



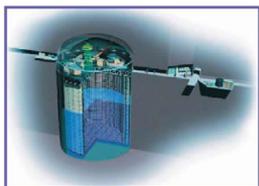
Изучение свойств нейтрино в ускорительных экспериментах

Самойлов О.Б. (ЛЯП ОИЯИ)
Для групп NOvA, T2K, FASER(ν) и NA65(DsTau)



- Вклад ОИЯИ в ускорительные нейтринные эксперименты
- Фундаментальная проблема проекта и его задачи
- Методы и подходы к решению задач
- Перспективы будущих исследований
- Вычислительные ресурсы МИВК
- Заключение. Ожидаемые результаты

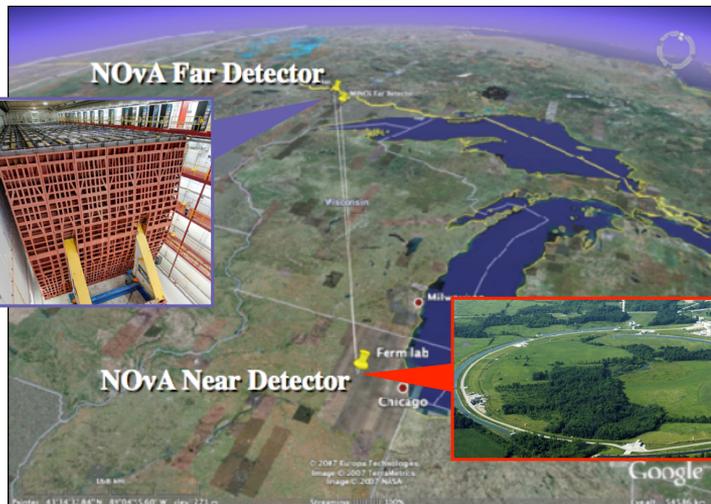
- Семинар про физику, не про деньги!



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



NOvA Far Detector

NOvA Near Detector



T2K

- Нейтринный пучок J-PARC (Токай)
- Водный черенковский детектор Super-Kamiokande
- База осцилляции 295 км
- Набор статистики с 2009 года (до 2027)

NOvA

- Ускорительный комплекс NuMI (Лаборатория им. Э.Ферми)
- Жидкий сегментированный сцинтилляционный детектор
- База осцилляции 810 км
- Набор статистики с 2014 года (до 2027)

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

$$|\Delta m_{32}^2| = |m_3^2 - m_2^2| \\ \simeq 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$$

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$$

$$\Delta m_{31}^2 \simeq \Delta m_{32}^2$$

$$\nu_e \rightarrow \nu_e$$

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

$$\Delta m_{21}^2 = |m_2^2 - m_1^2| \\ \simeq 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\nu_e \rightarrow \nu_e$$

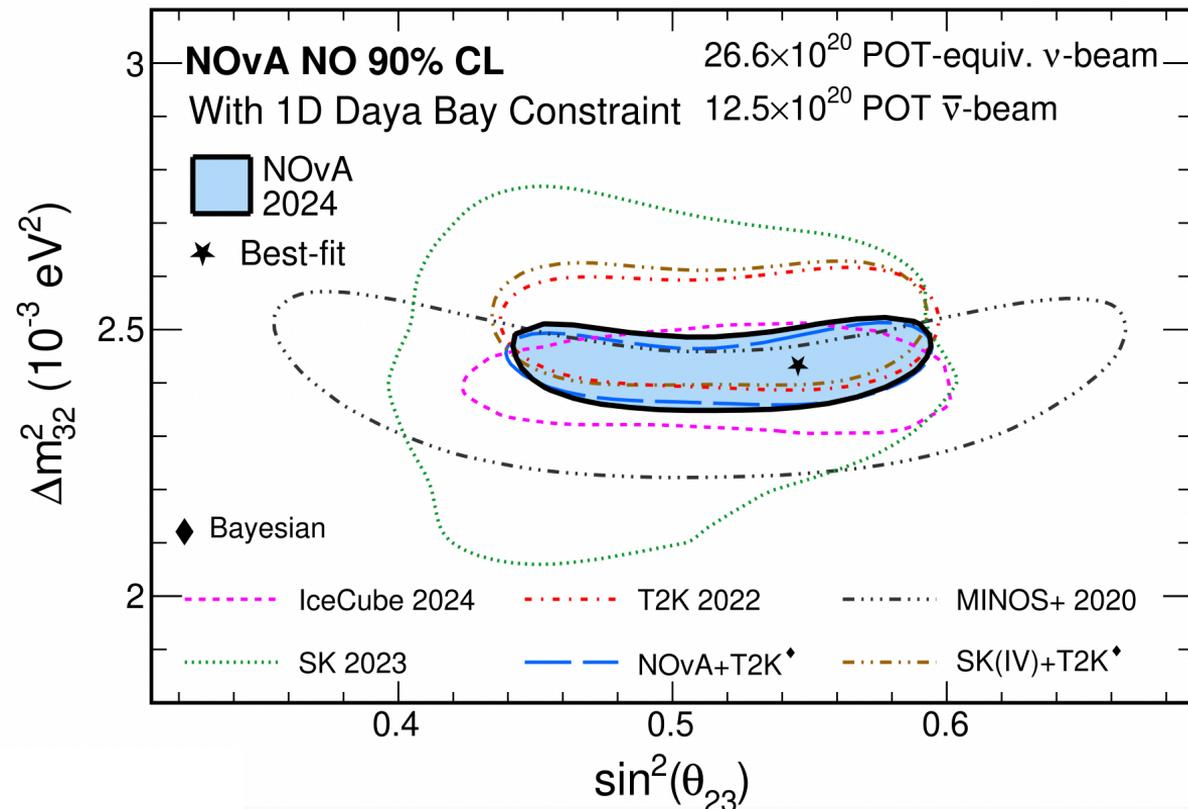
$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$$

Эксперименты
атмосферные и
с **длинной базой**

Эксперименты
реакторные и
с **длинной базой**

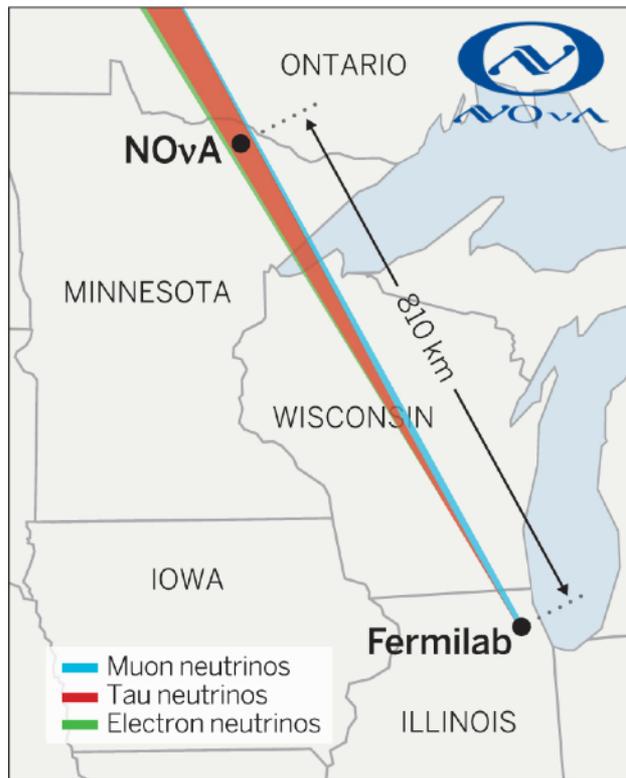
Эксперименты
солнечные и
реакторные

NOvA Preliminary

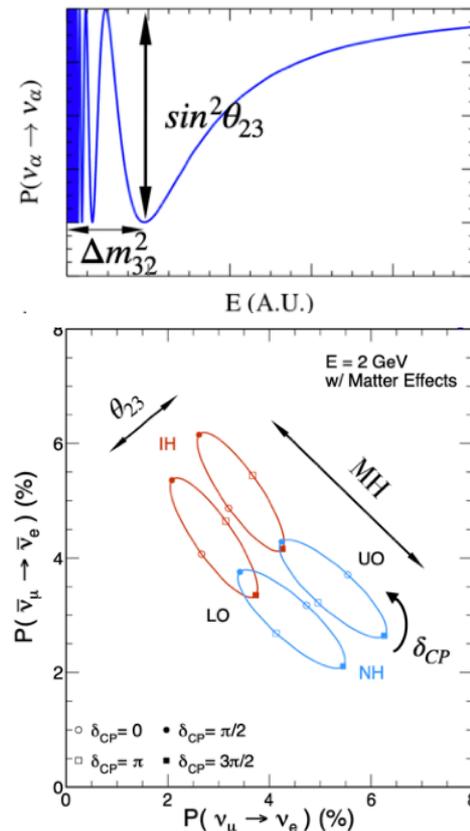
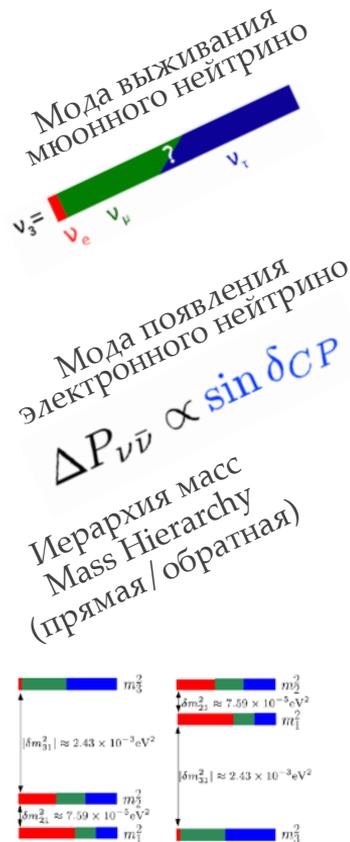


Единственные работающие
эксперименты с длинной
базой в настоящее время!

The NuMI Off-Axis ν_e Appearance Experiment



K. ENGMAN / SCIENCE 345, 6204



- ОИЯИ участвует в эксперименте с 2014 г. В рамках темы 1099 изучение осцилляций нейтрино в ускорительных экспериментах
- Продление проекта 2017. NOvA
- Продление проекта 2020. NOvA
- Продление проекта 2023. NOvA+DUNE
- Обновление проекта 2025. NOvA+T2K+FASER(ν)+NA65(DsTau)





- Осцилляционный анализ.
- Сечения нейтрино в рамках модели сотрудников ЛТФ.
- “Экзотическая” физика: детектирование нейтронного сигнала от Сверхновых, поиск магнитных монополей, атмосферные и космические потоки частиц и сигналы, темная материя.
- ROC-Dubna. Первый неамериканский центр удаленного управления NOvA. Работает с 2015 г.
- Развитая вычислительная инфраструктура МИВК. Облачные ресурсы.
- Два тестовых стенда для измерений характеристик электроники и жидкого сцинтиллятора NOvA.
- 12 авторов в настоящий момент. Участие в задачах координации физических анализов, менеджмент онлайн (триггеры) и оффлайн (анализ данных) программного обеспечения, экспертное участие в процессе управления работой детекторов.
- Защищены 2 кандидатских диссертации.

- ОИЯИ принимает участие в работе T2K с 2020 г.
- Проект участия 2021. T2K-II/НК
- Обновление проекта 2022. T2K-II. Ближний детектор
- Обновление проекта 2023. T2K-II
- Обновление проекта 2025. NOvA+T2K+FASER(ν)+NA65(DsTau)

Участники рабочей группы
проекта в сборочном цехе ЛЯП

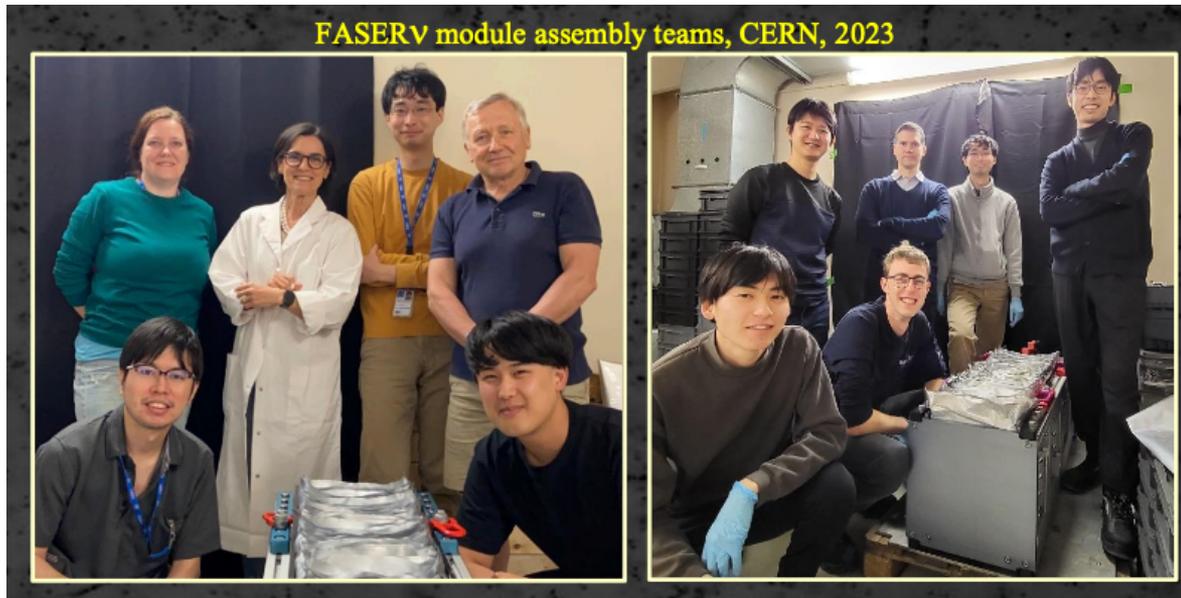




- Проектирование и создание инструментов для сборки активной мишени SFGD, включая платформу для сборки и систему доступа сверху для установки детектора; сборка SFGD в J-PARC.
- Исследование оптических свойств элементов активной мишени SFGD.
- Разработка и производство системы калибровки SFGD.
- Участие в исследовании выхода вторичных частиц из графитовой мишени (мишень, аналогичная T2K, на эксперименте NA61/SHINE в CERN).
- Анализ данных по поиску лёгкой тёмной материи.
- Проведение исследований для оценки систематических ошибок в различных типах анализа данных ND280.
- Оценка занятости сотрудников 12.6 FTE

- Наследие эксперимента OPERA. Эмульсионные эксперименты
- ОИЯИ участвует с 2018 г. В рамках темы 1099 изучение осцилляций нейтрино в ускорительных экспериментах
- Обновление проекта 2025. NOvA+T2K+FASER(v)+NA65(DsTau)

FASERV module assembly teams, CERN, 2023





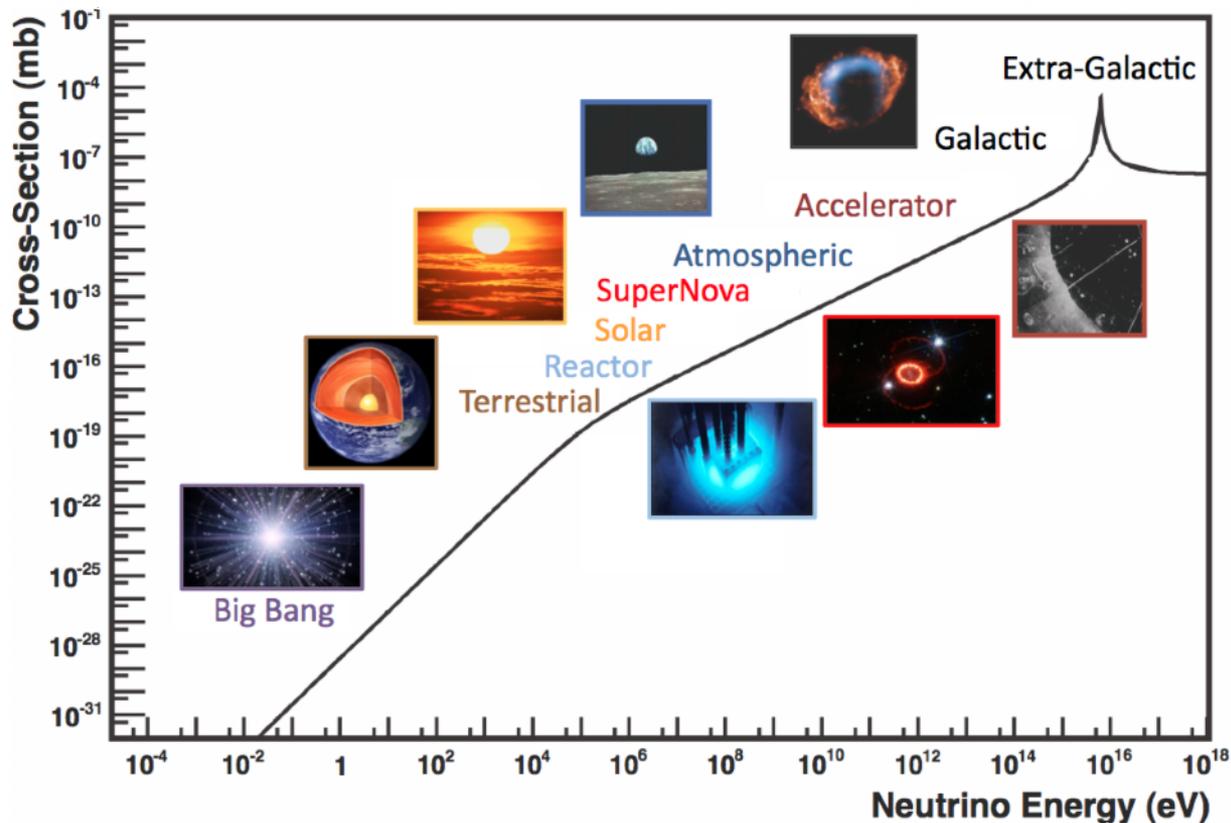
- Сборка модуля FASER ν и смены для обработки эмульсии
- Контроль температуры модуля и охлаждение
- Моделирование на основе Монте-Карло
- Управление и обработка данных
- Разработка и администрирование программного обеспечения FASER ν
- Руководство в коллаборации DsTau

- Четыре активных участника проекта
- Недавний семинар Сергея Дмитриевского 11.09.2024 "Статус и последние результаты эксперимента FASER на LHC"

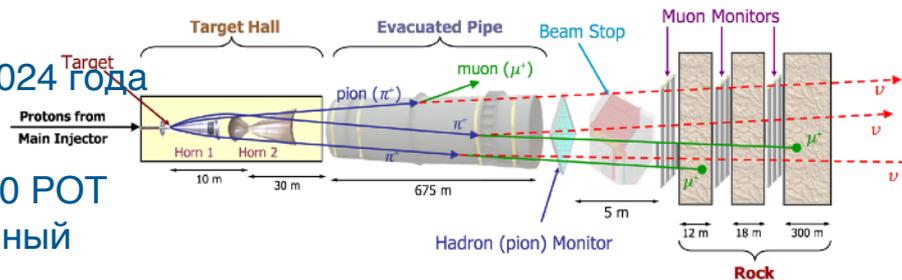
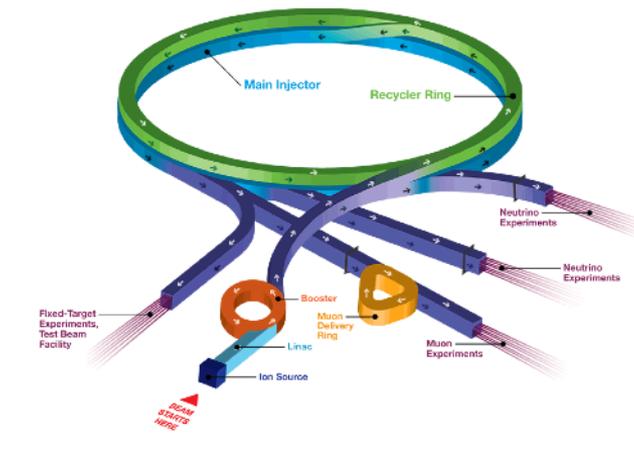


Нейтрино. Почему ускорители?

- Естественные: Солнце, атмосфера Земли, радиоактивные изотопы, взрывы Сверхновых, диффузные потоки древних Сверхновых и реликтовые нейтрино
- Искусственные: ядерные реакторы, ускорители частиц, радиоактивные изотопы



- Нейтрино рождаются в Главном инжекторе NuMI протонов с энергией 120 ГэВ, которые направляются на углеродную мишень.
- После мишени установлены магнитные горны, которые фокусируют положительно или отрицательно заряженные мезоны в зависимости от режима (нейтрино или антинейтрино).
- Эти пионы и каоны распадаются, образуя (анти)нейтрино, проходя через распадный канал.
- Модернизация ускорительного комплекса Fermilab
- Проектная мощность протонного пучка для NOvA была 700 кВт; недавние обновления на 900 кВт.
- Средняя мощность пучка сейчас 850 кВт, а летом 2024 года достигнут рекорд — 1018 кВт.
- Экспозиция последнего анализа NOvA с $26,61 \times 10^{20}$ POT (нейтринный пучок) и $12,5 \times 10^{20}$ POT (антинейтринный пучок).





- ❖ **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)

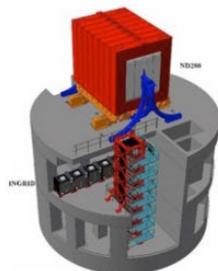


- ❖ **Дальний детектор**
- расположен на расстоянии 810 км от пучковой мишени, вес 14 кт.
- измеряет осцилляционный нейтринный пучок
- учитывает систематические погрешности экстраполяции из БД
- ДД идентичен БД

NOvA



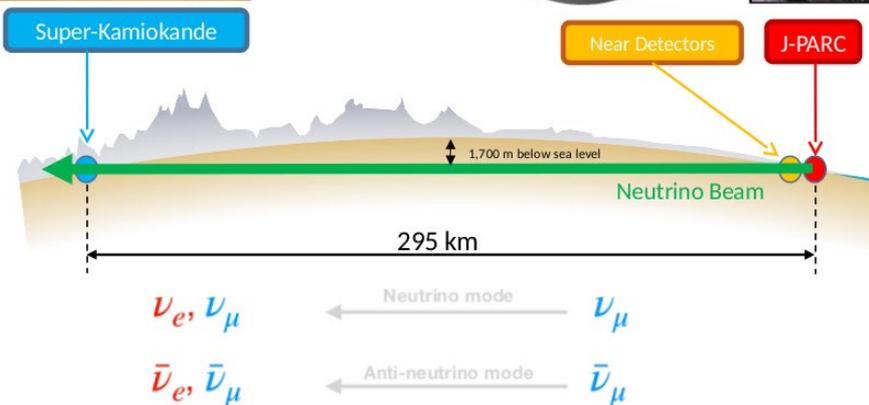
Super-Kamiokande



Near Detectors



J-PARC



T2K/SK

Схема работы с двумя детекторами

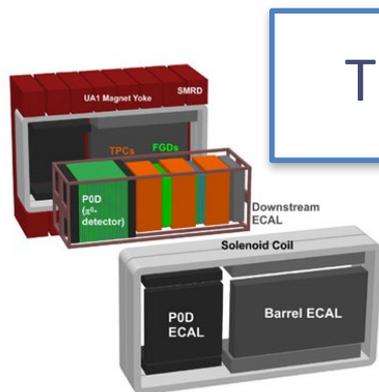
Тремя



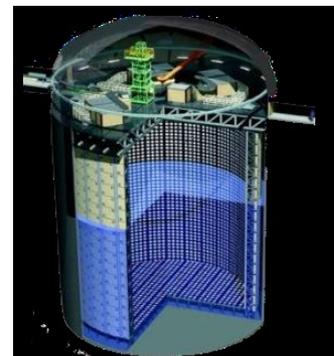
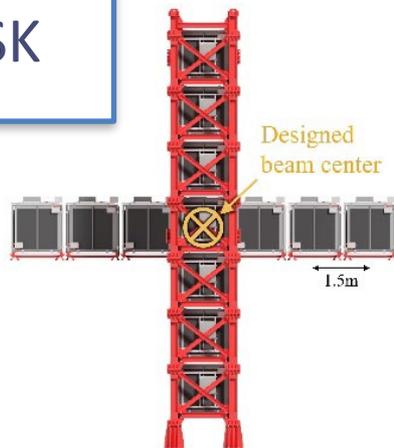
Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований



T2K/SK



❖ Ближний детектор ND280

- расположен в 280 м после пучковой мишени, вне оси пучка 2.5°
- выполняет роль монитора и измеряет неосцилляционный спектр пучка
- магнитное поле (0,2 Т) для измерения заряда и импульса с помощью TPC
- (S)FGDs: активные сцинтилляционные мишени + пассивные мишени из воды

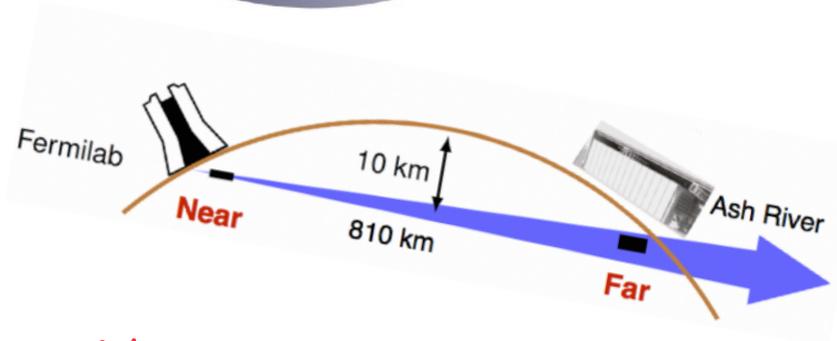
❖ Ближний детектор INGRID

- на оси пучка
- монитор пучка

❖ Дальний детектор Super-Kamiokande

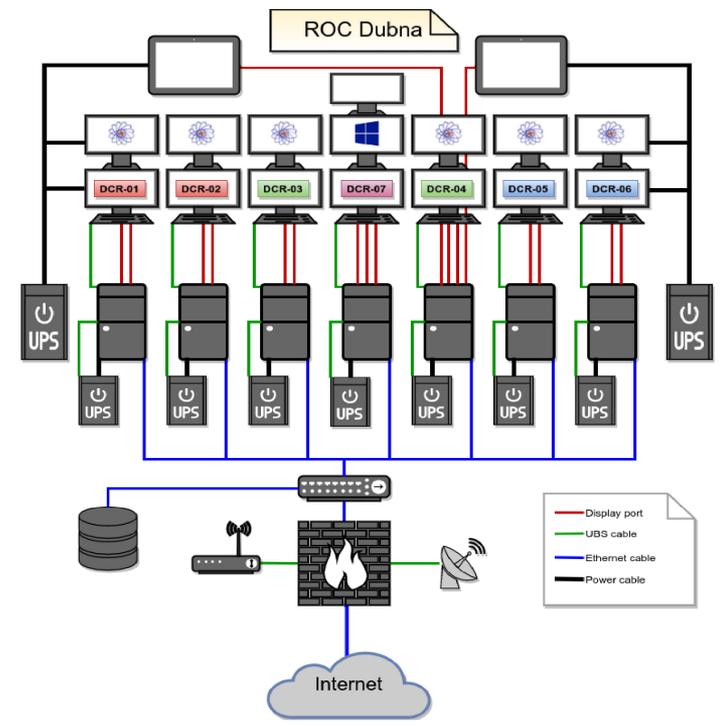
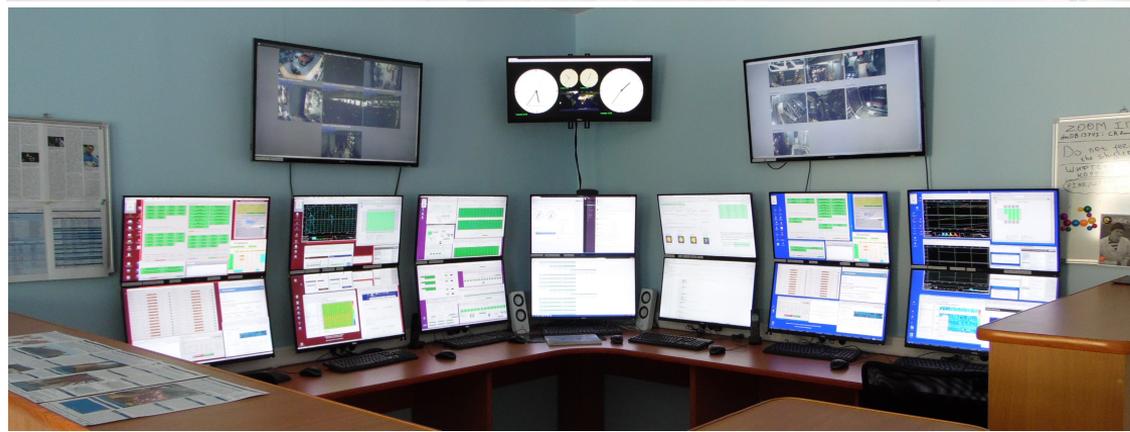
- 50 кт водный черенковский детектор
- 11000 20-дюймовых ФЭУ
- реконструкция энергии нейтрино по импульсу e/μ и углу относительно пучка
- идентификация μ/e по форме кольца

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

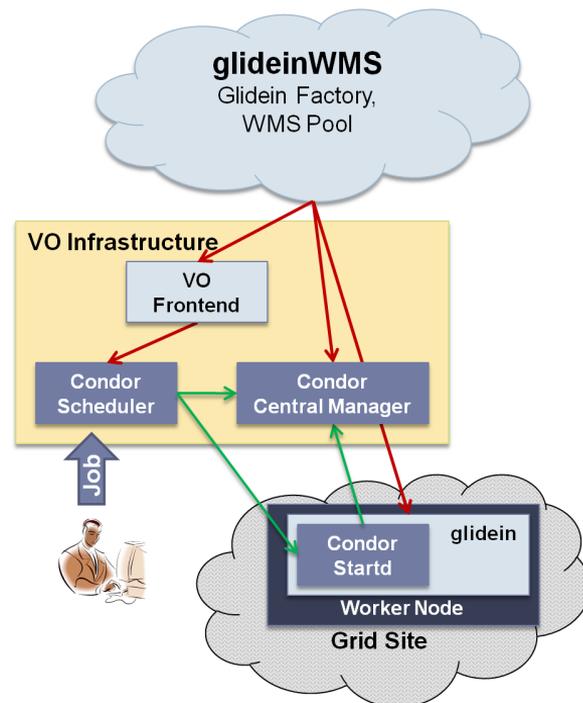


$$H_0 = U E_\nu U^\dagger \Rightarrow H = H_0 + H_{\text{вещество}} + H_{\text{NSI}}$$

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

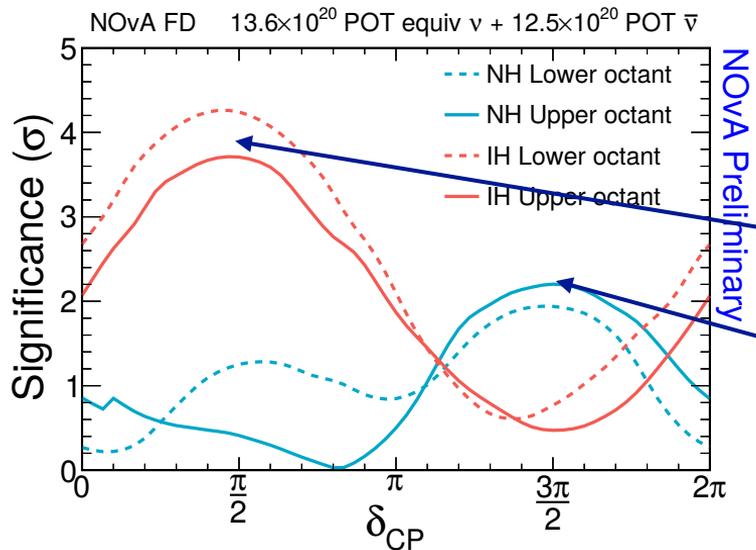


- GRID и Cloud инфраструктура ОИЯИ поддерживает домашние задачи и распределенные ресурсы NOvA для пиковых нагрузок.
- 39 новых серверов, добавленных в облако ОИЯИ, расширили ресурсы на ~1000 ядер ЦП и ~6 ТБ ОЗУ.
- Виртуальные машины для нового кластера и OSG-сайта.
- Возможность обработки локальных задач пользователей внутри ОИЯИ.
- Полная виртуализация компонентов Grid-сайта, впервые реализованная на Grid-сайтах ОИЯИ.
- Развитие системы хранения данных. 17 новых серверов интегрированы в облачную систему Serph, обеспечив более 3,8 ПБ дискового пространства для хранения данных.



Балашов Н.А.

NOvA results: 2020 ana

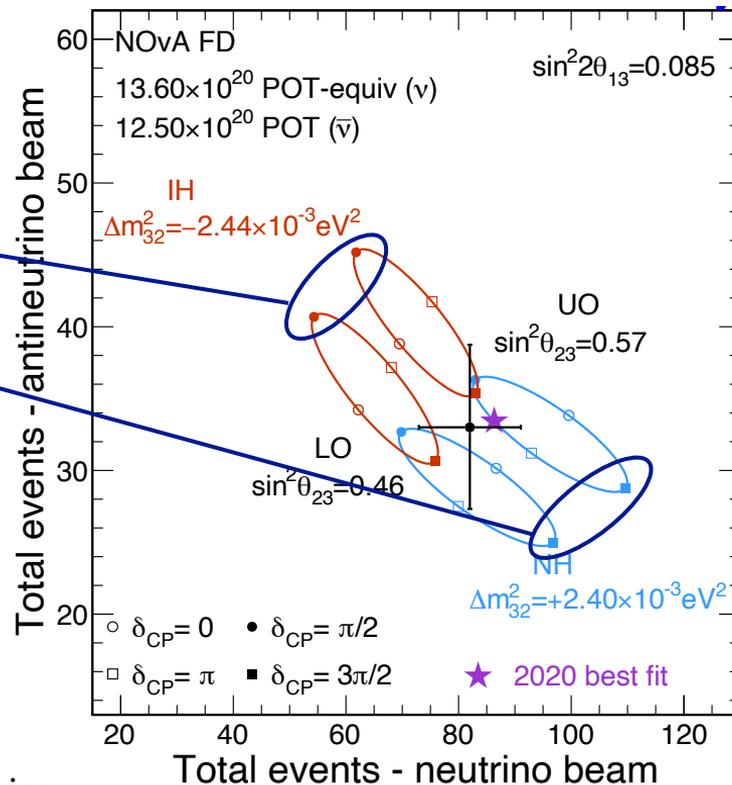


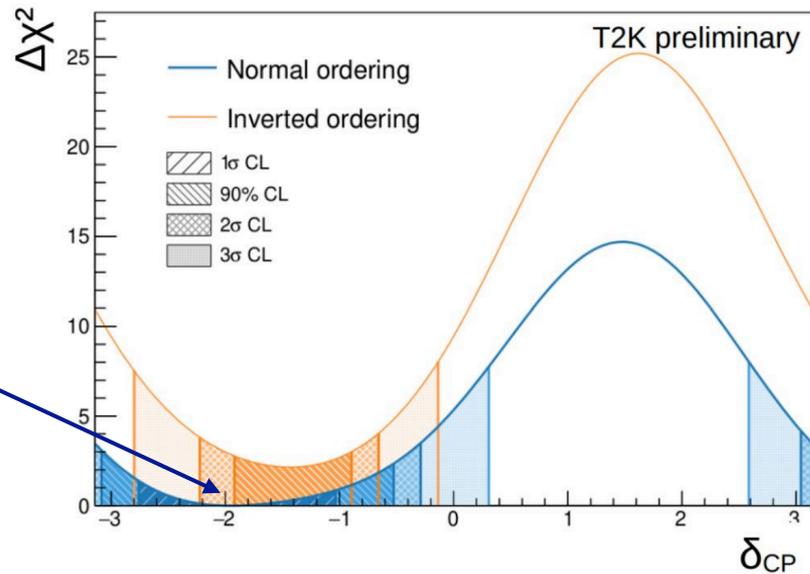
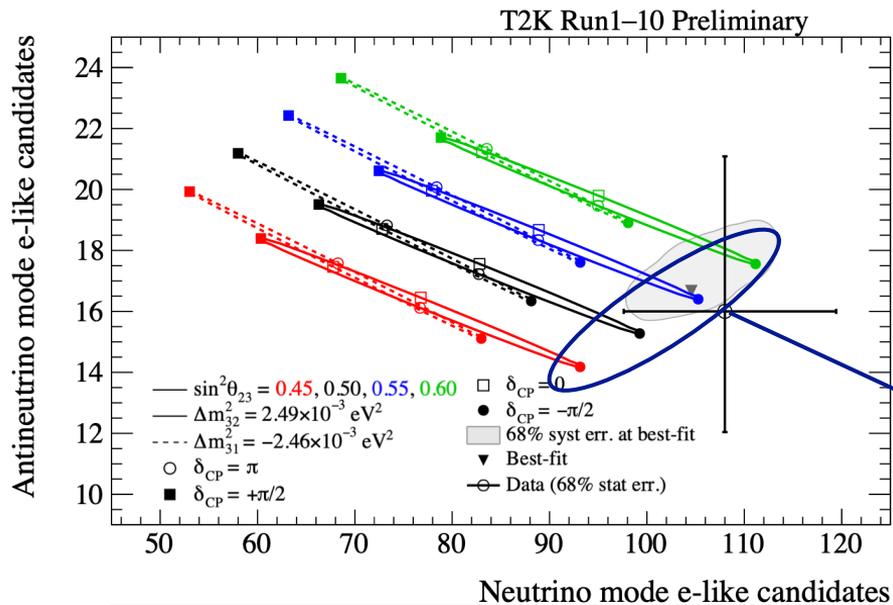
*Disfavor NO, $\delta = 3\pi/2$ at $\sim 2\sigma$.

*Exclude IO, $\delta = \pi/2$ at $> 3\sigma$.

*Combinations that include effect “cancellation” are preferred:

* since such options exist for both octants and hierarchies, results show no strong preferences.





- *Preference of $3\pi/2$ value and normal MO.
- *No CP violation disfavored at $>2\sigma$.
- *Disfavour wide range of δ_{CP} values at $>3\sigma$.

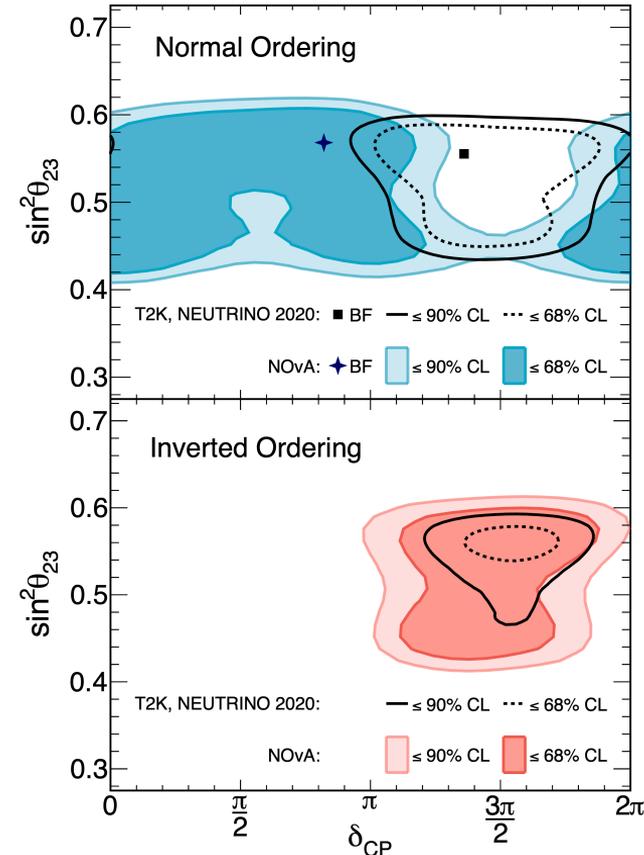
Tension

- * Huge excitement due to this tension.
- * Two main hypothesis about the reasons:
 - * true inverted hierarchy in Nature;
 - * non-standard interactions (NSI):

$$H = \frac{1}{2E} \left[UM^2U^\dagger + a \begin{pmatrix} 1 + \epsilon_{ee} & \epsilon_{e\mu} & \epsilon_{e\tau} \\ \epsilon_{e\mu}^* & \epsilon_{\mu\mu} & \epsilon_{\mu\tau} \\ \epsilon_{e\tau}^* & \epsilon_{\mu\tau}^* & \epsilon_{\tau\tau} \end{pmatrix} \right]$$

- * $\epsilon_{\alpha\beta}$ - the size of the new interaction relative to the weak interaction.
- * Longer baseline = larger NSI effect.
- * Could be due to new heavy states or light mediators.
- * But significance is small ($\sim 2\sigma$), both experiments will keep taking data.

T2K sees asymmetry in ν_e and $\bar{\nu}_e$ rate, while NOvA doesn't.

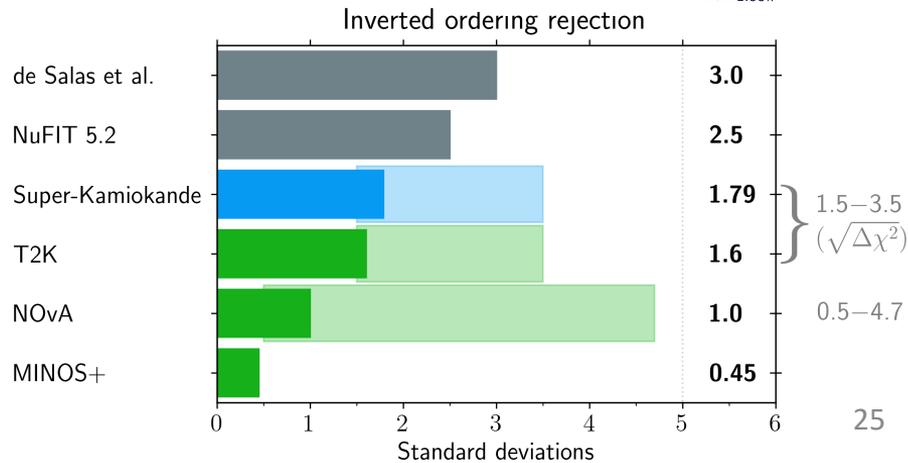
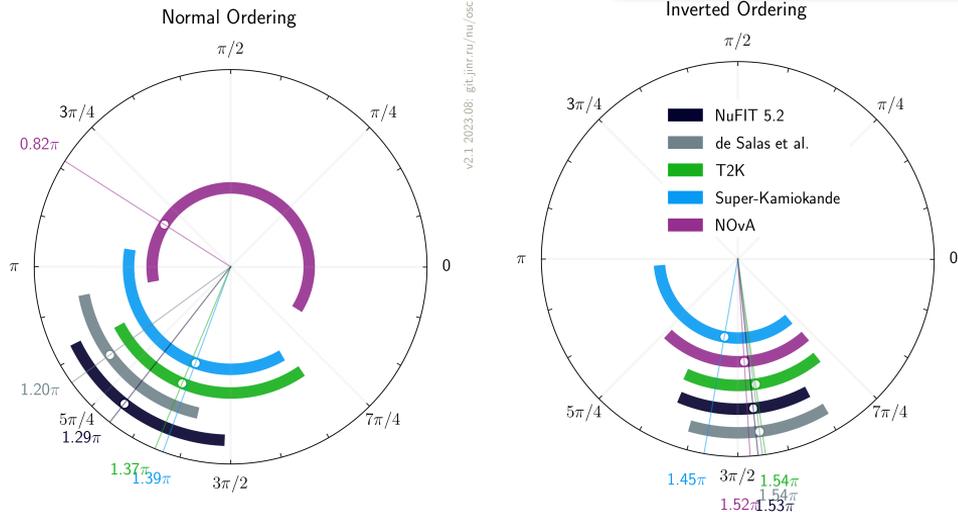


Tension

- * Huge excitement due to this tension.
- * Two main hypothesis about the reasons:
 - * true inverted hierarchy in Nature;
 - * non-standard interactions (NSI):

$$H = \frac{1}{2E} \left[UM^2U^\dagger + a \begin{pmatrix} 1 + \epsilon_{ee} & \epsilon_{e\mu} & \epsilon_{e\tau} \\ \epsilon_{e\mu}^* & \epsilon_{\mu\mu} & \epsilon_{\mu\tau} \\ \epsilon_{e\tau}^* & \epsilon_{\mu\tau}^* & \epsilon_{\tau\tau} \end{pmatrix} \right]$$

- * $\epsilon_{\alpha\beta}$ - the size of the new interaction relative to the weak interaction.
- * Longer baseline = larger NSI effect.
- * Could be due to new heavy states or light mediators.
- * But significance is small ($\sim 2\sigma$), both experiments will keep taking data.



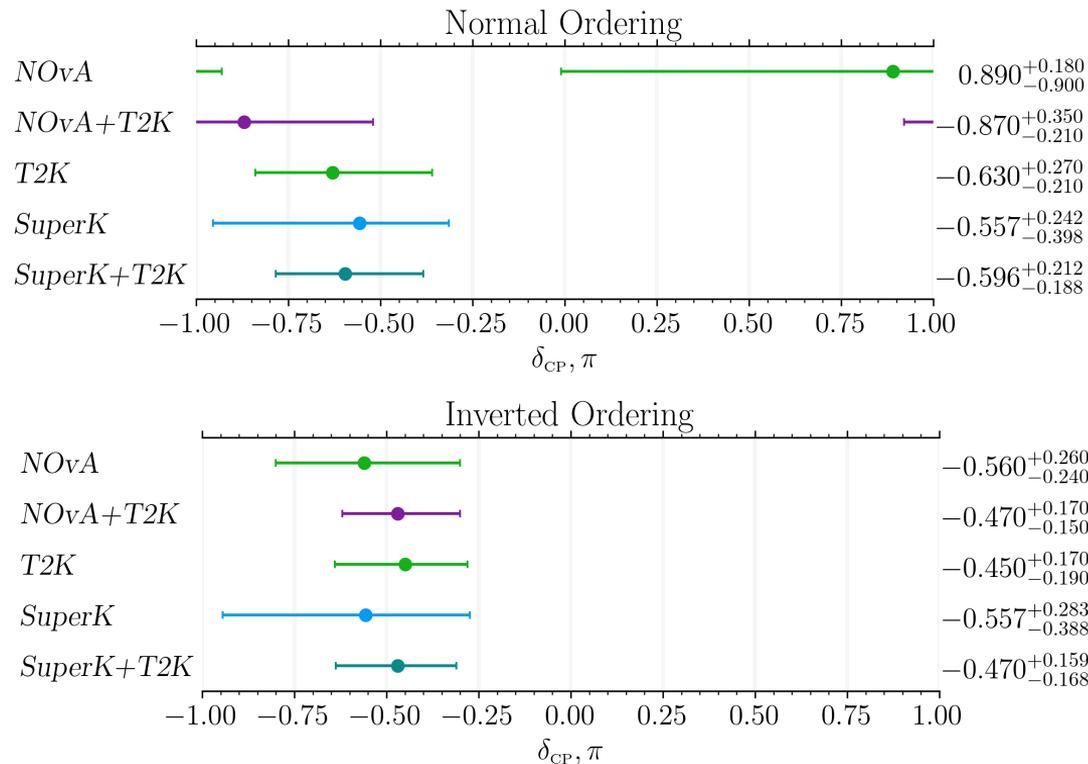
Global Comparisons: δ_{CP}

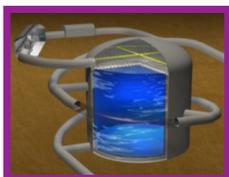
*The δ_{CP} measurements are consistent across all experiments and their combinations.

*The uncertainty on δ_{CP} remains large.

*NOvA and T2K will keep taking data, possible $\sim 2\sigma$ and $\sim 3\sigma$ sensitivity to CPV for $\delta_{CP} = 3\pi/2$.

*Final measurement of δ_{CP} will be the task for HyperK and DUNE.





Hyper-Kamiokande

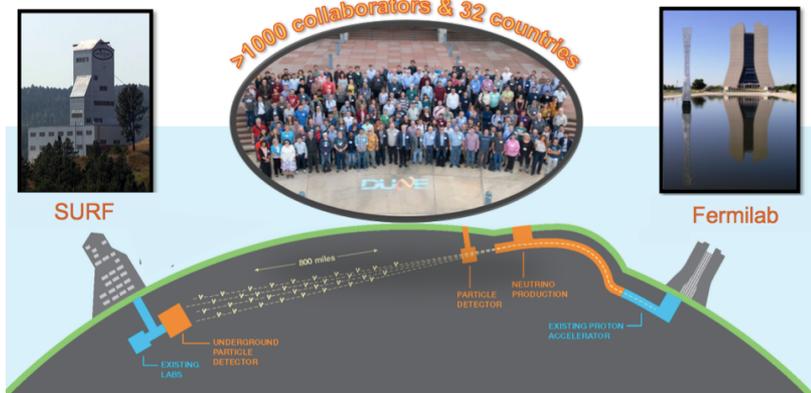


Hyper-K

- Усовершенствованный нейтринный пучок J-PARC (Токай)
- Водный черенковский детектор Hyper-Kamiokande
- 8x больше полезная масса
- 2.5x интенсивней пучок

DUNE

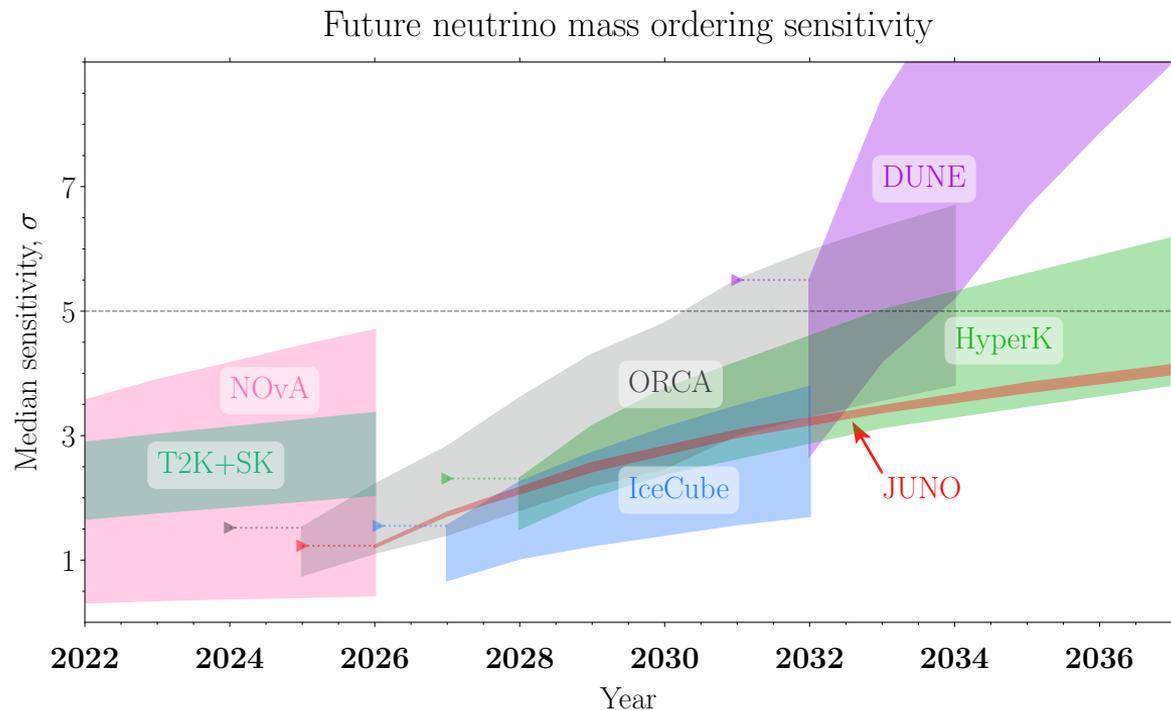
- Существенное обновление ускорительного комплекса NuMI (Лаборатория им. Э.Ферми)
- Жидко-аргоновый TPC
- База осцилляции 1300 км
- Подземная лаборатория Сэнфорд



Three-flavo(u)r oscillations

Future landscape: neutrino mass ordering

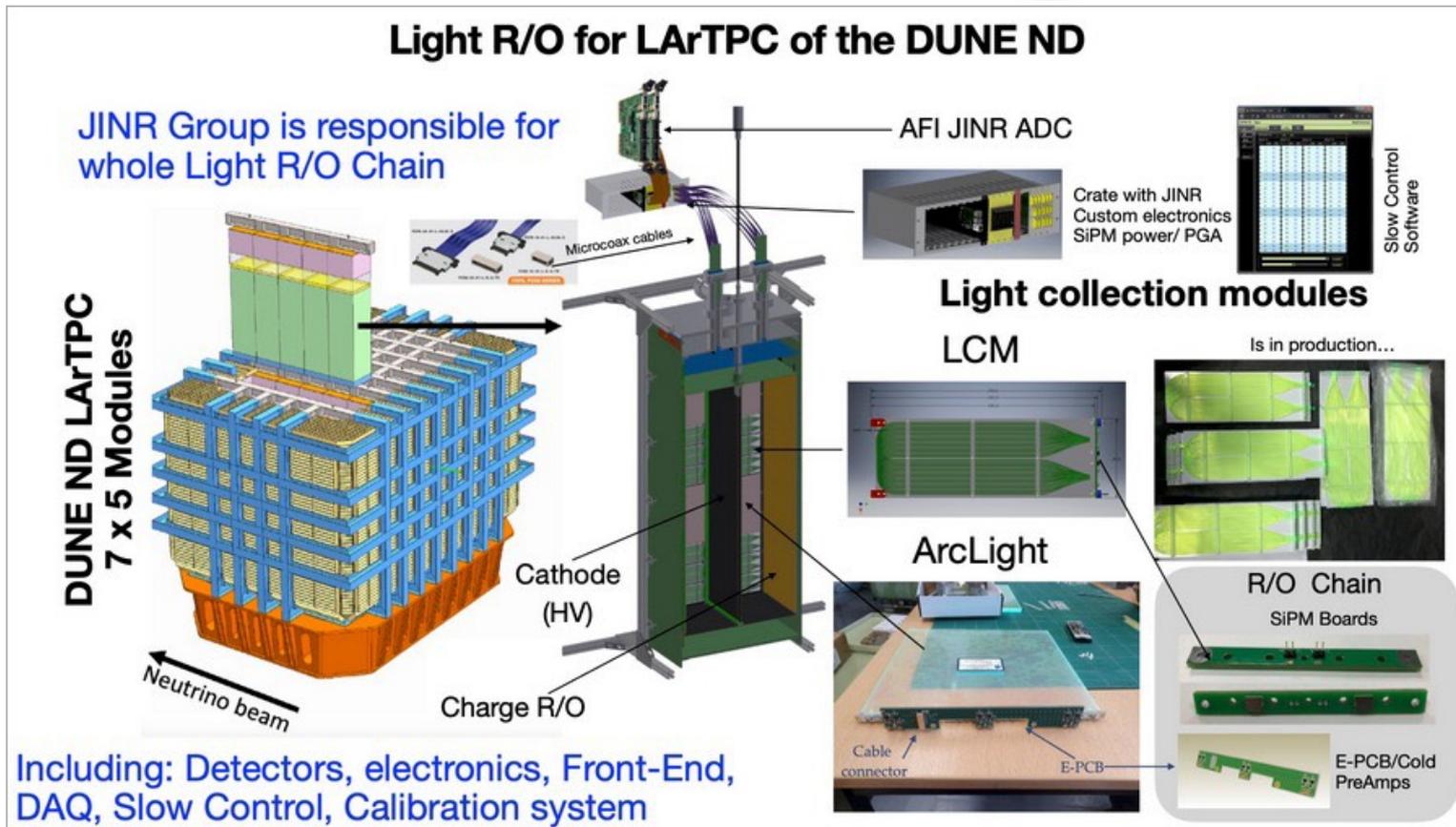
- * NOvA's sensitivity is 2020 ana projection.
- * Realistically $\sim 2\sigma$ along for currently running experiments (w/o joint analyses).
- * There is a good chance that NOvA's result will be still very impactful measurement up to ~ 2028 .
- * Future is very competitive.



v4 2023.06: git.jinr.ru/nu/osc

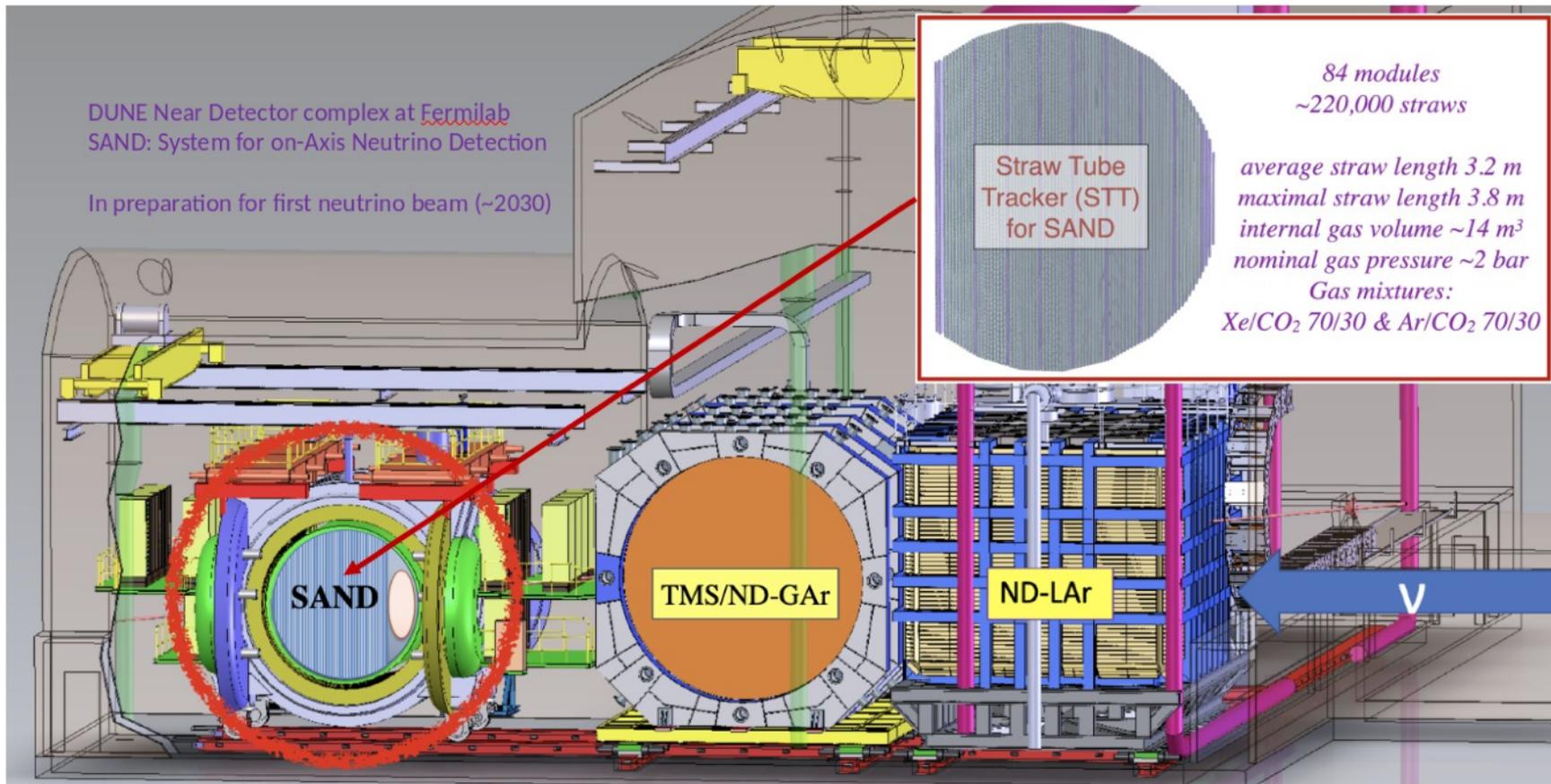
- С 2021 года изготовлено 4 прототипа модулей ВПК.
- Модули были протестированы на данных атмосферных мюонов.
- Пройден этап согласования конструкции и её эксплуатации в ND-LAr (PDR).
- 2023-2024 идёт подготовка к сборке модулей 2x2 прототипа для тестового нейтринного пучка в Лаборатории Ферми.
- Изготовление 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 Селюнина А.С. 9/3/2023





DUNE Near Detector complex at Fermilab
SAND: System for on-Axis Neutrino Detection

In preparation for first neutrino beam (~2030)



Straw Tube
Tracker (STT)
for SAND

84 modules
~220,000 straws

average straw length 3.2 m
maximal straw length 3.8 m
internal gas volume ~14 m³
nominal gas pressure ~2 bar
Gas mixtures:
Xe/CO₂ 70/30 & Ar/CO₂ 70/30

- FASER is aimed to detect TeV-scale neutrinos of all 3 flavours → **First collider neutrino experiment!**
- FASER has been successfully operating at CERN since 2022:
 - 7 FASERV modules have been irradiated, $\sim 140 \text{ fb}^{-1}$ collected to date, with $\sim 180 \text{ fb}^{-1}$ more collision data expected until the end of LHC Run 3.
- Recent physics results from FASER and FASERV presented:
 - First measurement of the ν_e and ν_μ interaction cross sections at the LHC with FASER's emulsion detector! These results demonstrate the ability to carry out ν measurements with emulsion-based detectors in the challenging conditions at the LHC.
 - New limits on parameter space for Dark Photons and for ALPs obtained.

Дмитриевский С.Г.

Perspectives:

- FASER was approved for HL-LHC (Run 4).
- Upgrade of FASER's pre-shower detector is planned to enhance ALPs sensitivity.
- Forward Physics Facility (FPF) at CERN → planned project to build new experimental cavern in the HL-LHC era for an improved physics programme, including FASER2 and FASERV2.

- Цель предлагаемого проекта: продолжение участия ОИЯИ в экспериментах с ускорительными нейтрино и укрепление позиций в NOvA, T2K, FASER(ν) и NA65(DsTau).

Ожидаемые результаты

- Получение новых осцилляционных результатов NOvA и T2K на обновленной статистике работы экспериментов до 2027 г.
- NOvA. Измерение иерархии масс нейтрино и δCP со значимостью $\leq 4\sigma$ и $\leq 2\sigma$ соответственно.
- T2K. δCP может быть определена с точностью лучше 23 градусов для всех возможных значений, а нарушение CP может быть обнаружено со статистической значимостью больше 3σ (5σ) для 76% (57%) диапазона параметр δCP .
- Совместные анализы данных NOvA+T2K и потенциально с другими экспериментальными данными.

- Цель предлагаемого проекта: продолжение участия ОИЯИ в экспериментах с ускорительными нейтрино и укрепление позиций в NOvA, T2K, FASER(ν) и NA65(DsTau).

Ожидаемые результаты NOvA

- Мониторинг работы триггера регистрации нейтрино от Сверхновой. Подготовка к анализу данных в случае полученного сигнала.
- Новые ограничения на существование магнитного монополя.
- Измерения спектров атмосферных мюонов для различных условий.
- Первый анализ спектров/осцилляций атмосферных нейтрино.
- Эксплуатация ROC-Dubna и вычислительных ресурсов МИВК.

- Цель предлагаемого проекта: продолжение участия ОИЯИ в экспериментах с ускорительными нейтрино и укрепление позиций в NOvA, T2K, FASER(ν) и NA65(DsTau).

Ожидаемые результаты FASER(ν) и NA65 (DsTau)

- Обработка и анализ данных Run 3 эксперимента FASER. По настоящее время лишь небольшая часть данных обработана.
- Ожидается обнаружение первых тау-нейтрино высокой энергии от LHC.
- Анализ данных DsTau, полученных в 2021-22 гг. 2×10^8 взаимодействий протонов, ожидается порядка 10^5 событий с рождением чарма и $\sim 10^3$ событий $D_s \rightarrow \tau \rightarrow X$.



Спасибо за внимание!