

Участие ОИЯИ в эксперименте T2K

Ю.И. Давыдов

22 ноября 2022



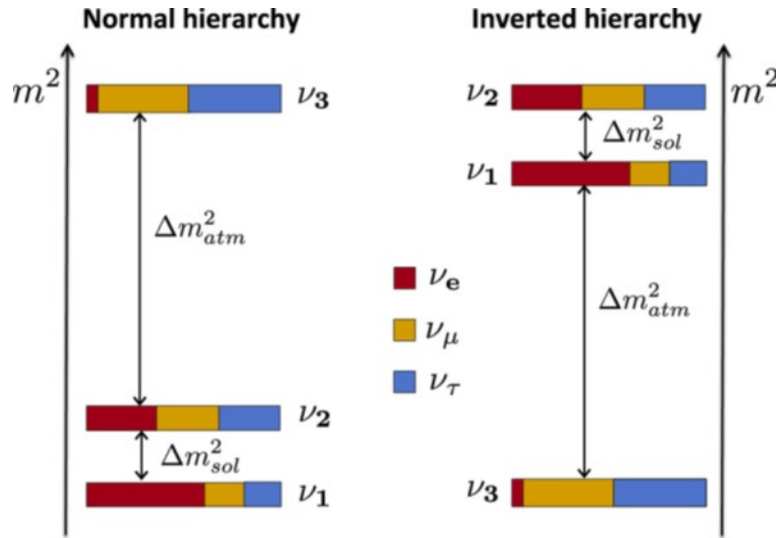


Осцилляции нейтрино



Вероятность осцилляций зависит от:

- Энергии нейтрино
- Пройденного расстояния
- Разности масс ν_1, ν_2, ν_3
- Параметров матрицы Понтекорво-Маки-Нагава-Сакаты (PMNS matrix)
 - Три угла смешивания $\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}$
 - Разность масс $\Delta m_{32}^2, \Delta m_{13}^2$
 - Фаза δ_{cp}



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

$$U = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{+i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}$$

Атмосфера
ускорители

Ускорители
реактор

Солнце
реактор



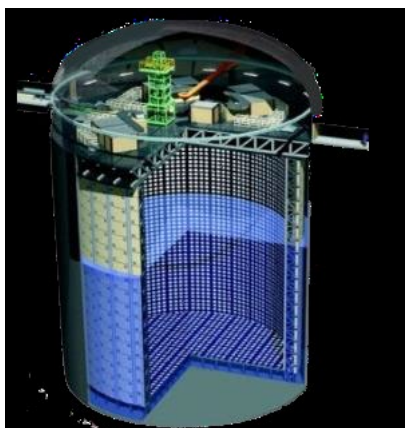
Эксперимент T2K



T2K (Tokai to Kamioka) - эксперимент по регистрации осцилляций нейтрино на длинной базе

- комплекс J-PARC в Токай, где производится пучок нейтрино и измеряется его спектр в ближнем детекторе
- район Камиока, где свойства пучка измеряются в дальнем детекторе после прохождения дистанции в 295 км.

В эксперименте участвуют около 500 человек из ~ 70 институтов



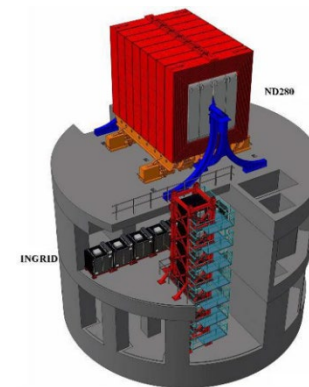
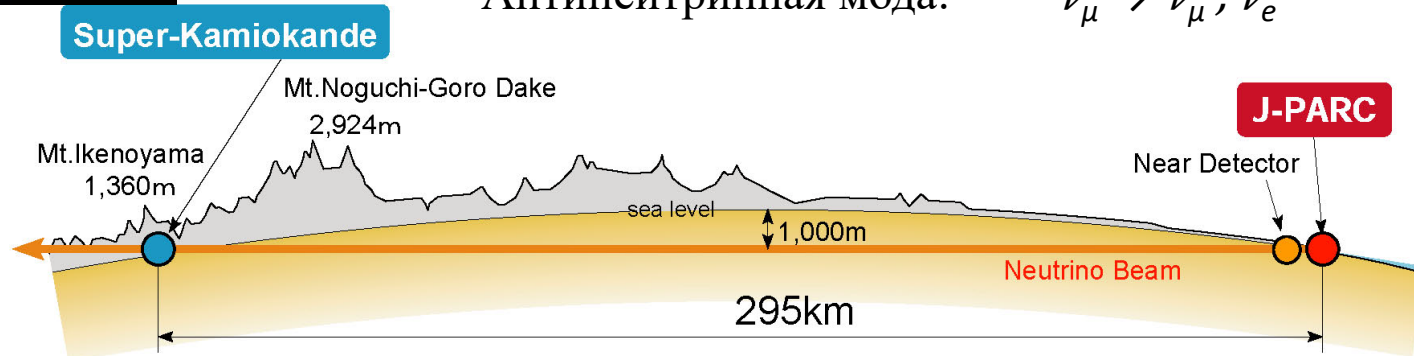
Целями T2K-II являются измерения параметров осцилляций нейтрино θ_{23} and Δm_{32}^2 с точностью $1,7^\circ$ и 1% соответственно, а также подтверждение на уровне 3σ или более асимметрии вещество-антивещество в нейтринном секторе в широком диапазоне возможных значений δ_{cp} - параметра, ответственного за нарушение CP-четности

Нейтринная мода:

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

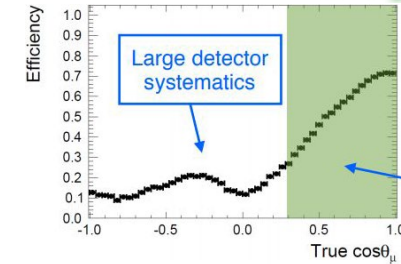
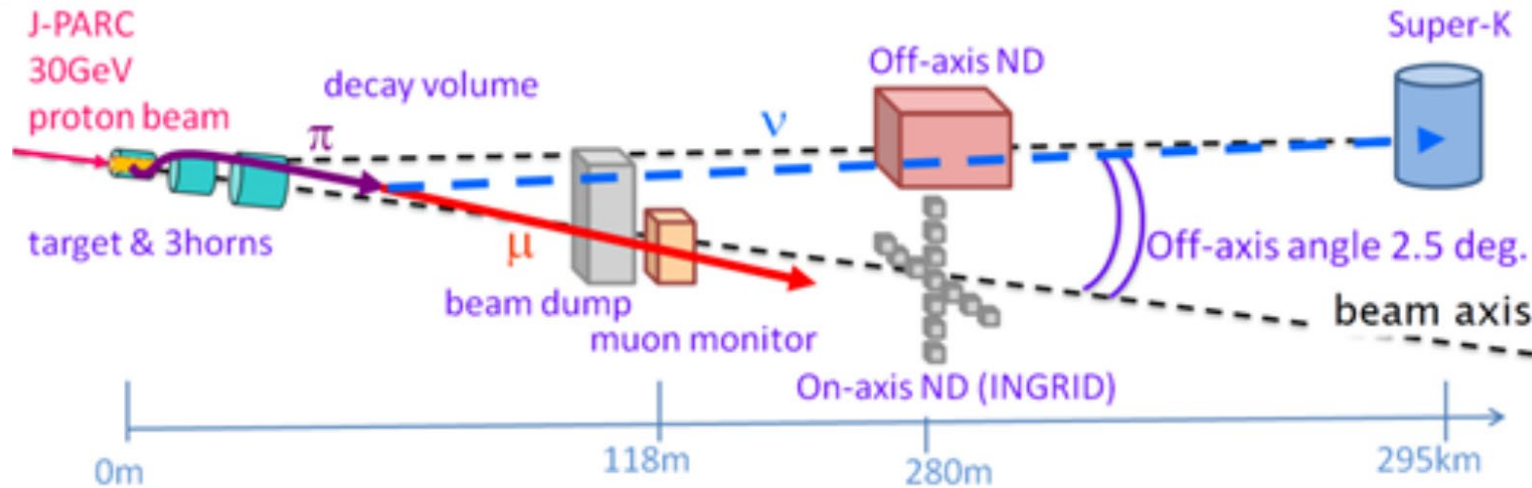
Антинейтринная мода:

$$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_e$$



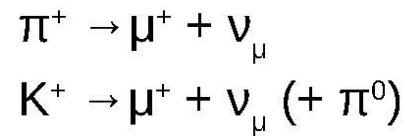


Пучок нейтрино

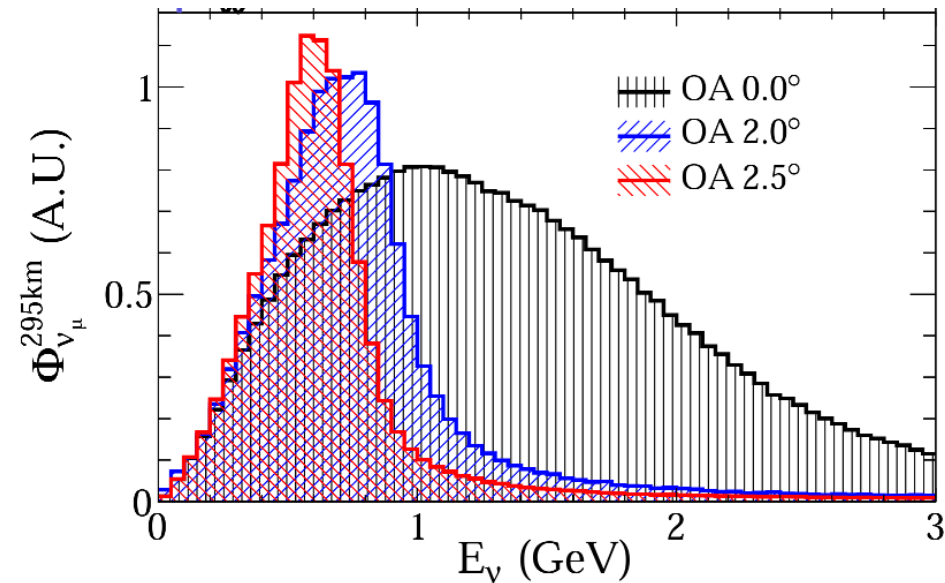
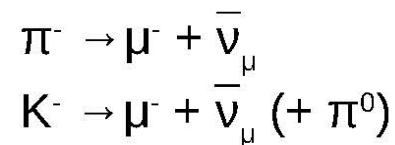


Адроны рождаются при падении 30 ГэВ протонного пучка на углеродную мишень

Нейтринная мода:

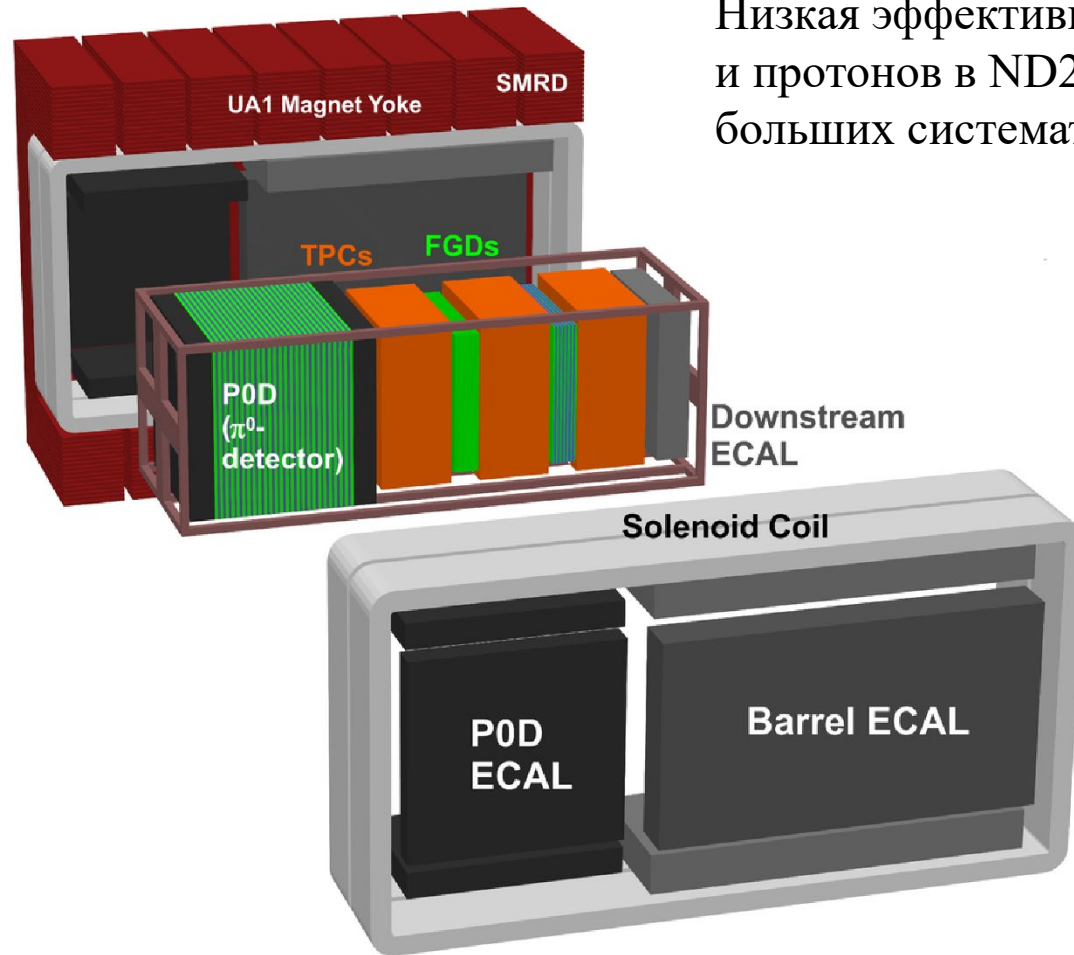


Антинейтринная мода:

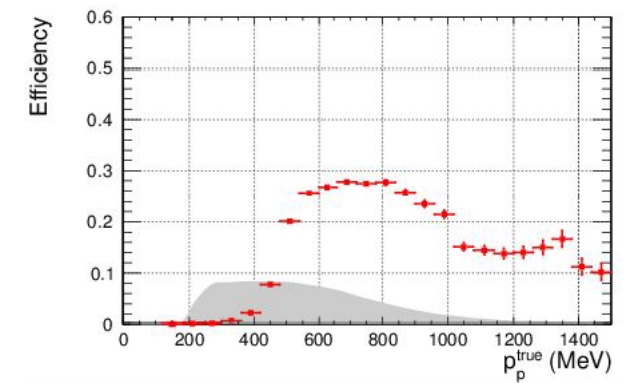
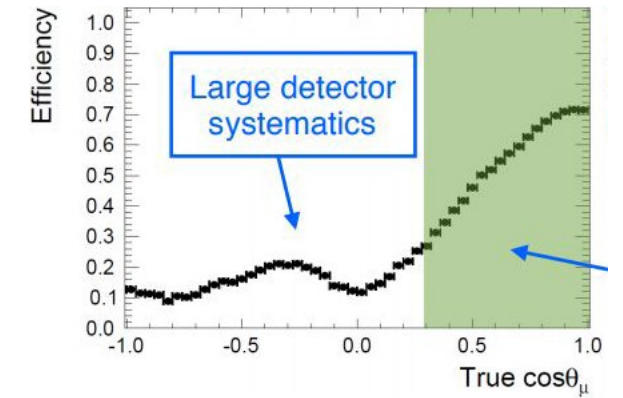




Детектор ND280

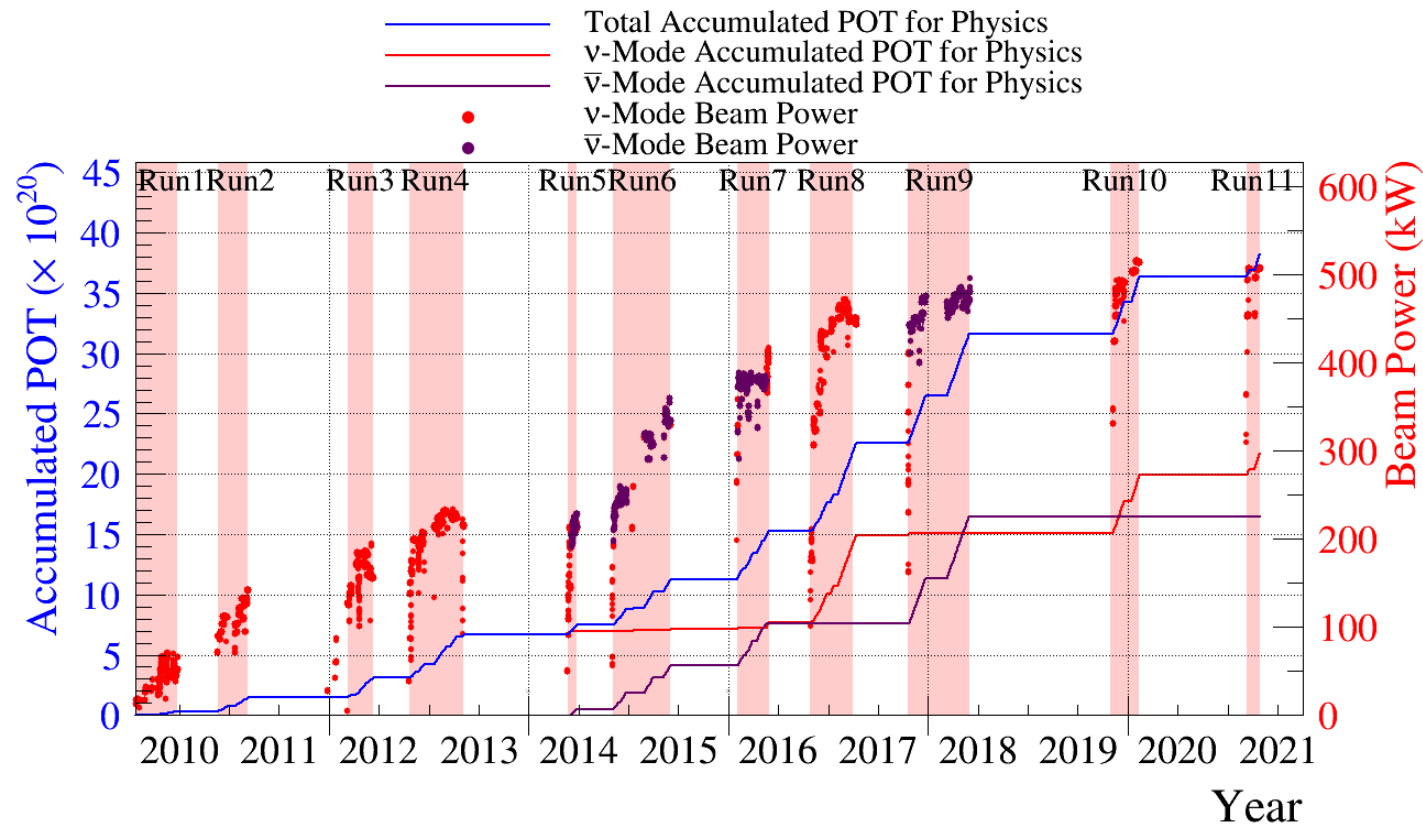


Низкая эффективность регистрации мюонов и протонов в ND280 является источником больших систематических ошибок





Набор данных T2K



Январь 2010 – Апрель 2021
Всего 3.82×10^{21} POT

Нейтрино:	2.17×10^{21} (56.8%)
Антинейтрино:	1.65×10^{21} (43.2%)

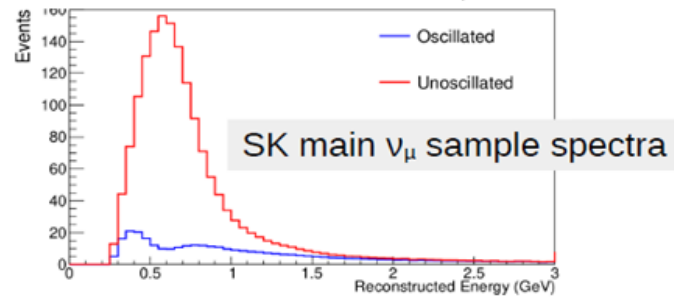
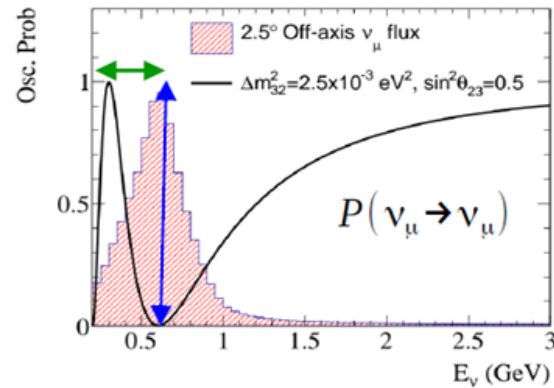


Чувствительность к осцилляциям

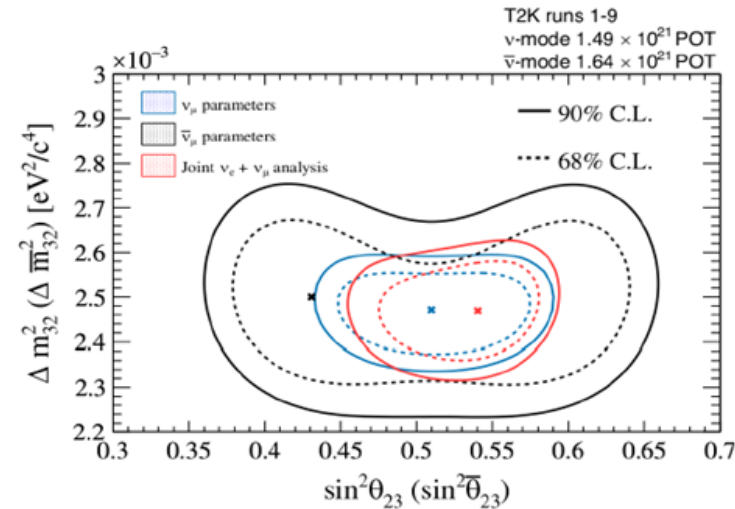


- Muon (anti-)neutrino disappearance gives sensitivity to $\sin^2(2\theta_{23})$ and $|\Delta m_{32}^2|$
- θ_{23} octant sensitivity from appearance channel

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{E}\right)$$



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2(\theta_{23}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{E}\right)$$



Phys. Rev. D 103, L011101 (2021)



Текущее состояние



- Основным результатом T2K является измерение фазы δ_{cp} . Текущие данные T2K свидетельствуют о сильном нарушении CP, CP-сохранение исключено при 90% CL. Данные эксперимента NOvA продолжают предпочитать сохранение CP-инвариантности.
- T2K отдает небольшое предпочтение нормальной массовой иерархии. Результаты NOvA предпочитают нормальное упорядочивание масс.
- T2K отдает предпочтение верхнему октанту для θ_{23} . Все еще соответствует более низкому октанту и максимальному смешиванию



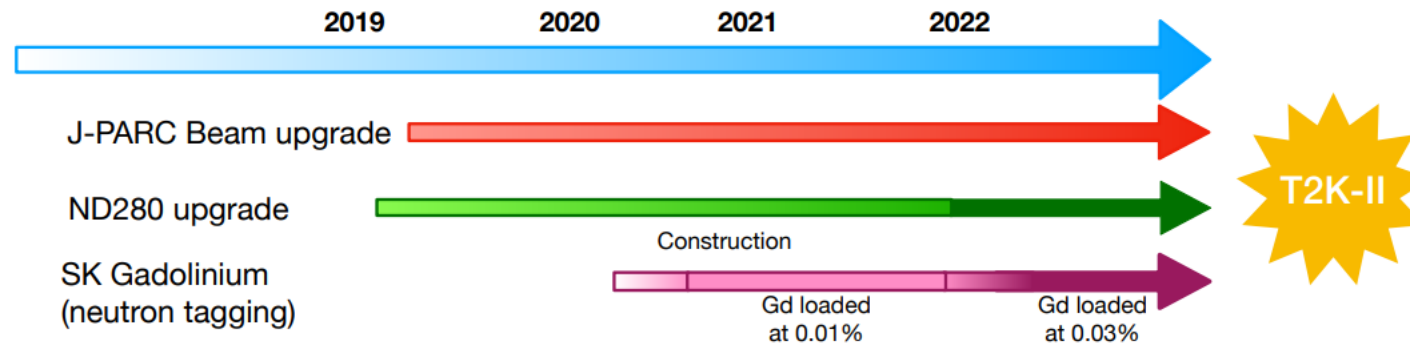
Модернизация T2K $\rightarrow$ T2K-II



Необходимость:

Неизотропная эффективность (в отличие от Супер-Камиоканде)

Высокий порог регистрации протонов (~ 450 MeV/c)



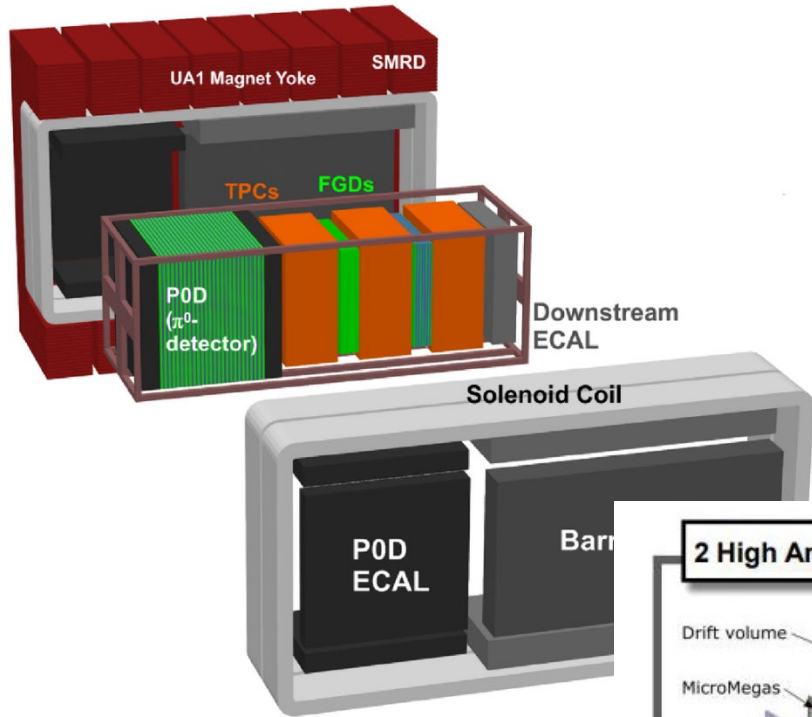
Модернизация канала: 500 кВт $\rightarrow$ 900 кВт (2024) $\rightarrow$ 1.3 МВт (2028)

SK: растворение в воде сульфата Gd (до 0.1%) для регистрации нейтронов (эфф. до 90%)

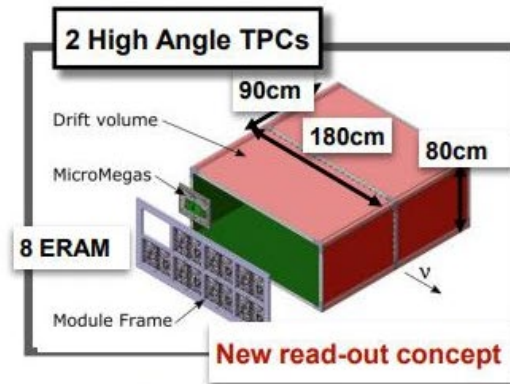
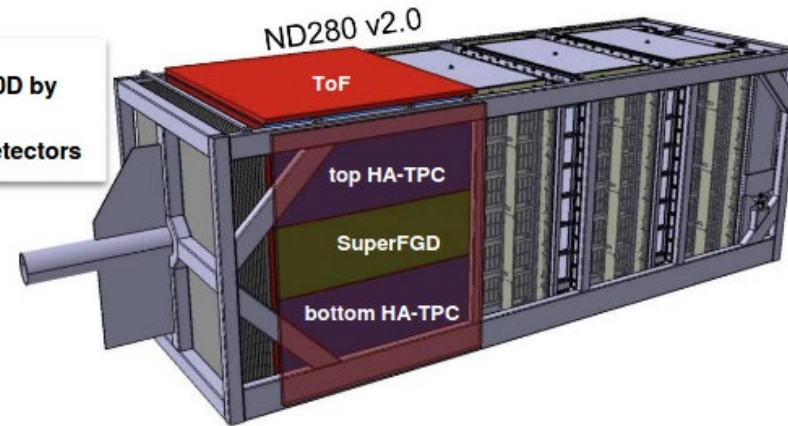
ND280: $\rightarrow$



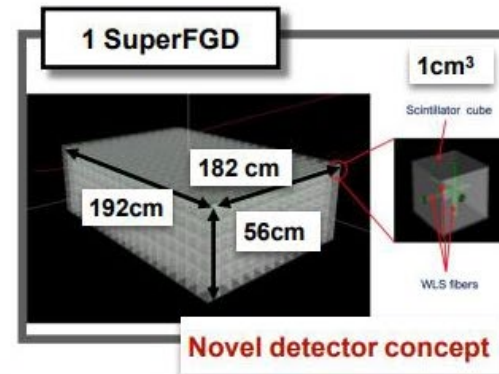
Модернизация ND280



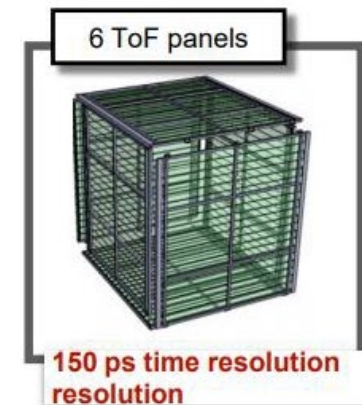
Replace P0D by
new subdetectors



HA-TPC with new
resistive MicroMegas Modules



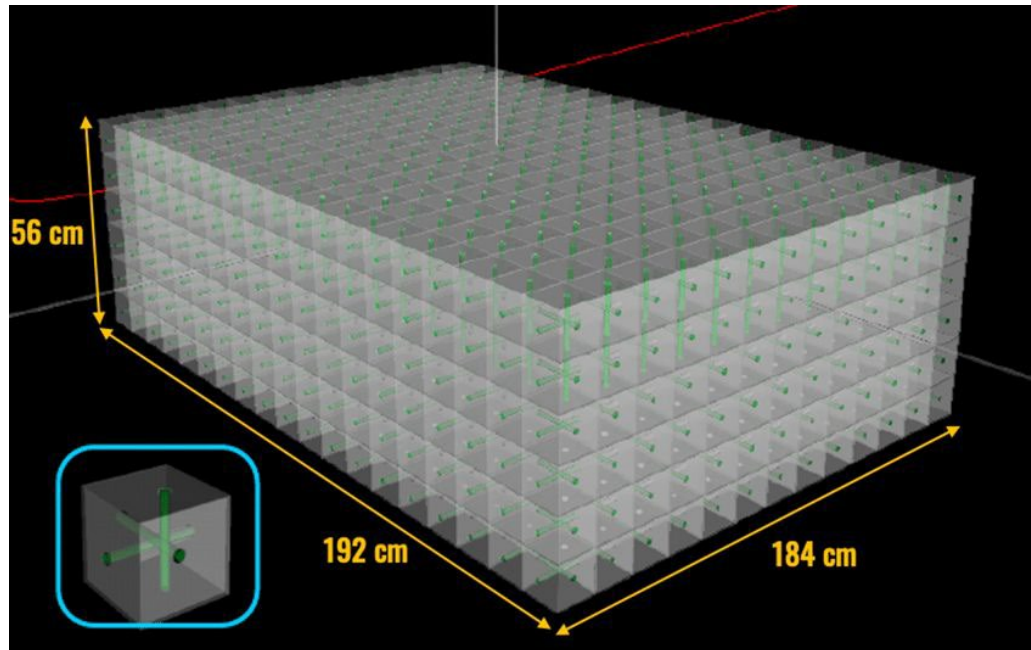
SFGD



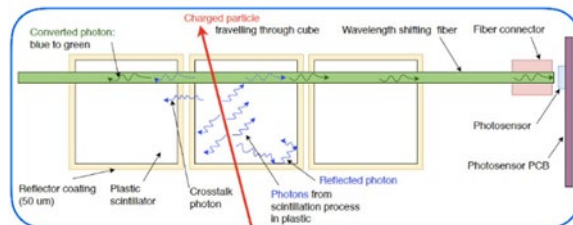
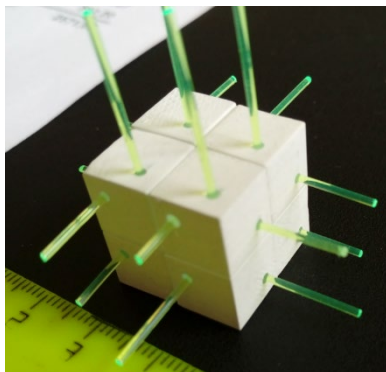
6 плоскостей времяпролетных
детекторов



Концепция SFGD



Размер массива:	192x184x56 см ³
Размер кубиков:	1x1x1 см ³
Количество кубиков:	1978368
Каналов считывания:	56384



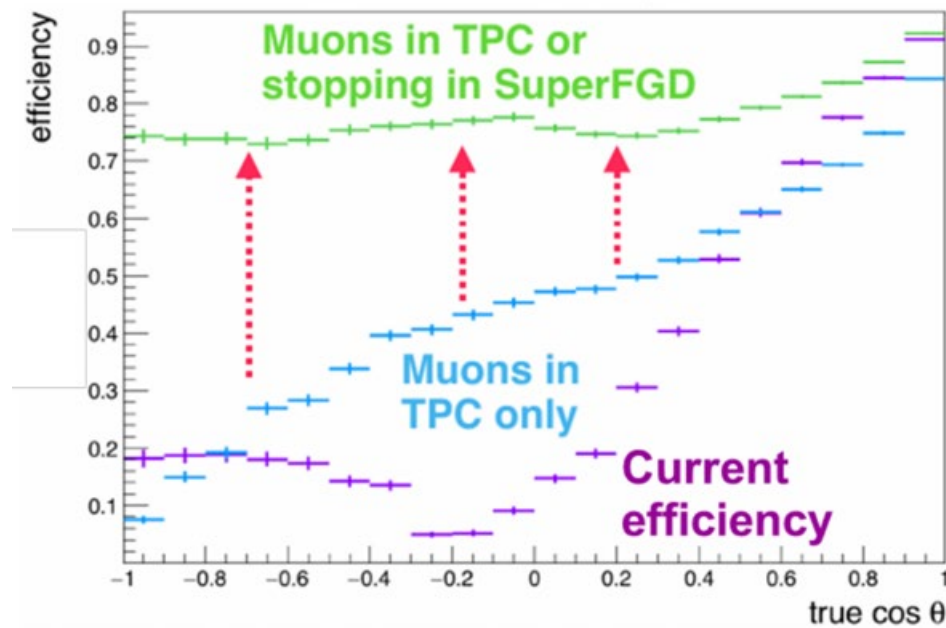
Слой кубиков, собранные на лесках в ИЯИ РАН



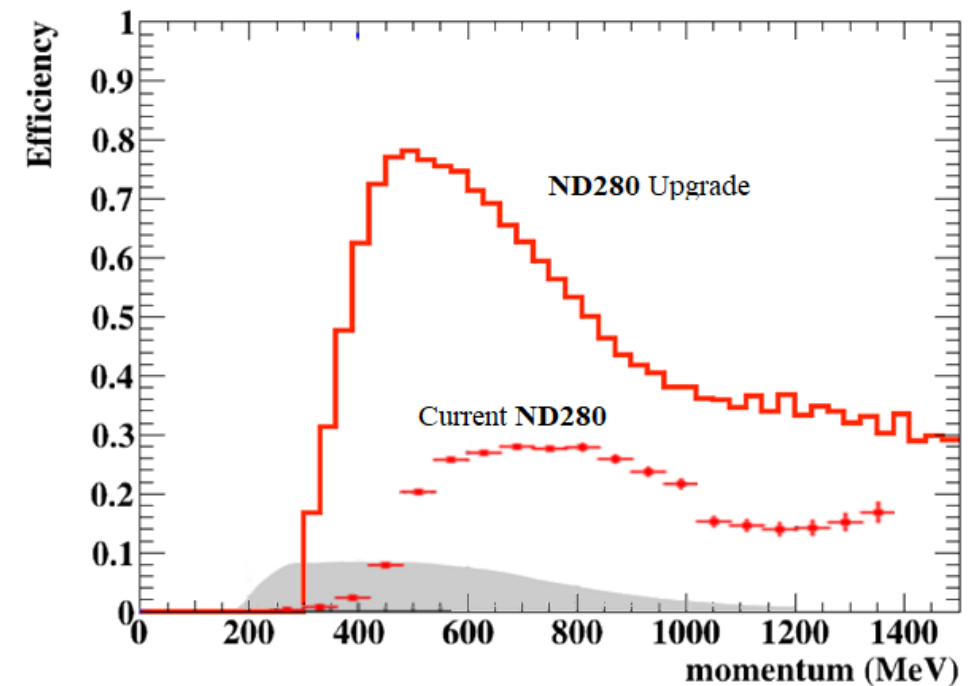
Модернизация ND280: эффективность регистрации



Эффективность регистрации мюонов



Эффективность регистрации протонов





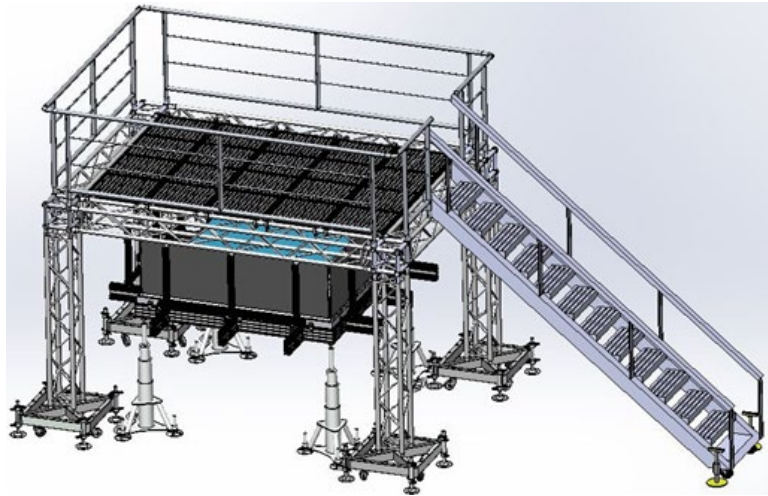
Задачи группы ОИЯИ в T2K



- ❑ Проектирование и создание оснастки для сборки активной мишени SFGD, включающая сборочную платформу, систему доступа сверху для монтажа детектора.
- ❑ Исследование оптических свойств элементов активной мишени SFGD (кубиков).
- ❑ Участие в разработке калибровочной системы SFGD.
- ❑ Участие в изучении выходов вторичных частиц с графитовой мишени (T2K replica target at CERN) в эксперименте NA 62/SHINE в ЦЕРН.
- ❑ Анализ данных по поиску кандидатов на роль легкой темной материи.
- ❑ Выполнение исследований, важных для оценки систематических погрешностей в различного рода анализах на данных ND280

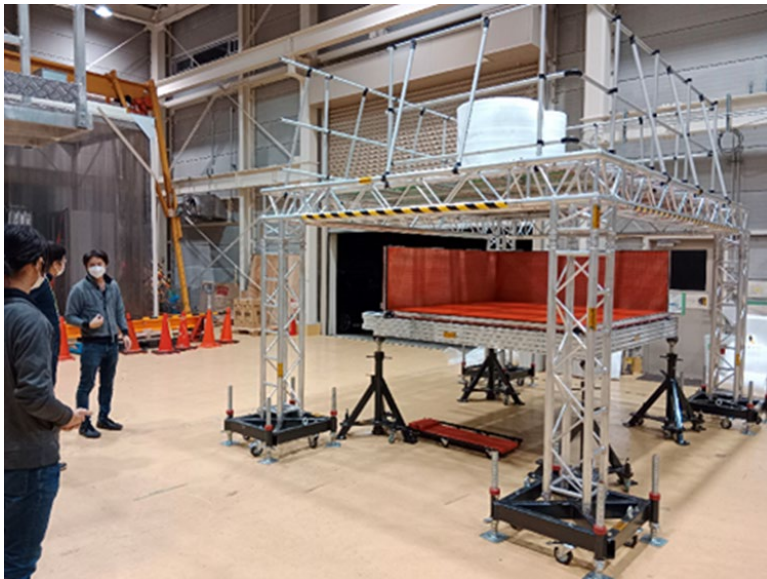


Платформа



- Разработана конструкторская документация
- Проведены расчеты на сейсмоустойчивость системы
- Изготовлены все элементы оснастки и проведена тестовая сборка в Дубне
- В июле 2022 года оборудование доставлено в J-PARC.

J-PARC, Октябрь 2022

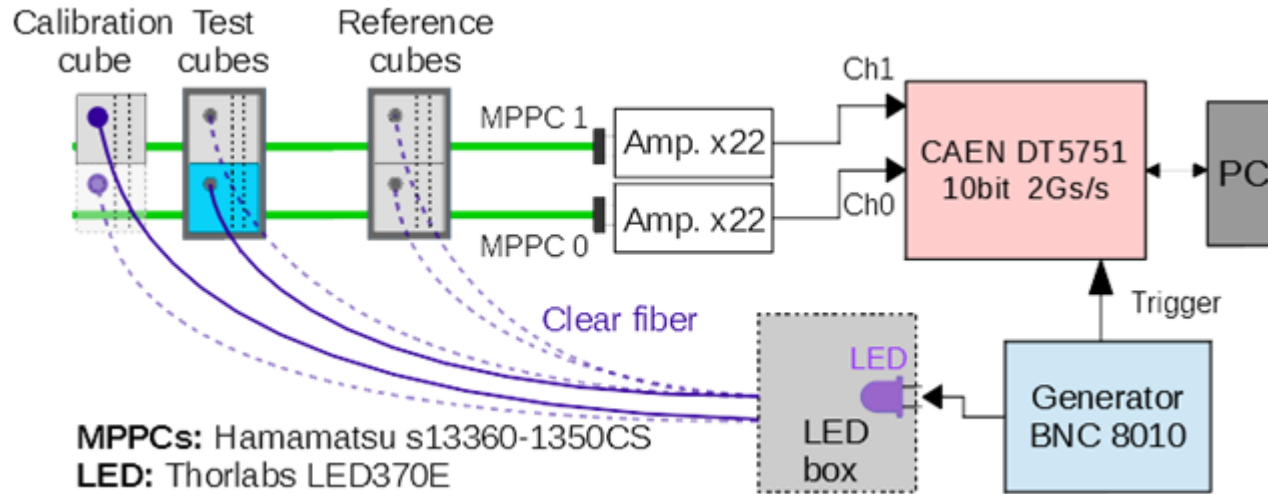


Май 2022

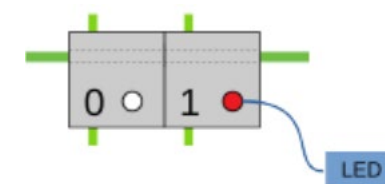
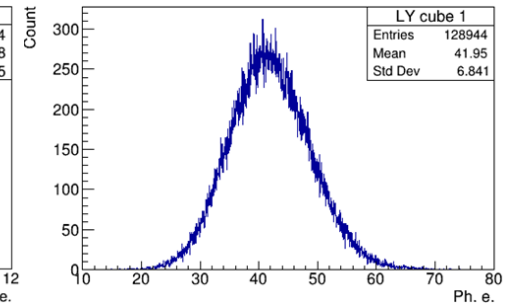
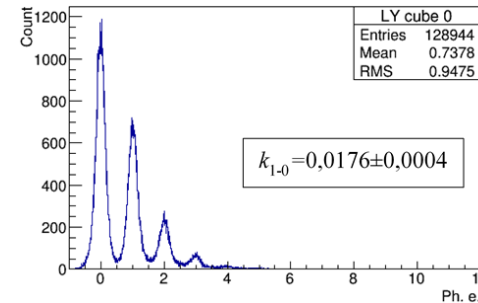
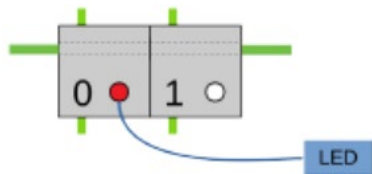
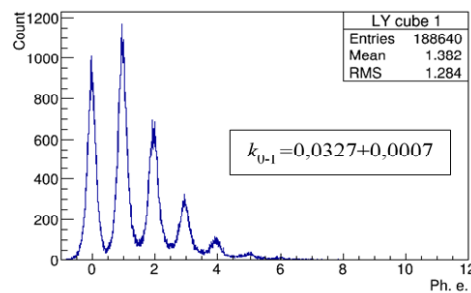
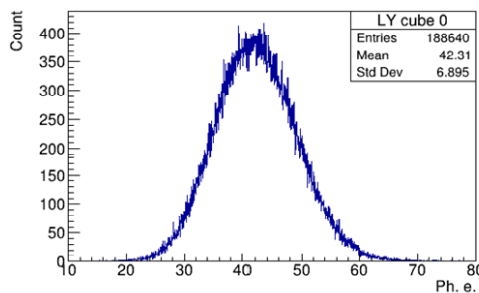




Исследование световых утечек кубиков SFGD



- Применена методика для исследования оптических параметров при помощи светодиода
- Получено значение утечек света через грань на уровне 2.6%
- Обнаружен эффект «позиционной» чувствительности утечек света от расстояния до грани





Система калибровки SFGD



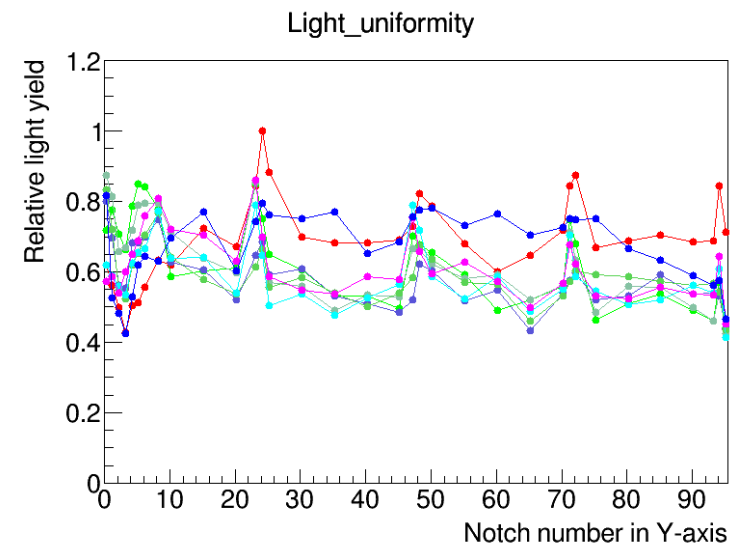
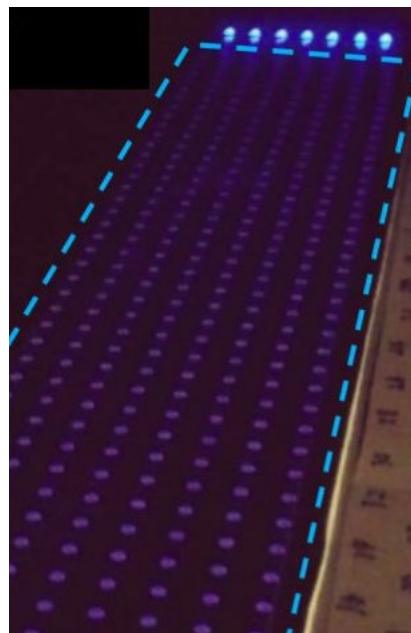
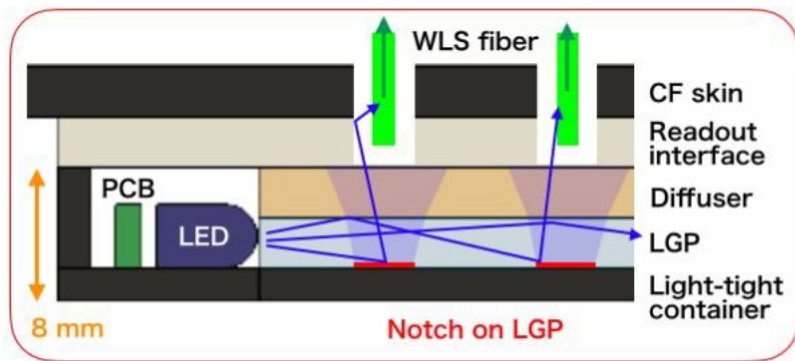
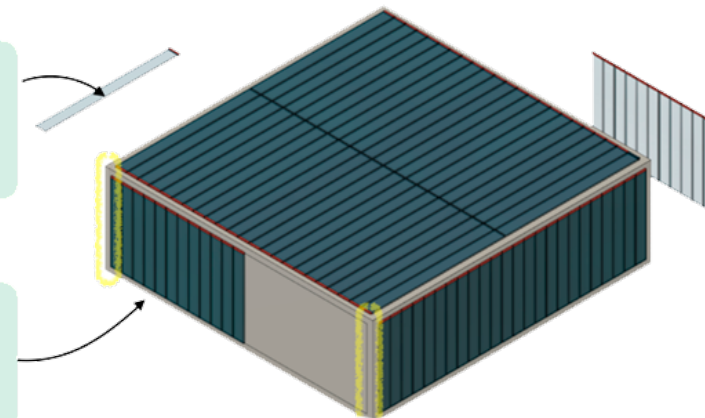
Разработана блок-схема драйвера, платы драйвера для калибровочной системы
Проведены тестовые исследования электроники
Тесты с LGP (Light Guide Module), диффузорами и панелями со светодиодами

Size of the LGP module

- Bottom : ~990x78x8 mm
- Wall : ~570x78x8 mm

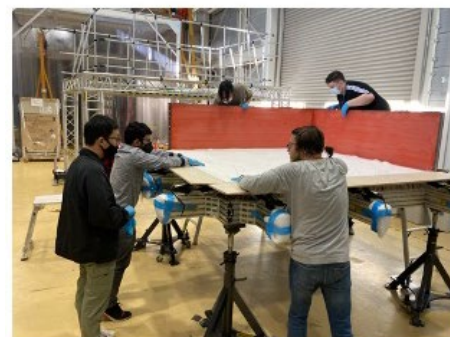
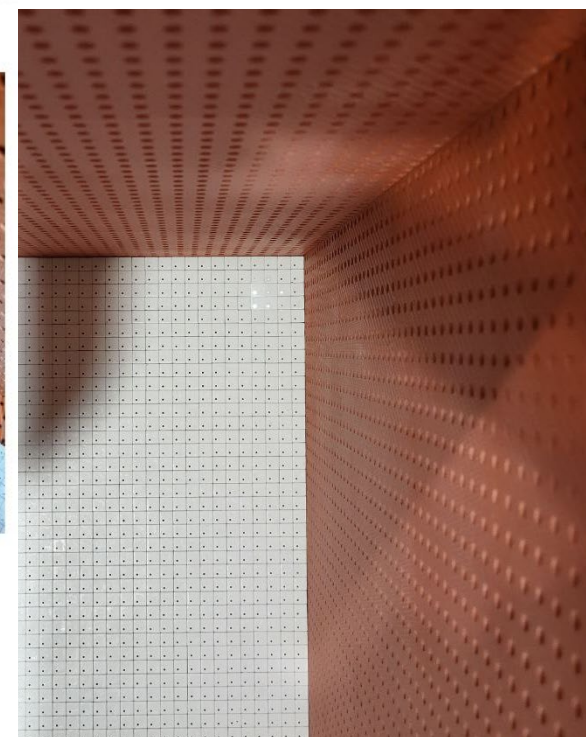
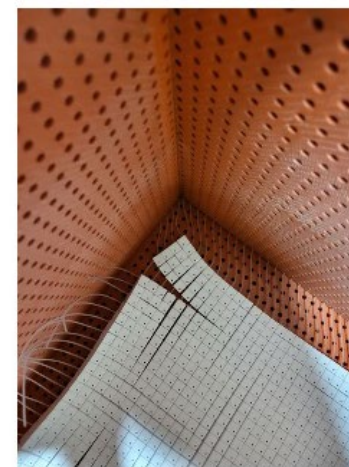
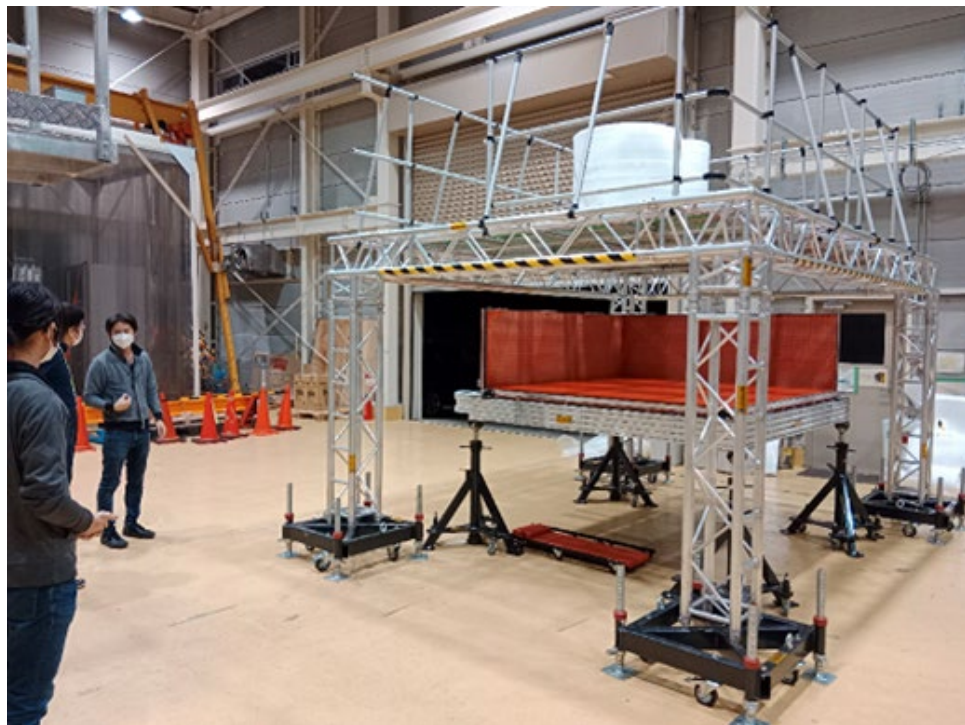
Numbers of the modules

- Bottom : 46 modules
- Wall : 47 modules





Процедура сборки SFGD



18 октября 2022 г.



Процедура сборки SFGD (2)



31 октября 2022 г.

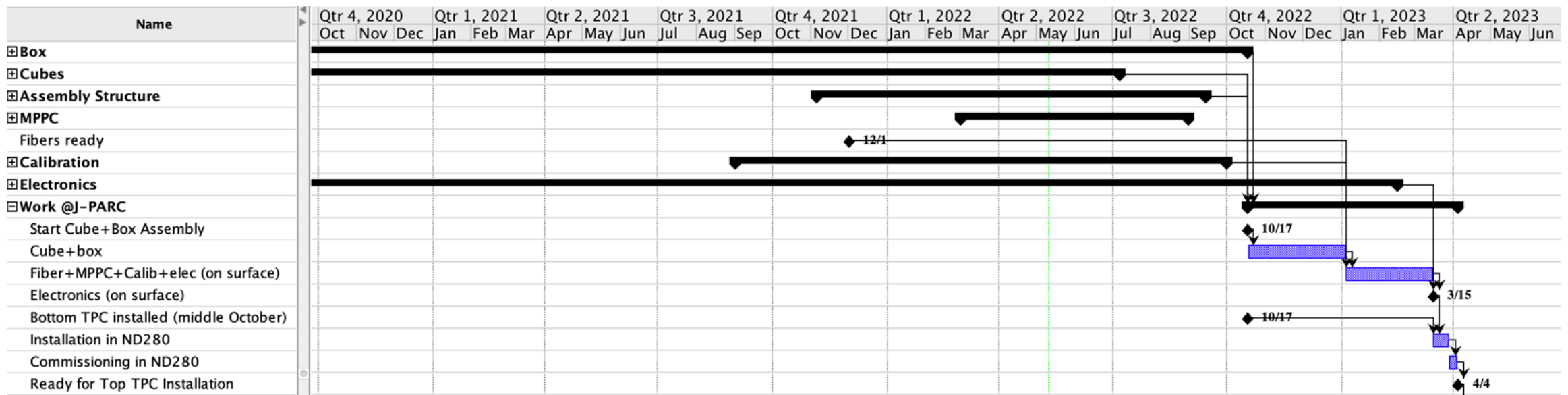


14 ноября 2022 г.

22 ноября 2022 года планируется
уложить последние 4 слоя SFGD!



План-график работ





Вклад сотрудников ОИЯИ в T2K



- ❑ Спроектирована и создана оснастка для сборки активной мишени SFGD, включающая сборочную платформу, систему доступа сверху для монтажа детектора, комплект транспортировочной тары для перевозки массива сцинтилляторов и компонент оснастки. Проведены необходимые расчеты на сейсмоустойчивость. Вся оснастка доставлена в JPARC и в настоящее время используется для сборки SFGD.
- ❑ Разработан и создан пилотный электронный блок в стандарте NIM для калибровочной системы SFGD.
- ❑ Проведено изучение оптических наводок между элементами активной мишени SFGD. Результаты доложены в коллаборации и на семинаре ЛЯП. Опубликована статья.
- ❑ Проведен анализ систематических погрешностей восстановления импульсов по пробегаем в ближнем детекторе ND280. Результат представлен в T2K Technical Note.
- ❑ Летом 2022 года изучен выход вторичных частиц с графитовой мишени (T2K replica target at CERN). Набрано около 180 млн. событий. В настоящее время в T2K используются данные, набранные в 2010 году – 10 млн. событий. Ожидается улучшение точности определения выхода нейтрино из мишени до ~3%.

1. A. Artikov et al. **Investigation of Light Collection in Scintillation Cubes of the SFGD Detector**, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2022, v. 19, #6, p.749.
2. K. Abe et al. **Scintillator ageing of the T2K near detectors from 2010 to 2021**, JINST 17 P10028 (2022)
3. I. Alekseev et al. **SuperFGD prototype time resolution studies**, arxiv:2206.10507, принято к печати в *JINST*.
4. Arihara T. et al. **Development of the in-situ Calibration System using LEDs and Light Guide Plates for the SuperFGD**, *J. Phys.: Conf. Series*, в печати
5. T2K Technical Notes



Планы участия в T2K-II



- ☐ Участие в подготовке SFGD к установке в шахте и запуске модернизированного детектора ND280
- ☐ Участие в сеансах набора данных в 2023 году
- ☐ Поддержка работоспособности SFGD и системы калибровки
- ☐ Участие в последующих сеансах наборов данных, в том числе и в удаленном формате, в анализе данных.
- ☐ Продолжение поиска LDM-кандидатов в электронном канале в детекторе ND280
- ☐ Оценка потенциала T2K-II в поиске LDM-кандидатов с участием Super-Kamiokande
- ☐ Исследование детекторной систематической ошибки для SFGD с началом набора данных в T2K-II



Участники от ОИЯИ



ЛЯП: Артиков А.М., Баранов В.Ю., Бойков А.В., Бражников А.О., Васильев И.И.,
Глаголев В.В., Давыдов Ю.И., Демин Д.Л., Зимин И.Ю., Киричков Н.В., Кисеева В.И.,
Колесников А.О., Красноперов А.В., Малышев В.Л., Попов Б.А., Суслов И.А.,
Терещенко В.В., Терещенко С.В., Хомутов Н.В., Шайковский А.В.
ЛТФ: Козлов Г.А., Матвеев В.А.