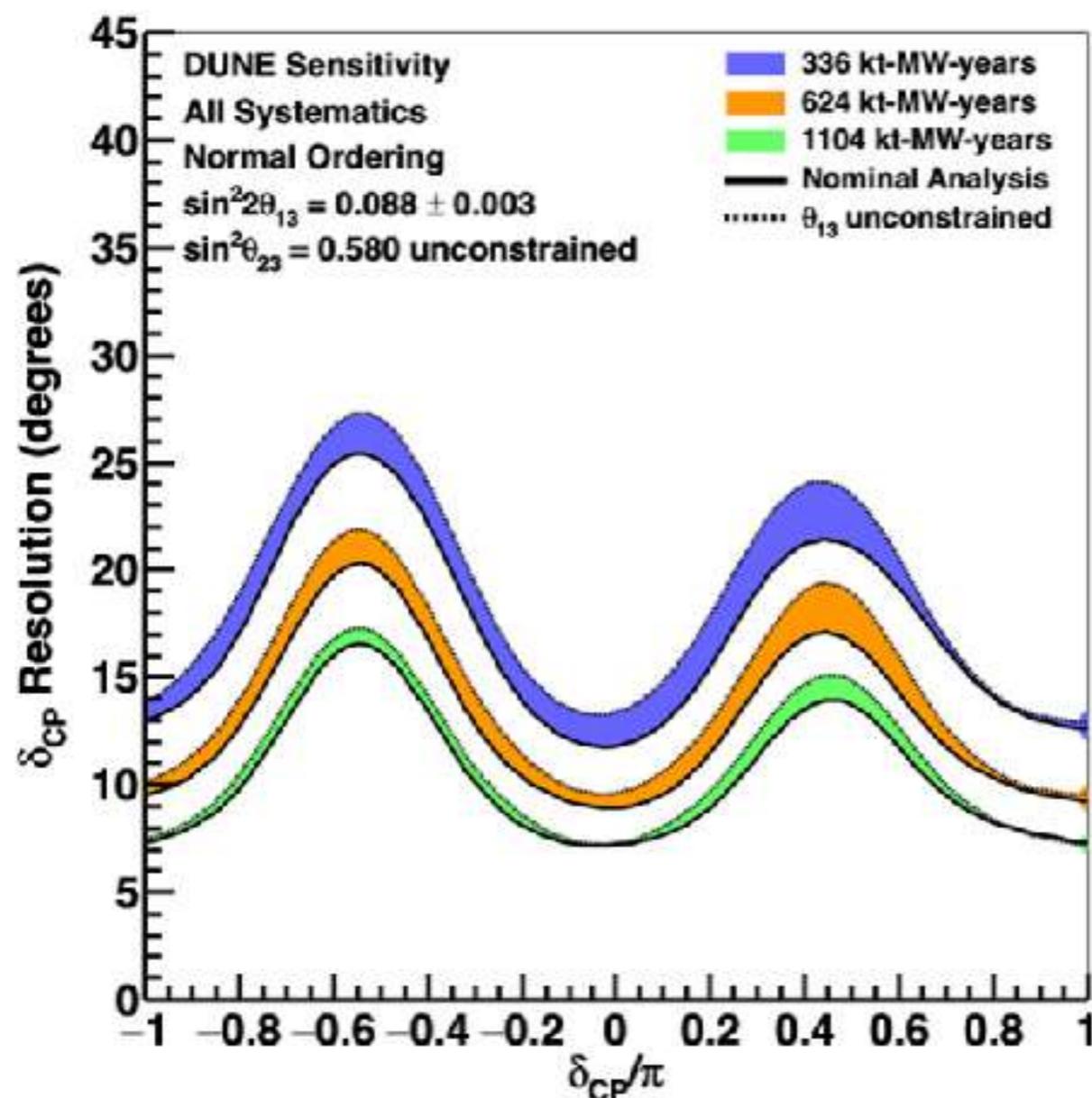
# Иерархия масс нейтрино

- ❖ Во второй фазе (2.4 МВт, экспозиция 800 кт-МВт-год) за 6 лет вопрос будет разрешен на  $> 5\sigma$  для любых значений других параметров ( $\delta_{CP}$ ).



# CP-нарушение

- ❖ Измерение на уровне  $5\sigma$  для  $>50\%$  значений  $\delta_{CP}$ .
- ❖  $\sim 10^\circ$  разрешение на  $\delta_{CP}$ .



# Задачи группы ОИЯИ для ND-LAr

- ❖ С 2021 года изготовлено 4 прототипа модулей ВПК.
- ❖ Модули были протестированы на данных атмосферных мюонов.
- ❖ Пройден этап согласования конструкции и её эксплуатации в ND-LAr (PDR).
- ❖ 2023-2024 идёт подготовка к сборке модулей 2x2 прототипа для тестового нейтринного пучка в Лаборатории Ферми.
- ❖ Изготовление полномасштабного демонстратора запланировано на 2024 г., а его тесты на 2025 г.
- ❖ Прохождение процедуры утверждения финального варианта ближнего детектора ND-LAr (FDR).



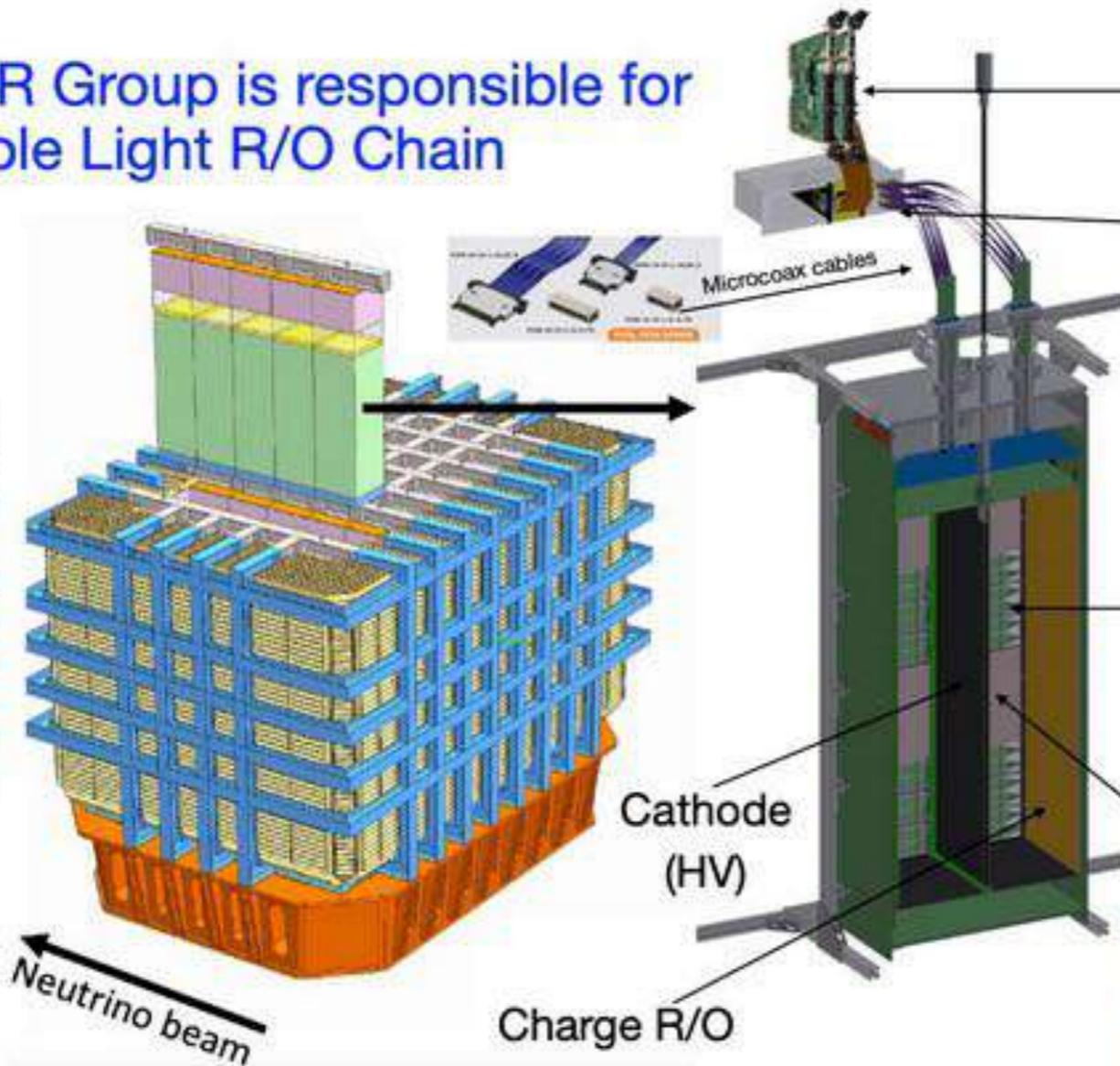
Детали системы на семинаре Александра Селюнина 9/3/2023

# Система светосбора для ND-LAr

## Light R/O for LArTPC of the DUNE ND

JINR Group is responsible for whole Light R/O Chain

DUNE ND LArTPC  
7 x 5 Modules



AFI JINR ADC



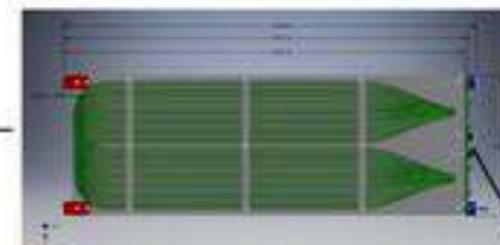
Crate with JINR Custom electronics SiPM power/ PGA



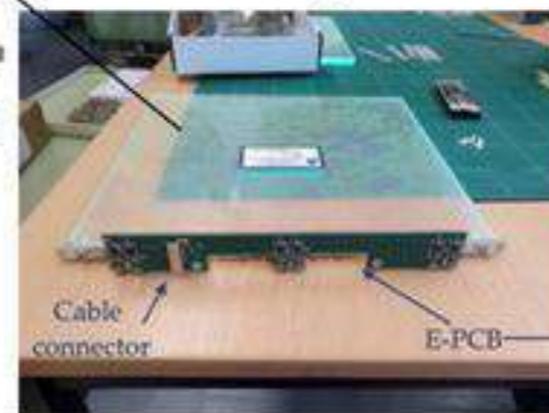
Slow Control Software

Light collection modules

LCM



ArcLight



Is in production...



R/O Chain  
SiPM Boards



E-PCB/Gold PreAmps

Including: Detectors, electronics, Front-End, DAQ, Slow Control, Calibration system

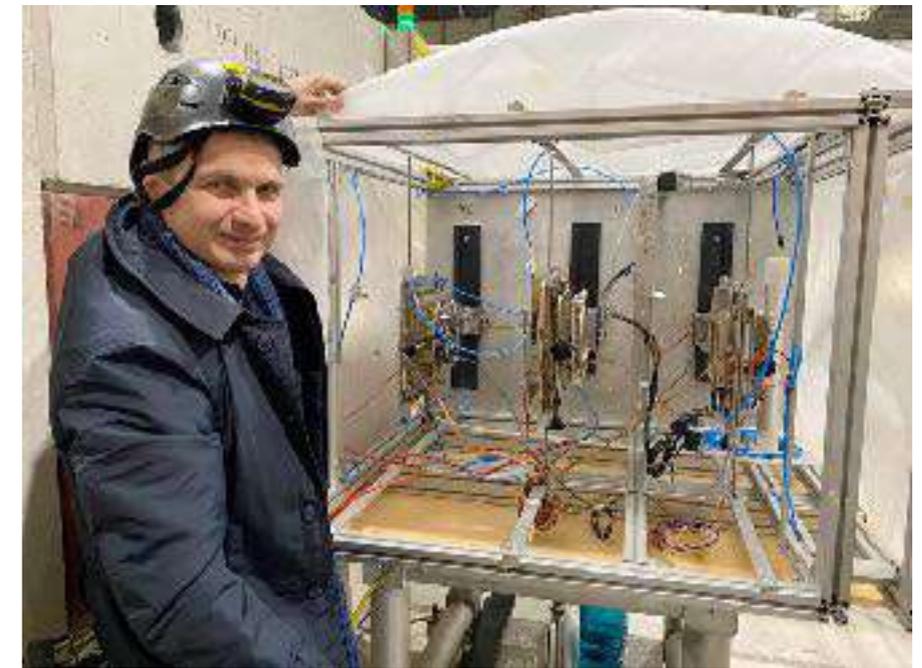
# Учёные, специалисты, высококвалифицированные инженеры (и зарубежные коллеги) в “Зелёной Лабе”



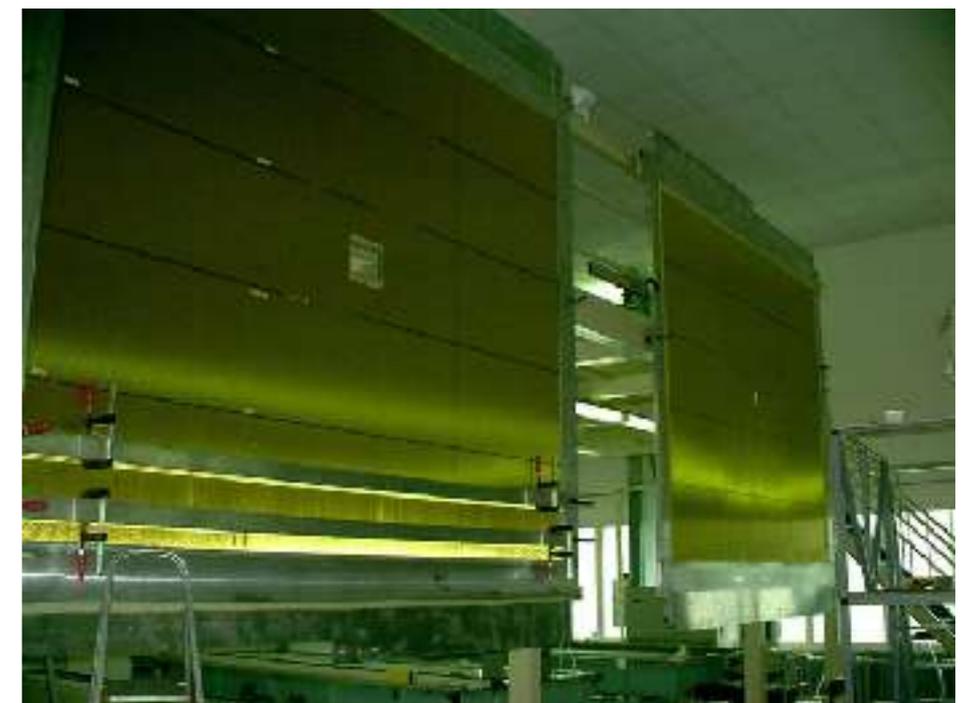
# Задачи группы из ОИЯИ для SAND

- ❖ Разработка и изготовление микропрототипа строу-камеры 1-2Q 2024.
- ❖ Разработка и изготовление прототипа 1200X600 2Q 2025.
- ❖ Изготовление комплекта строу для прототипов 1-4Q 2024.
- ❖ Создание производственной линии для монтажа и тестирования прототипов 2Q 2025.
- ❖ Изготовление комплекта строу для прототипов 1-4Q 2025.
- ❖ Монтаж и тесты.

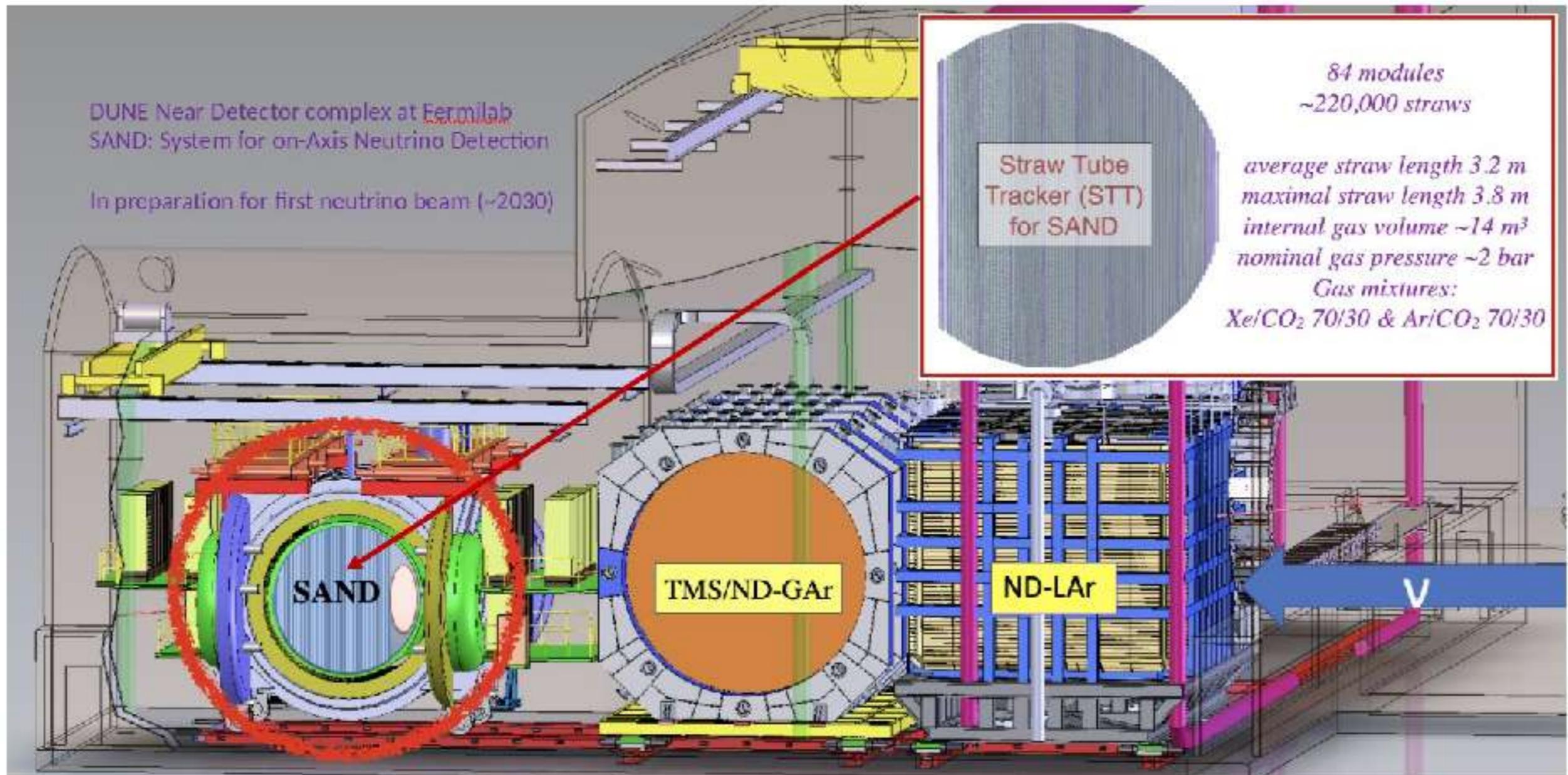
Темур Еник на тестах в ЦЕРН



Строу камеры 4x4 для COMPASS



# System for on-Axis Neutrino Detection



- ❖ Мониторинг пучка в реальном времени.
- ❖ Измерения сечений взаимодействия нейтрино и других процессов.
- ❖ Артём Чуканов может подтвердить, что рождается невероятное количество  $\Lambda$ -гиперонов для различных анализов и прикладных задач.

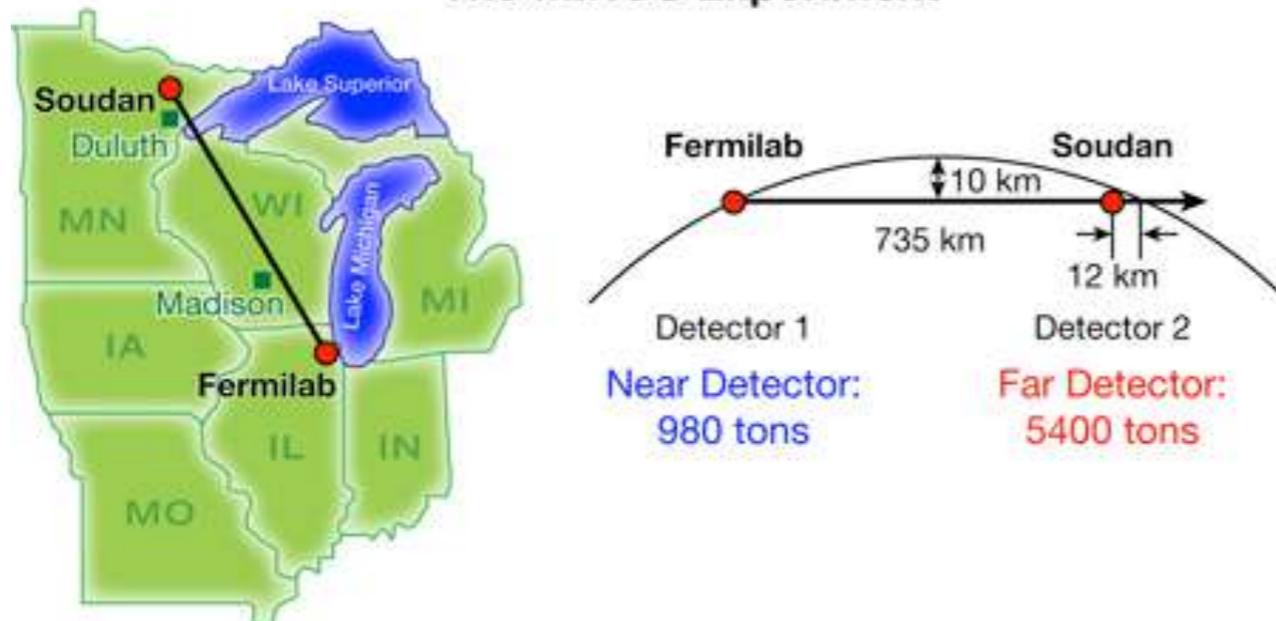
Немного истории про ускорительные  
нейтринные эксперименты с длинной базой.

# Первое поколение ускорительных нейтринных экспериментов с длинной базой: К2К и MINOS



- ❖ Пучок нейтрино ускорителя КЕК
- ❖ Super-Kamiokande (Водный черенковский детектор)
- ❖ База осцилляции 250 км
- ❖ Набор данных 1999-2004

The MINOS Experiment



- ❖ Пучок нейтрино на ускорителе в Лабратории Ферми
- ❖ Дальний детектор (5.4 кт) в шахте Судан
- ❖ База осцилляции 735 км
- ❖ Набор данных 2005-2012(+2016)

# Текущее (второе) поколение ускорительных нейтринных экспериментов с длинной базой: T2K и NOvA



- ❖ Нейтринный пучок из J-PARC (Токай)
- ❖ Super-Kamiokande
- ❖ База осцилляции 295 км
- ❖ Набор статистики с 2009 года

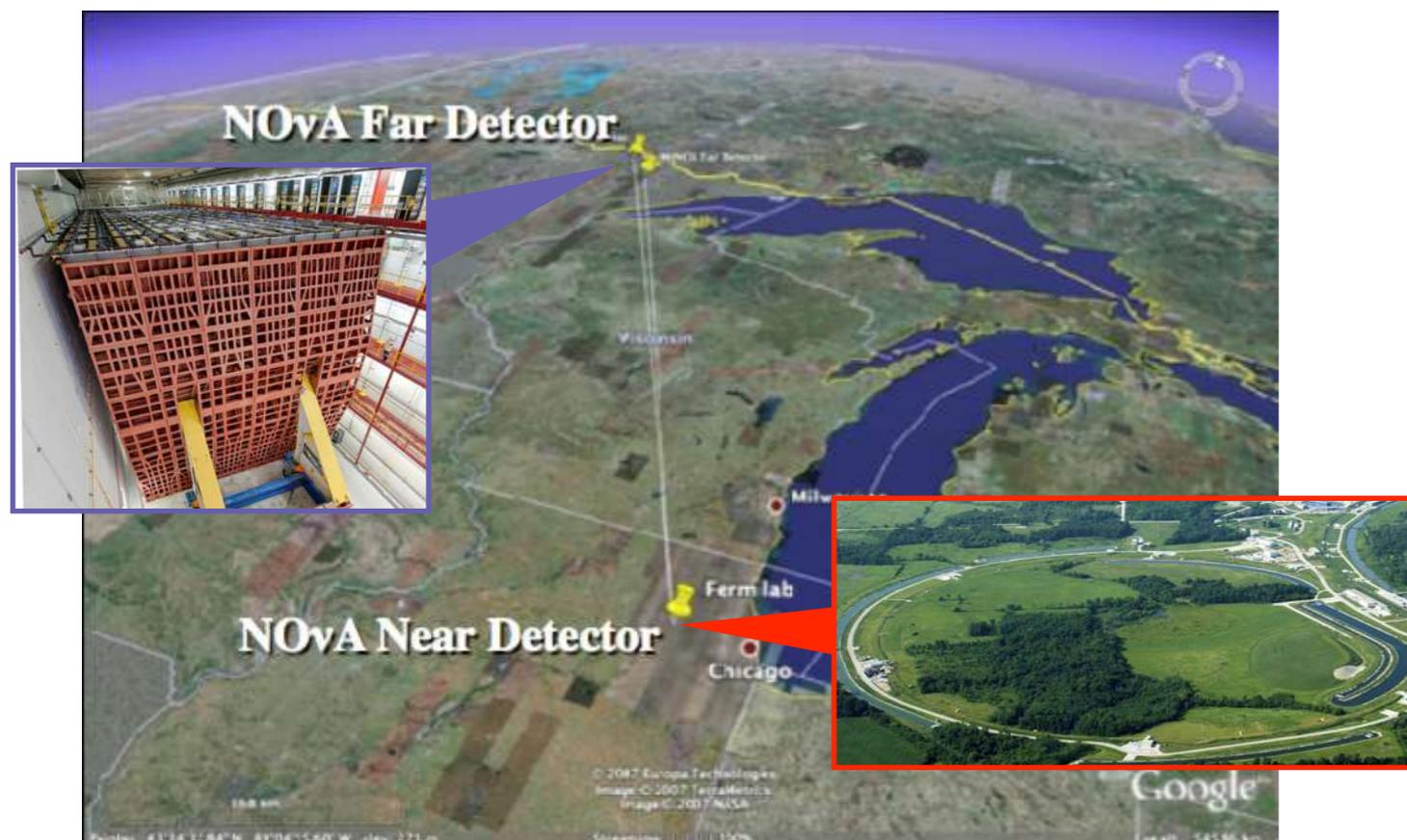


- ❖ Ускорительный комплекс NuMI (Лаборатория Ферми)
- ❖ Жидкий сегментированный сцинтилляционный детектор в Аш-Ривер
- ❖ База осцилляции 810 км
- ❖ Набор статистики с 2014 года

# Текущее (второе) поколение ускорительных нейтринных экспериментов с длинной базой: T2K и NOvA



- ❖ Нейтринный пучок из J-PARC (Токай)
- ❖ Super-Kamiokande
- ❖ База осцилляции 295 км
- ❖ Набор статистики с 2009 года



- ❖ Ускорительный комплекс NuMI (Лаборатория Ферми)
- ❖ Жидкий сегментированный сцинтилляционный детектор в Аш-Ривер
- ❖ База осцилляции 810 км
- ❖ Набор статистики с 2014 года

OPERA ?  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$

# Будущее (но уже подготавливаемое) поколение ускорительных нейтринных экспериментов с длинной базой: T2HK и DUNE



Hyper-Kamiokande

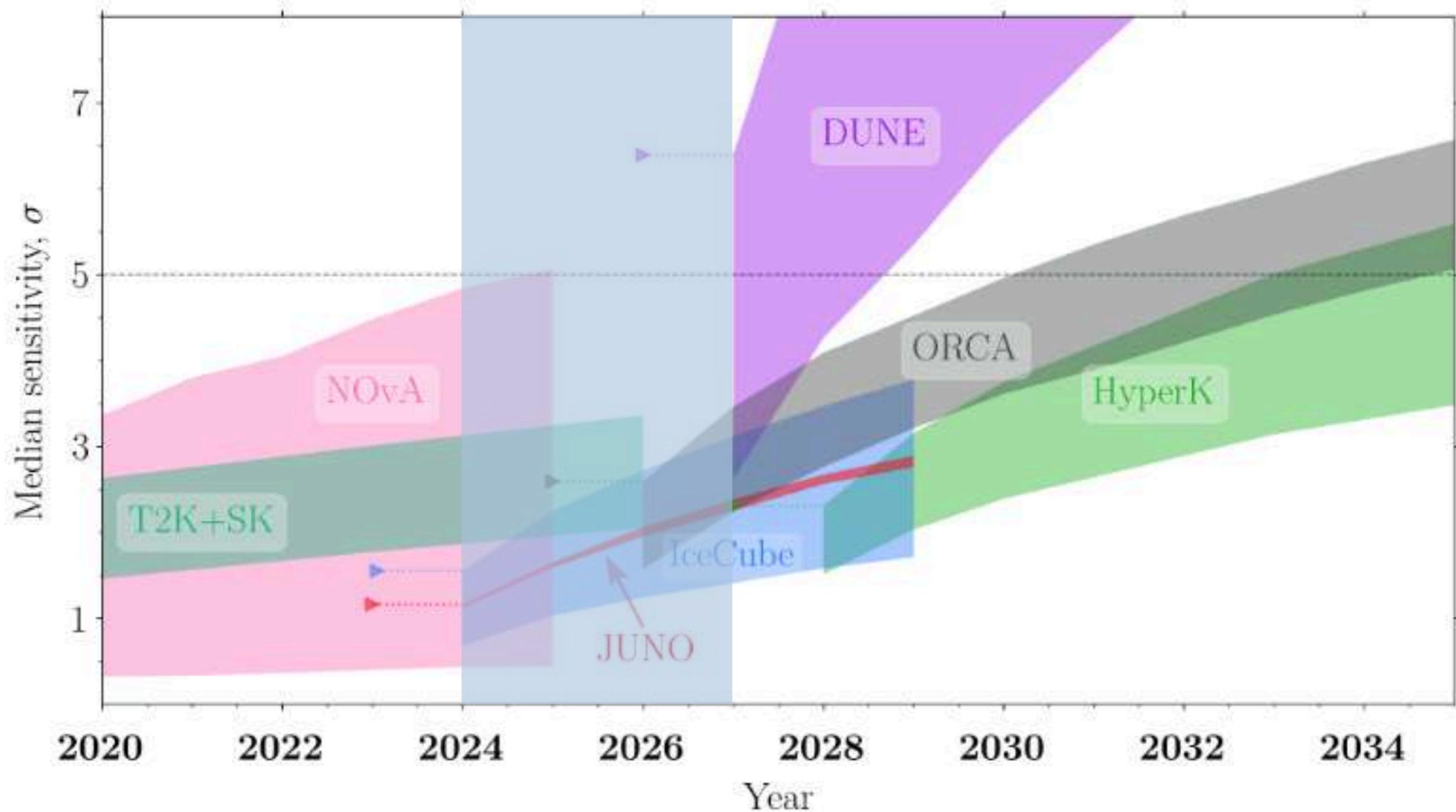
- ❖ Hyper-K
- ❖ Усовершенствование Super-K и T2K
- ❖ Водный черенковский детектор
- ❖ 8х больше полезная масса детектора
- ❖ 2.5 раза интенсивней нейтринный ПОТОК



- ❖ DUNE
- ❖ Существенное обновление NuMI
- ❖ Жидко-аргоновый ВПК
- ❖ Широкий нейтринный спектр на оси пучка (on-axis beam)
- ❖ База осцилляции 1300 км
- ❖ Подземная лаборатория Сэнфорд

# Будущие эксперименты

Future neutrino mass ordering sensitivity



v3 2022.03: git-jim.ru/nu/csc

Спасибо за внимание!