



Первый анализ взаимодействий мюонных нейтрино в модернизированном ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K

Дарья Федорова^{1, 2, 3}, Александр Измайлов²

¹Московский физико-технический институт (МФТИ)

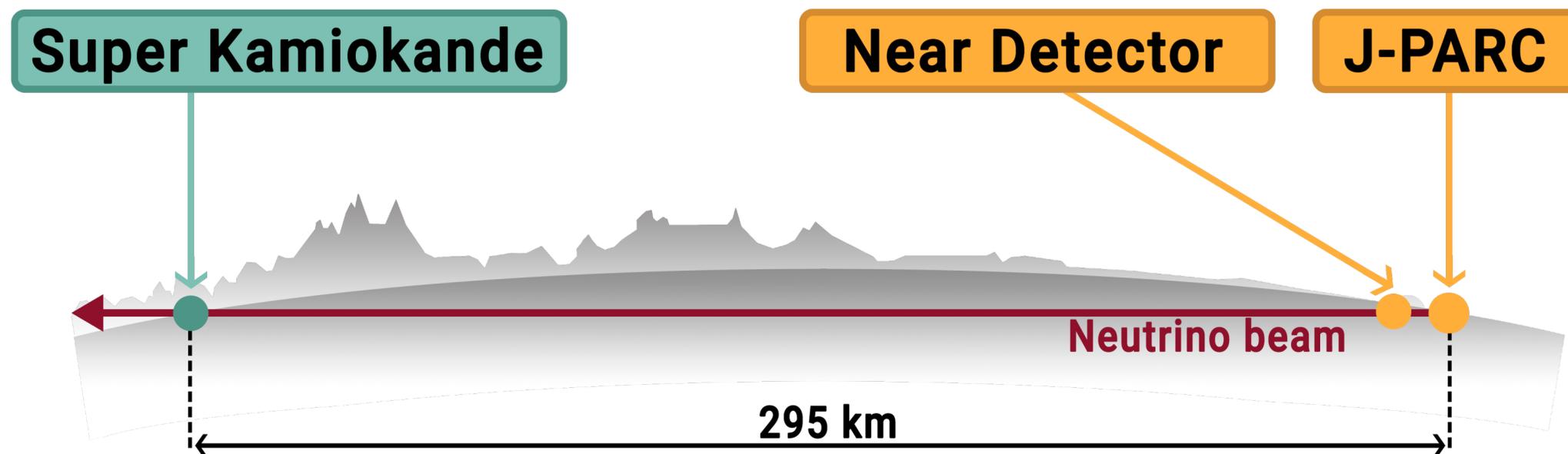
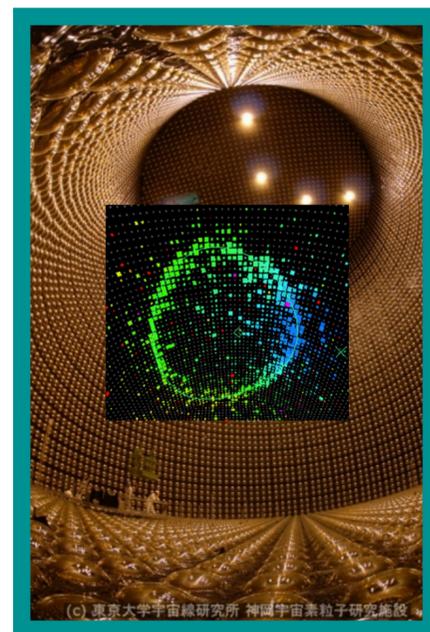
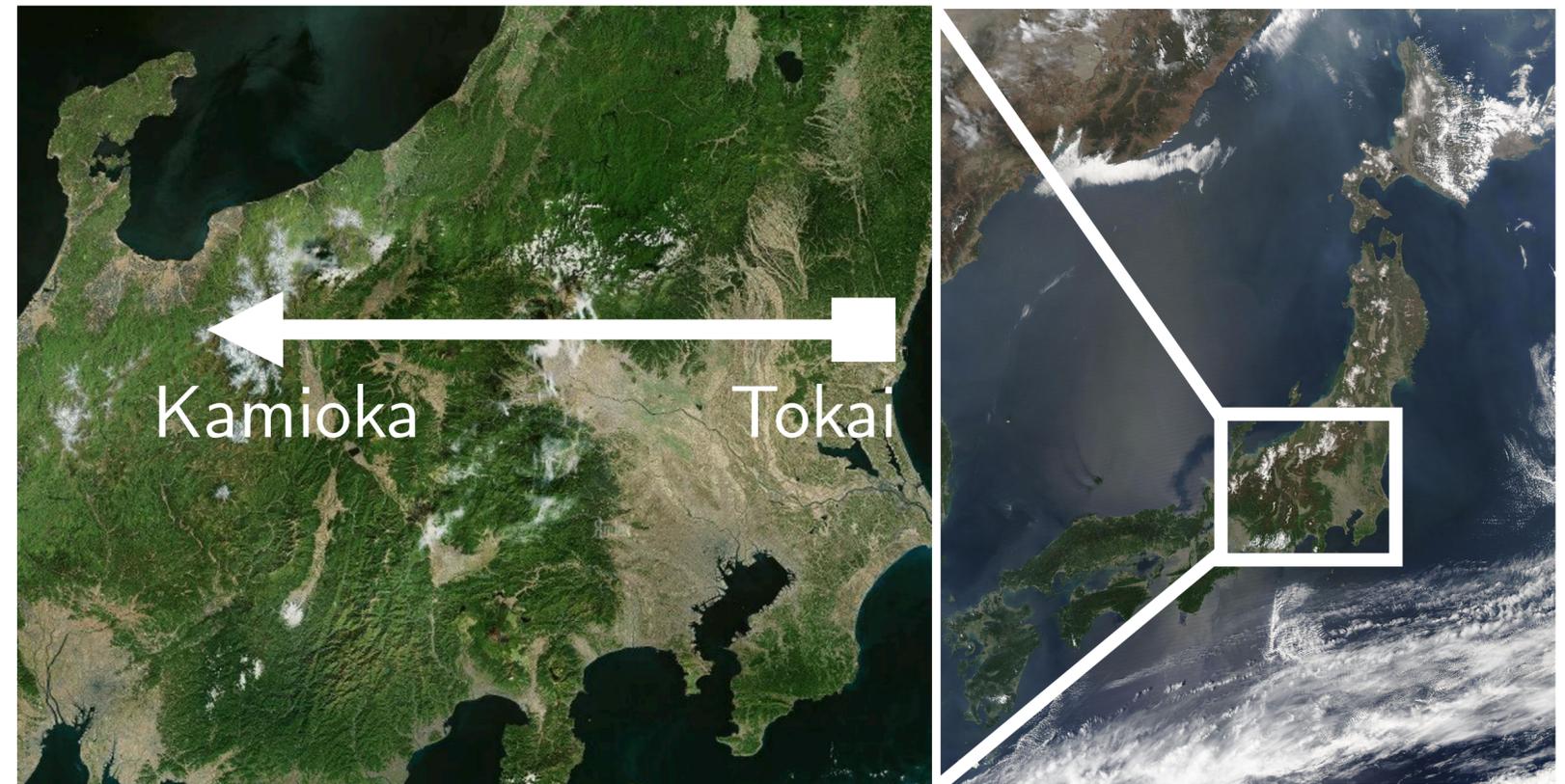
²Институт ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН)

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН)

Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН
10—13 Марта 2026

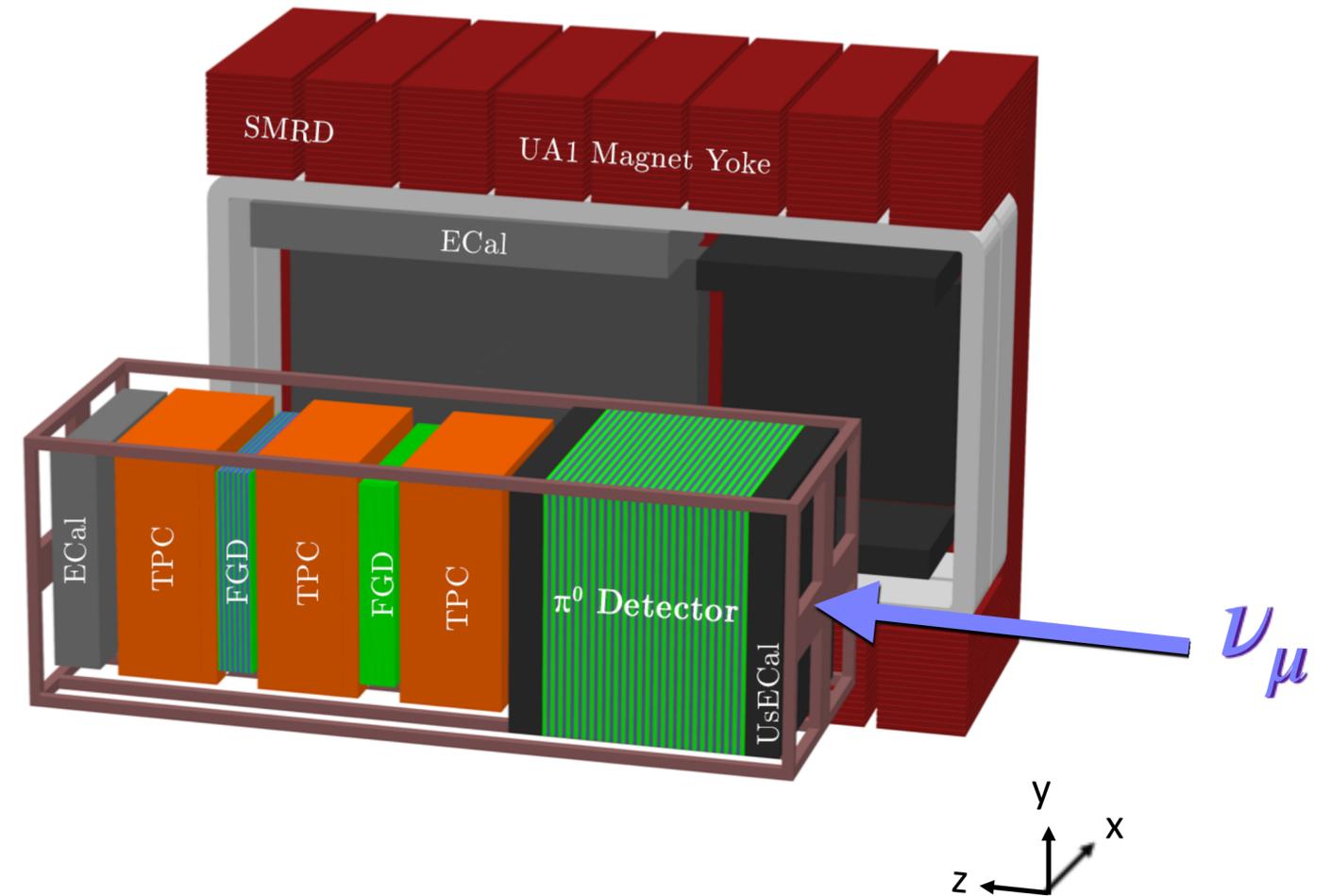
Эксперимент Tokai-to-Kamioka (T2K)

- Ускорительный нейтринный эксперимент с длинной базой в Японии
- Использует пучок $(\bar{\nu}_\mu)\nu_\mu$ высокой интенсивности и чистоты, созданный на ускорительном протонном комплексе J-PARC
- Цель: Прецизионное измерение параметров осцилляций и поиск CP-нарушения в лептонном секторе



Ближний Детектор ND280

- **Ключевые функции:**
 - Измерение нейтринных взаимодействий, состава и фоновых компонент потока
 - Ограничение на модели потока и взаимодействия для Осциляционного Анализа (ОА)



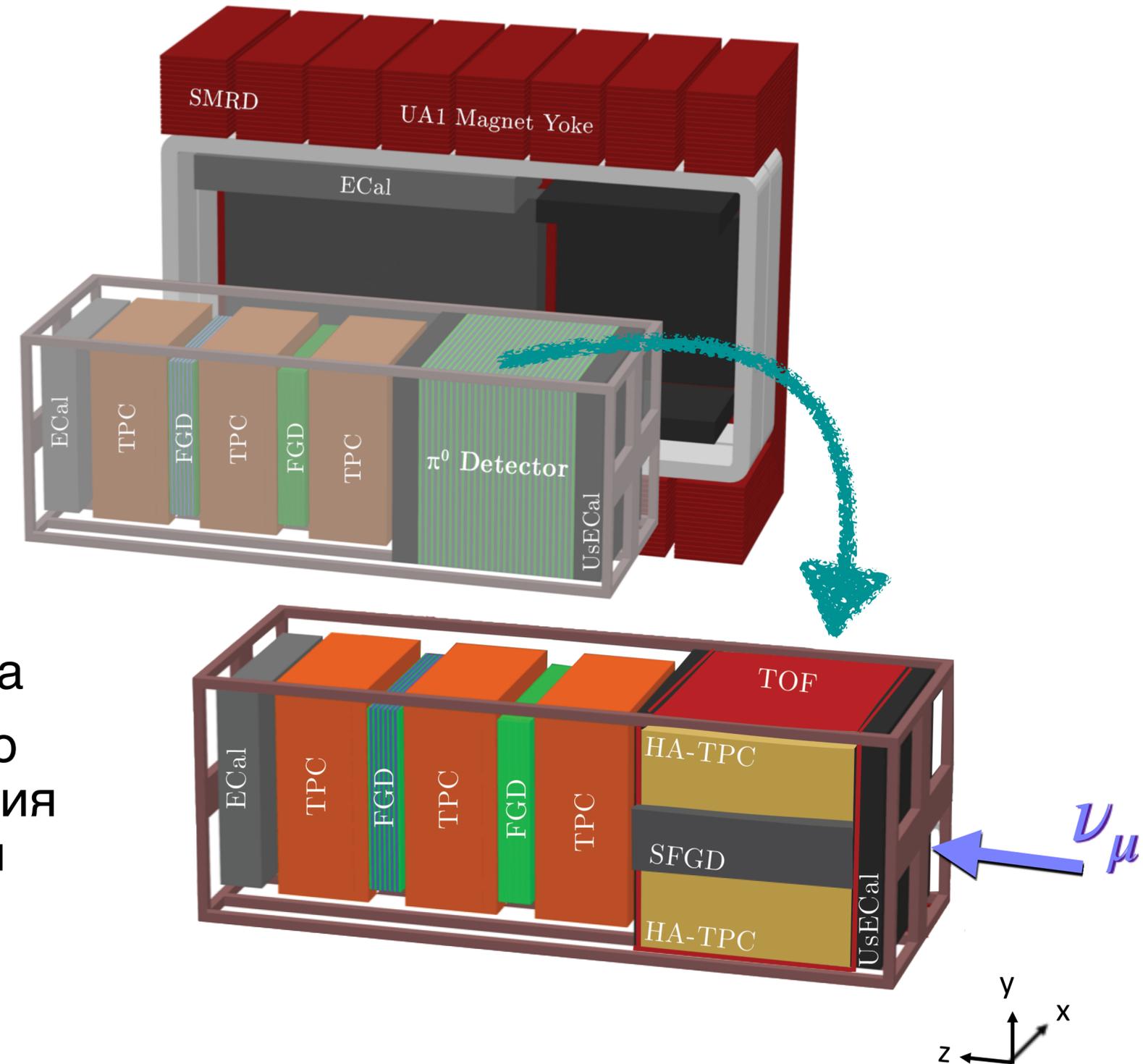
Ближний Детектор ND280

- **Ключевые функции:**

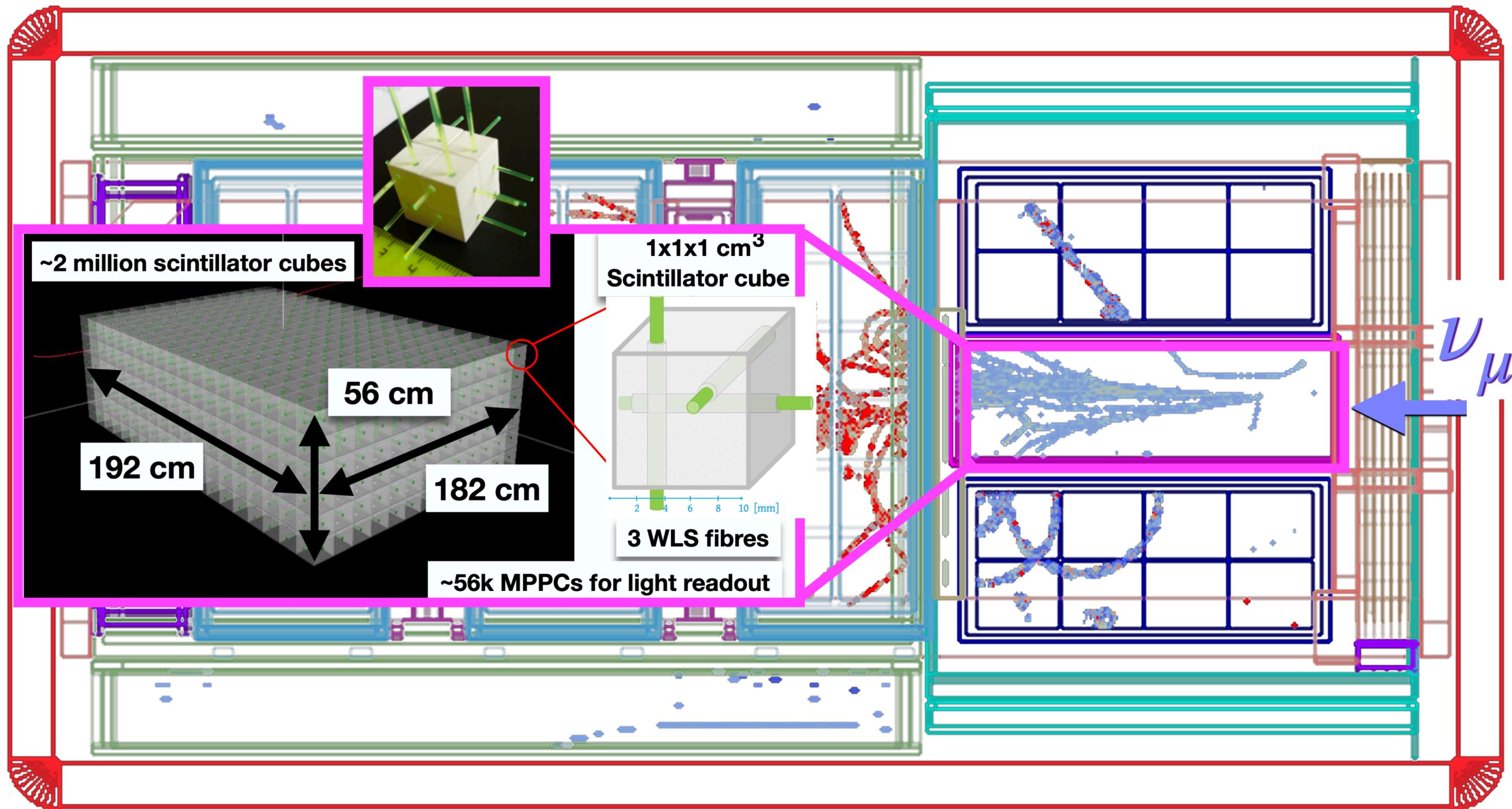
- Измерение нейтринных взаимодействий, состава и фоновых компонент потока
- Ограничение на модели потока и взаимодействия для Осциляционного Анализа (ОА)

- В 2024 году завершена модернизация **ND280Upgrade**:

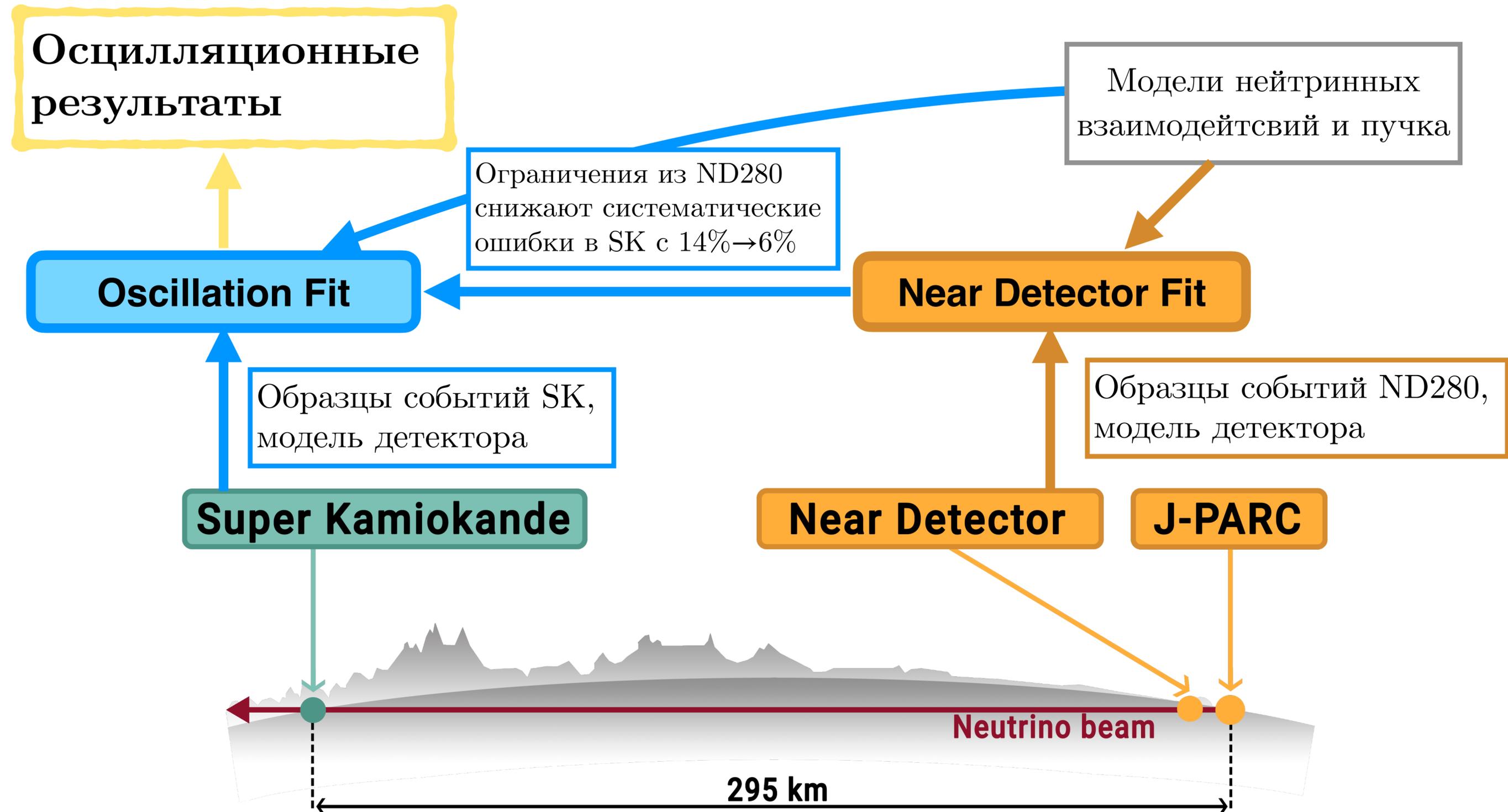
- Основа обновления — SuperFGD, высокосегментированный детектор, окружённый время-проекционными камерами и детекторами времени пролёта
- Цель: расширение исследуемого фазового пространства продуктов реакций, снижения порога регистрации, увеличение точности временных измерений \Rightarrow Дальнейшее снижение ошибок в ОА



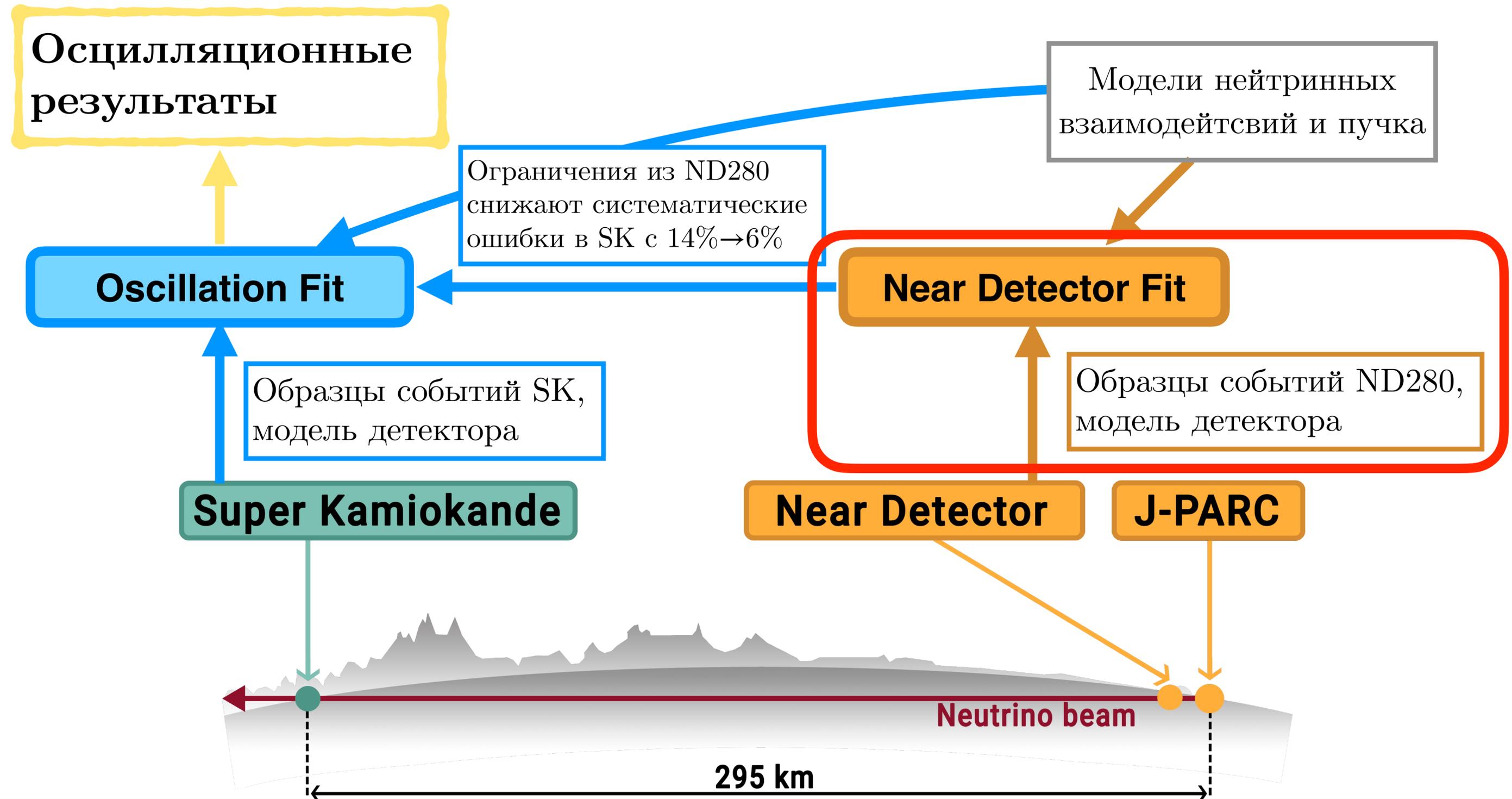
Детектор SuperFGD в ND280Upgrade



Роль Ближнего Детектора в Осцилляционном Анализе

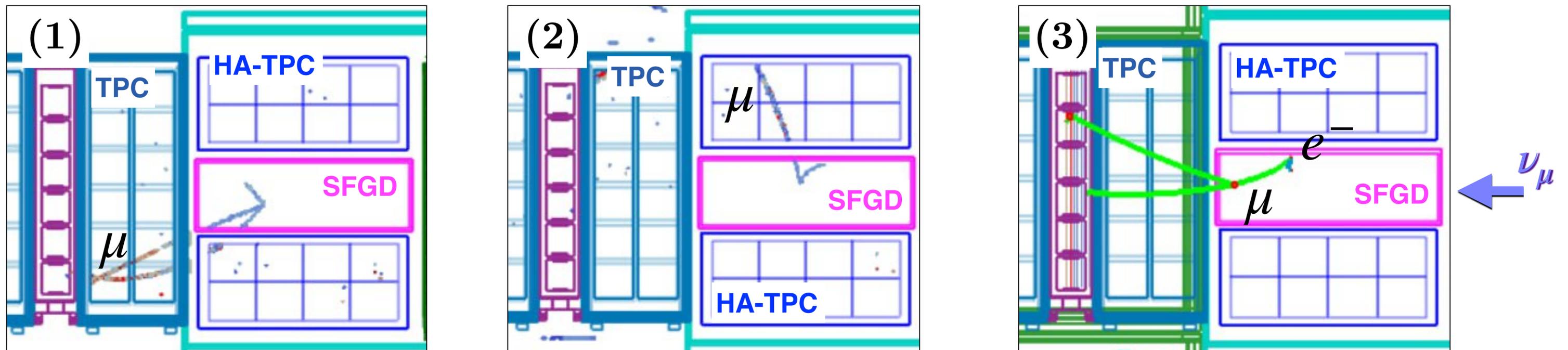


Роль Ближнего Детектора в Осцилляционном Анализе

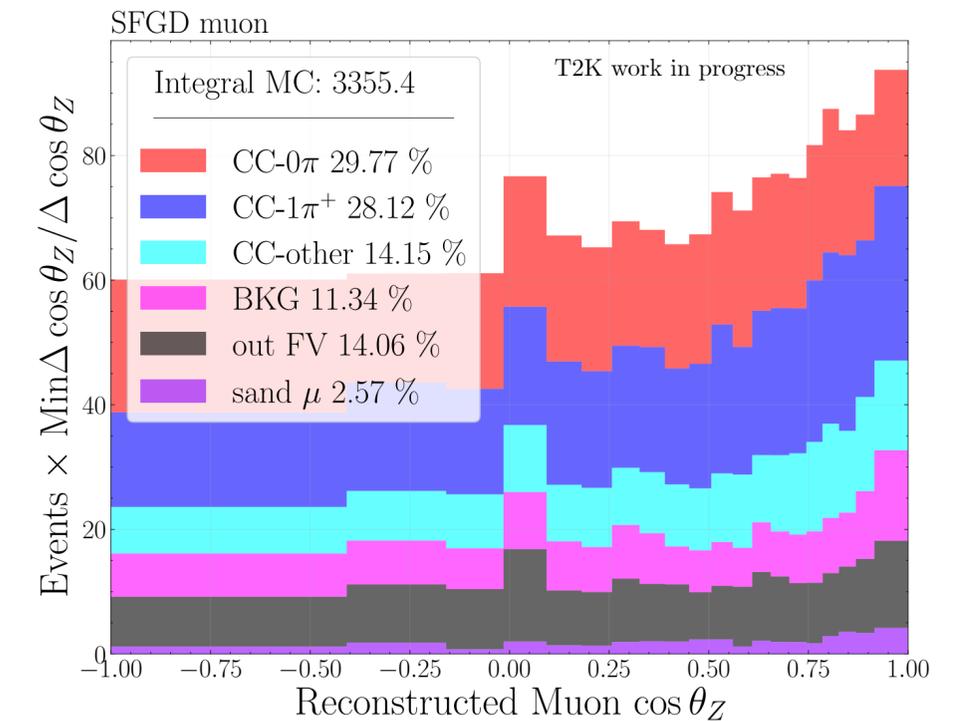
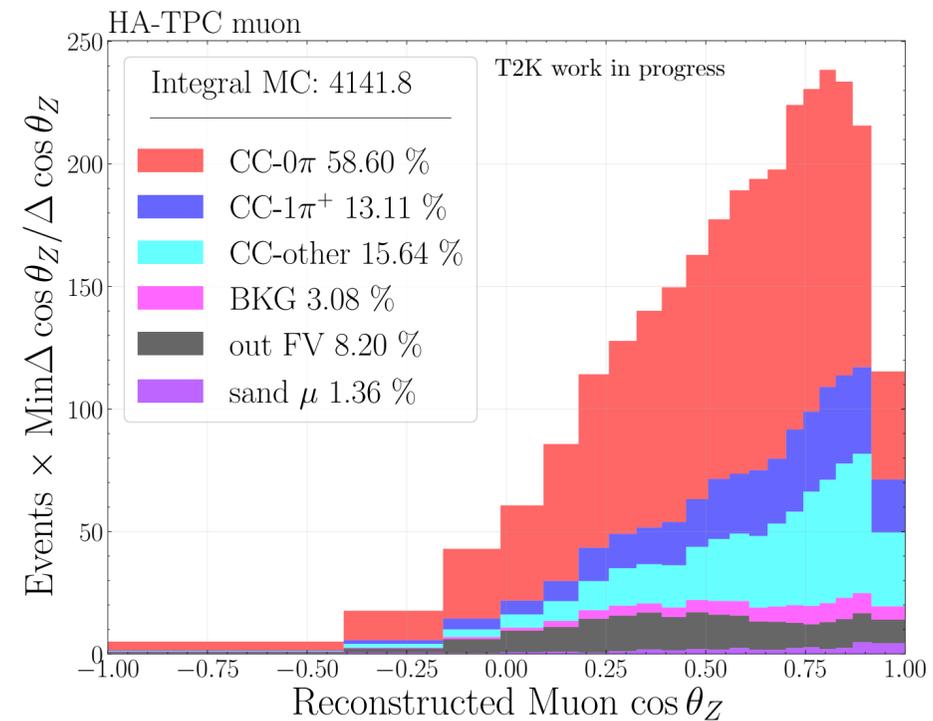
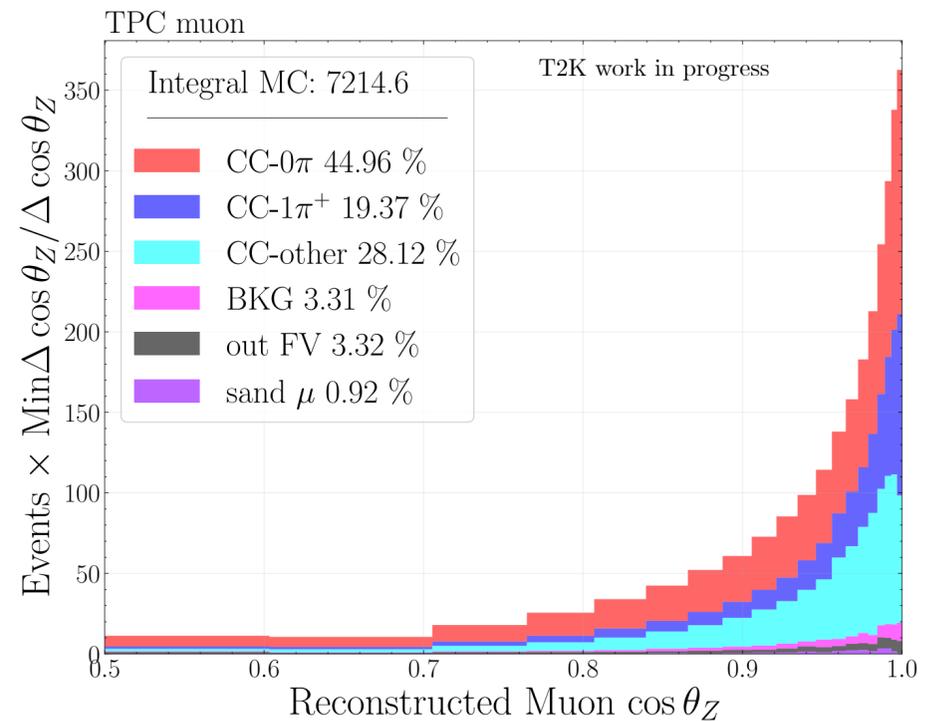
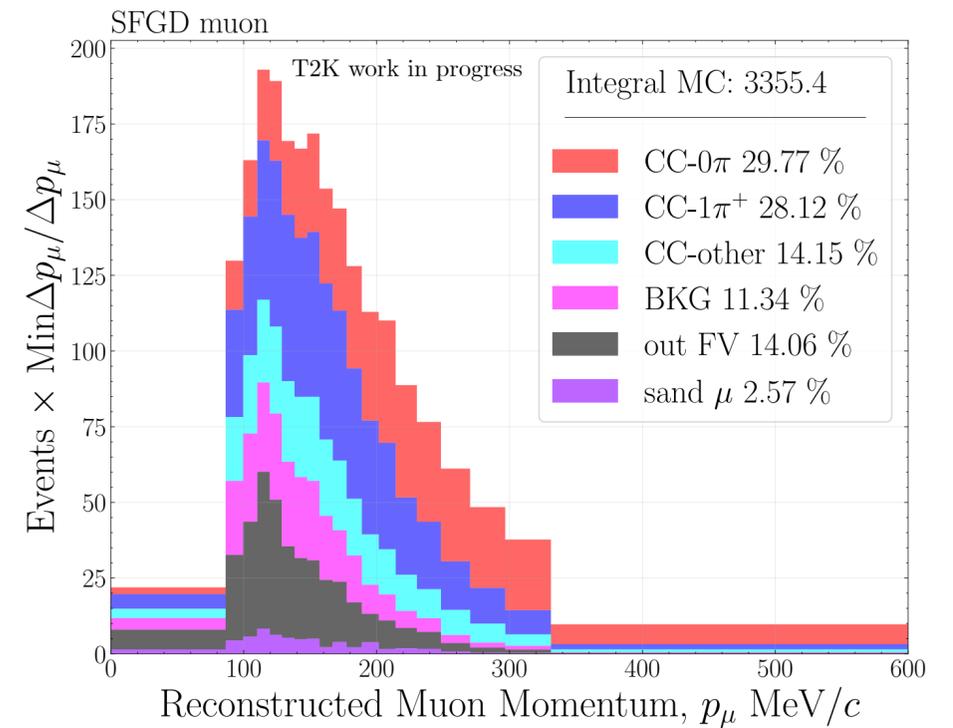
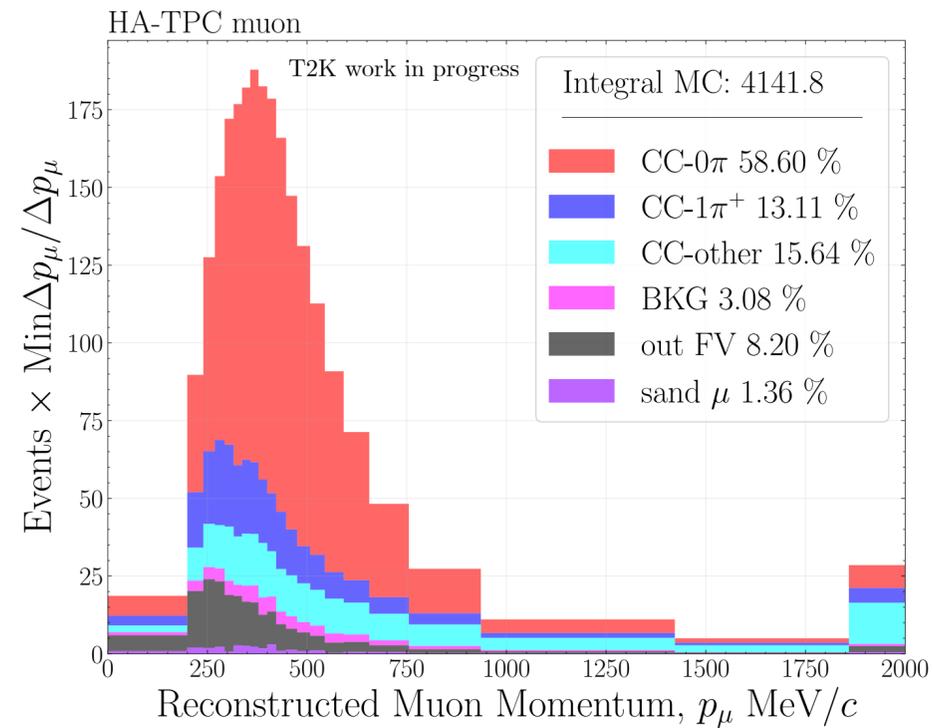
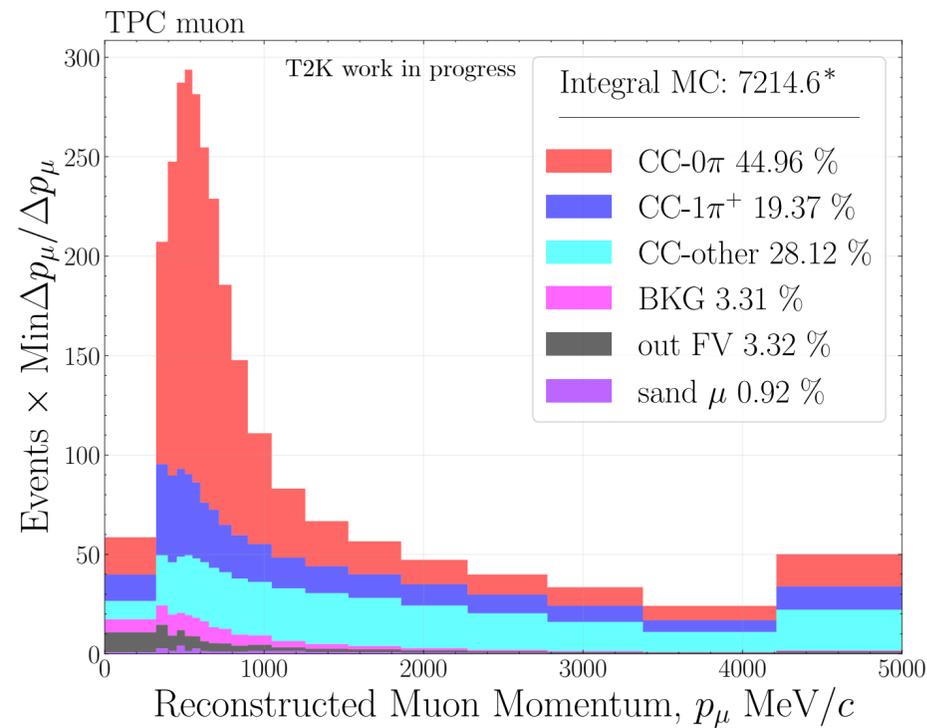


Образцы Сигнальных Событий в ND280Upgrade

- События из ND280 используются в Near Detector Fit для снижения неопределенностей моделей потока и взаимодействий в условиях Super-Kamiokande
- В первом анализе данных с ND280Upgrade отбираются события нейтринных взаимодействий по каналу заряженного тока (CC) с вершиной в SuperFGD
- Критерии отбора: наличие мюонного трека, исходящего из SuperFGD, который классифицируется как сигнальный в двух случаях:
 - Трек покидает объем SuperFGD и регистрируется в одной из вертикальных (1) или горизонтальных (2) время-проекционных камер (TPC)
 - Трек полностью останавливается внутри SuperFGD с последующим распадом (3)

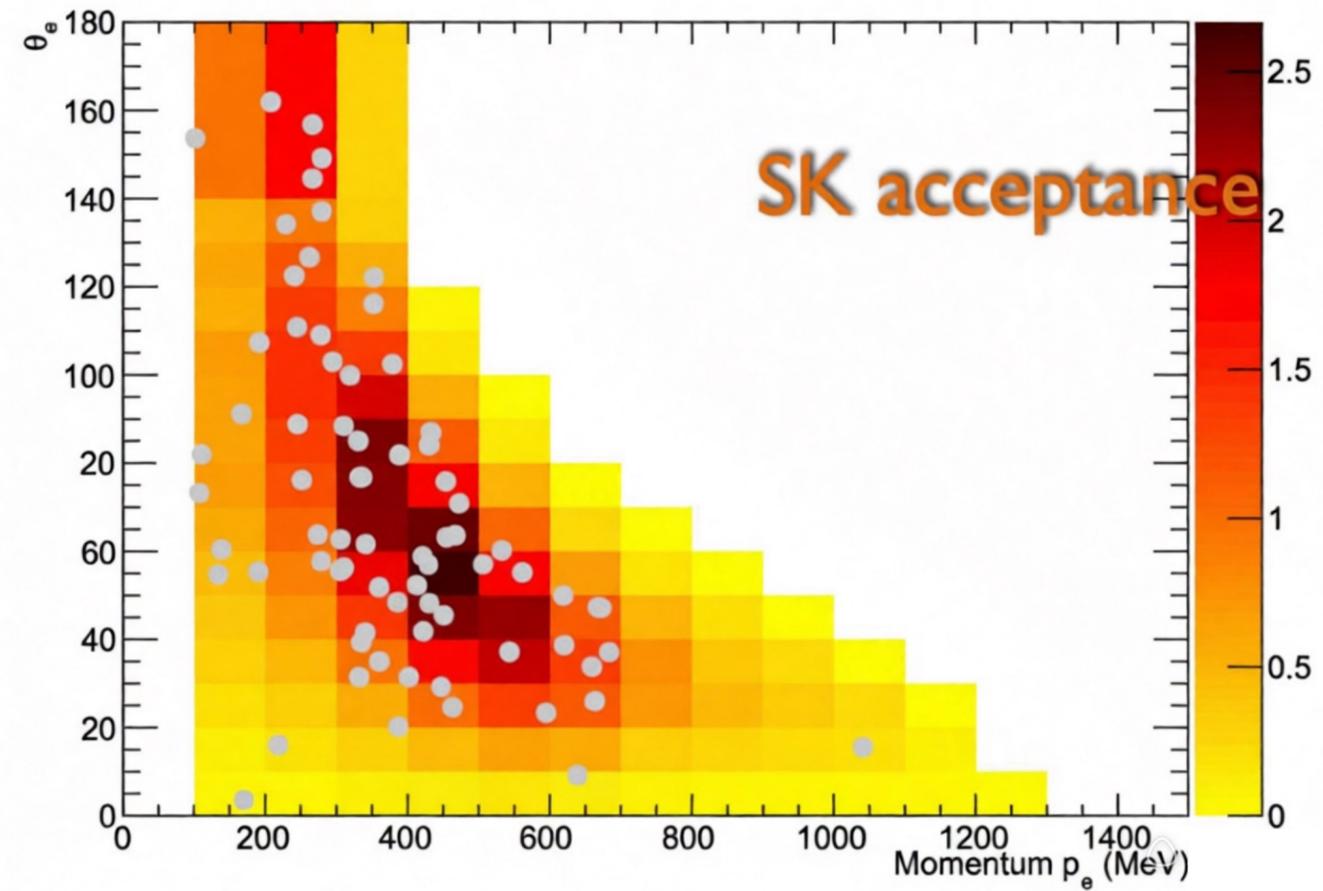
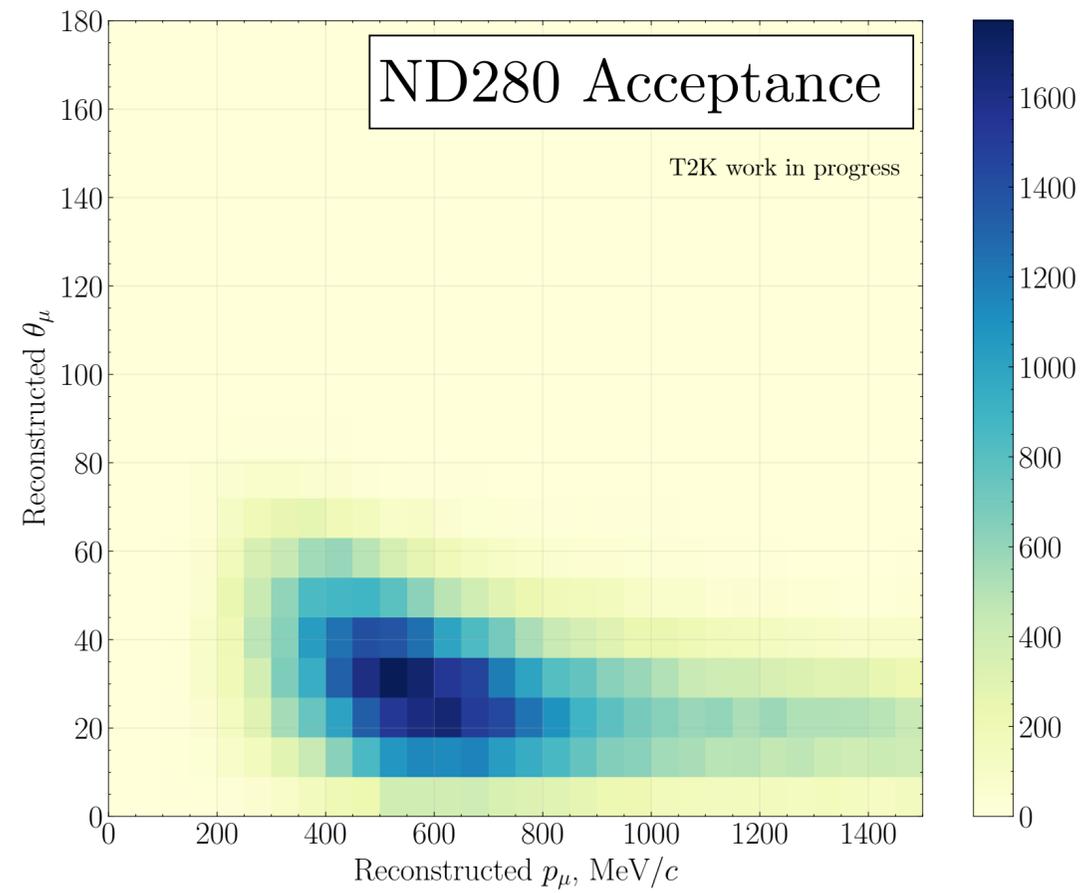


Образцы Сигнальных Событий в ND280Upgrade

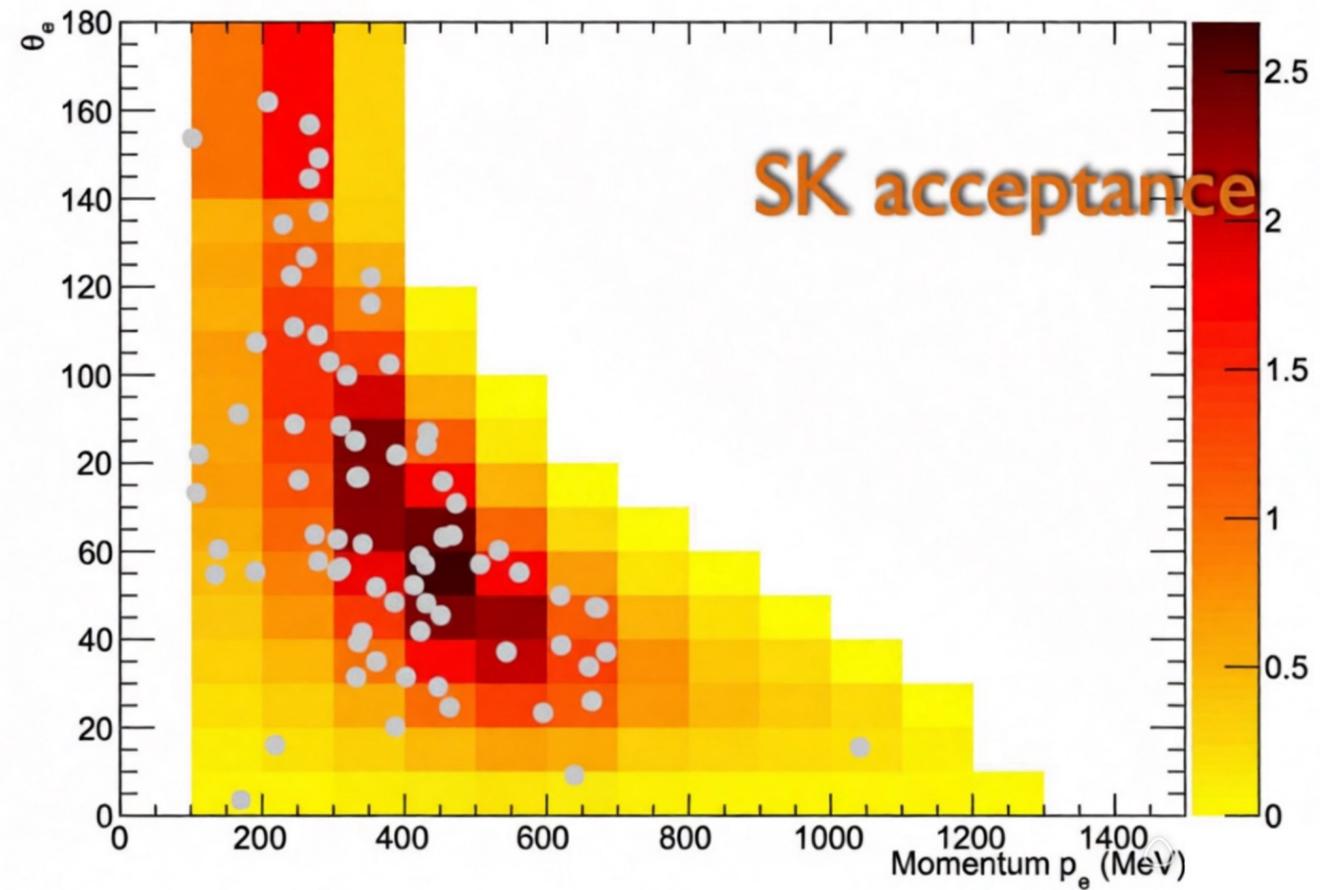
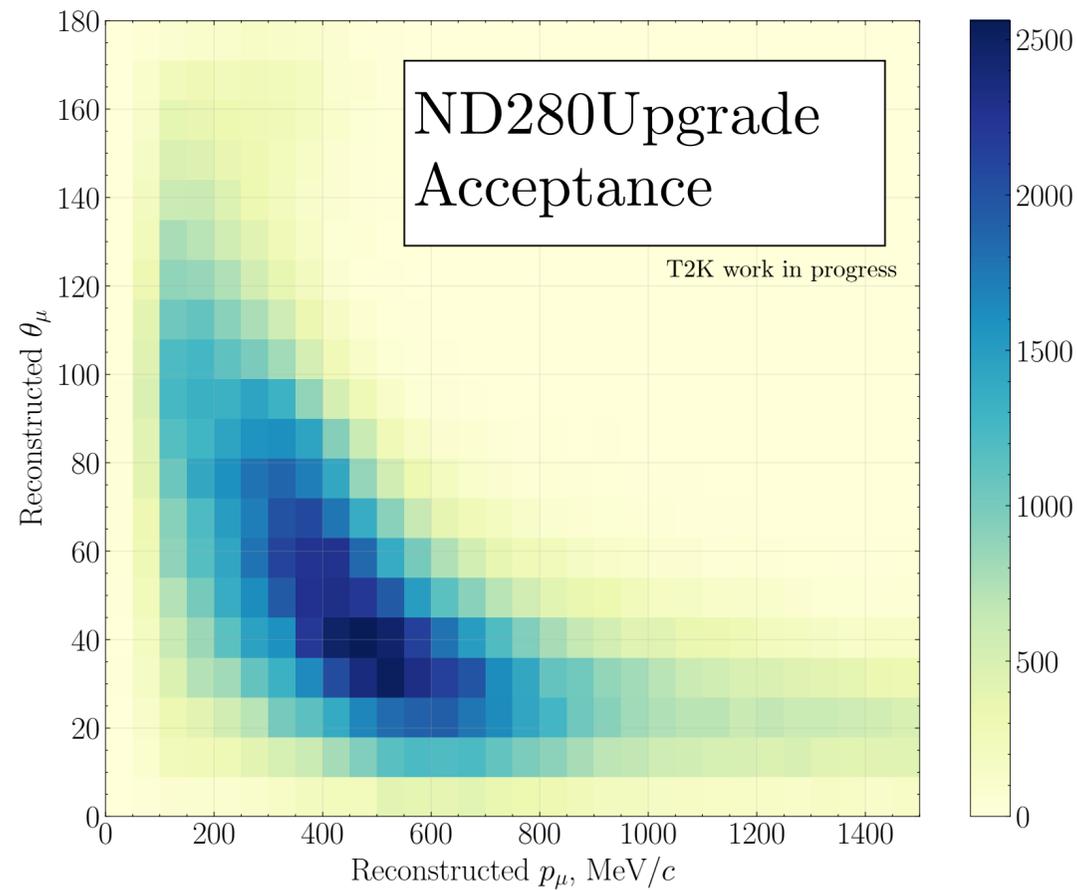


* Нормировка на Data POT

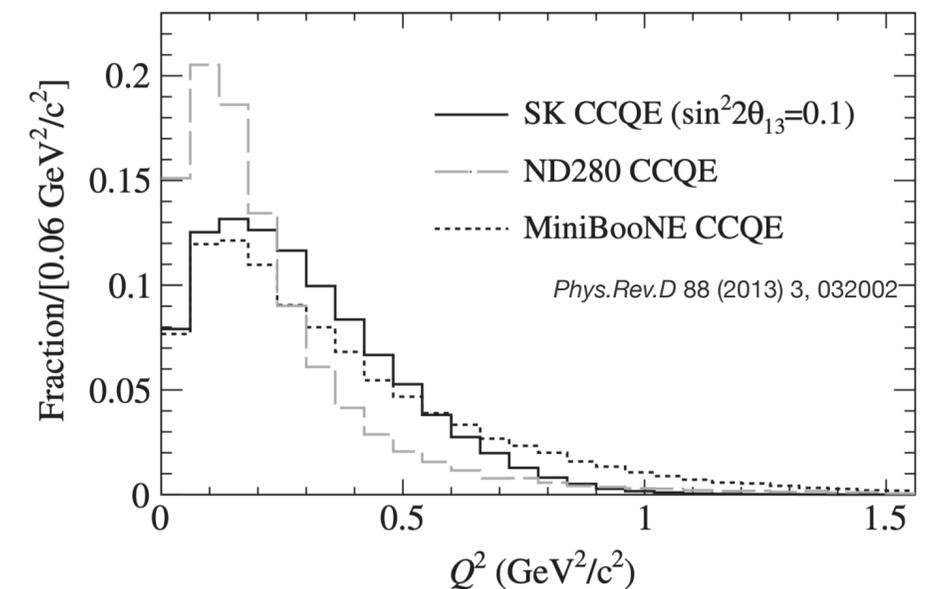
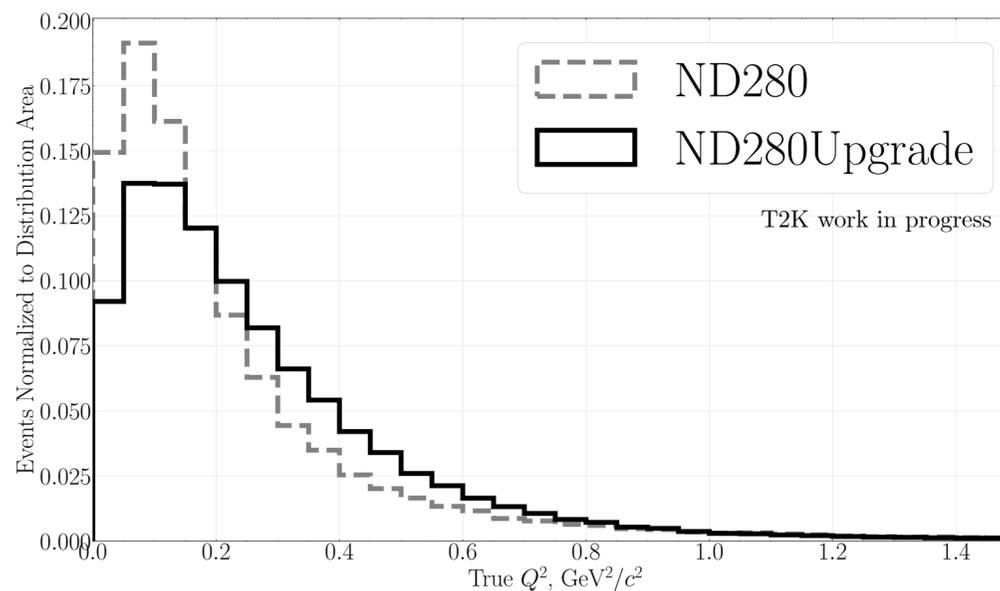
Кинематика в ND280 и Super-Kamiokande



Кинематика в ND280Upgrade и Super-Kamiokande

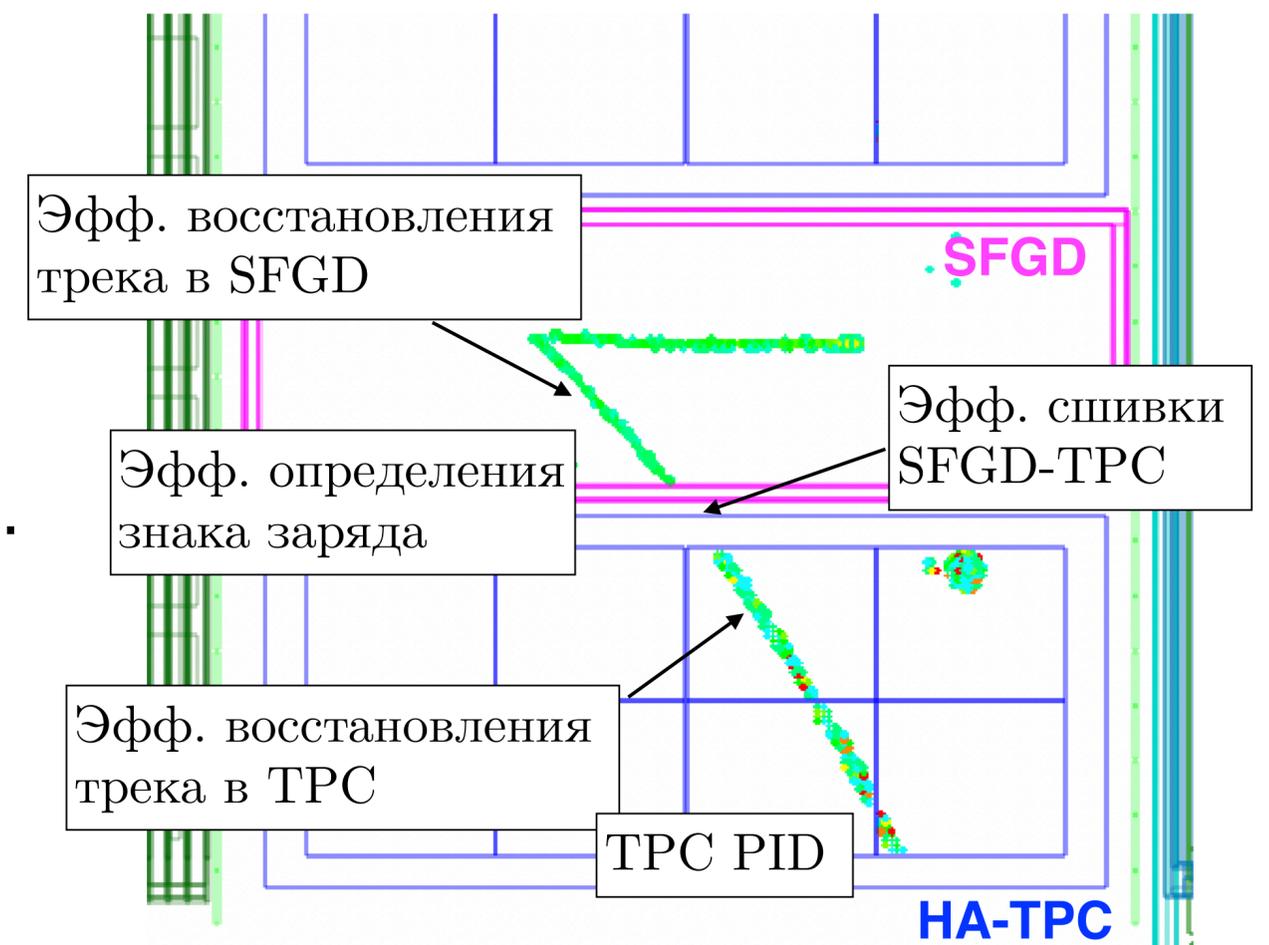


Распределение Q^2 CCQE-событий в ND280Upgrade смещено в область более высоких значений, приближаясь по форме к распределению, ожидаемому в Super-Kamiokande



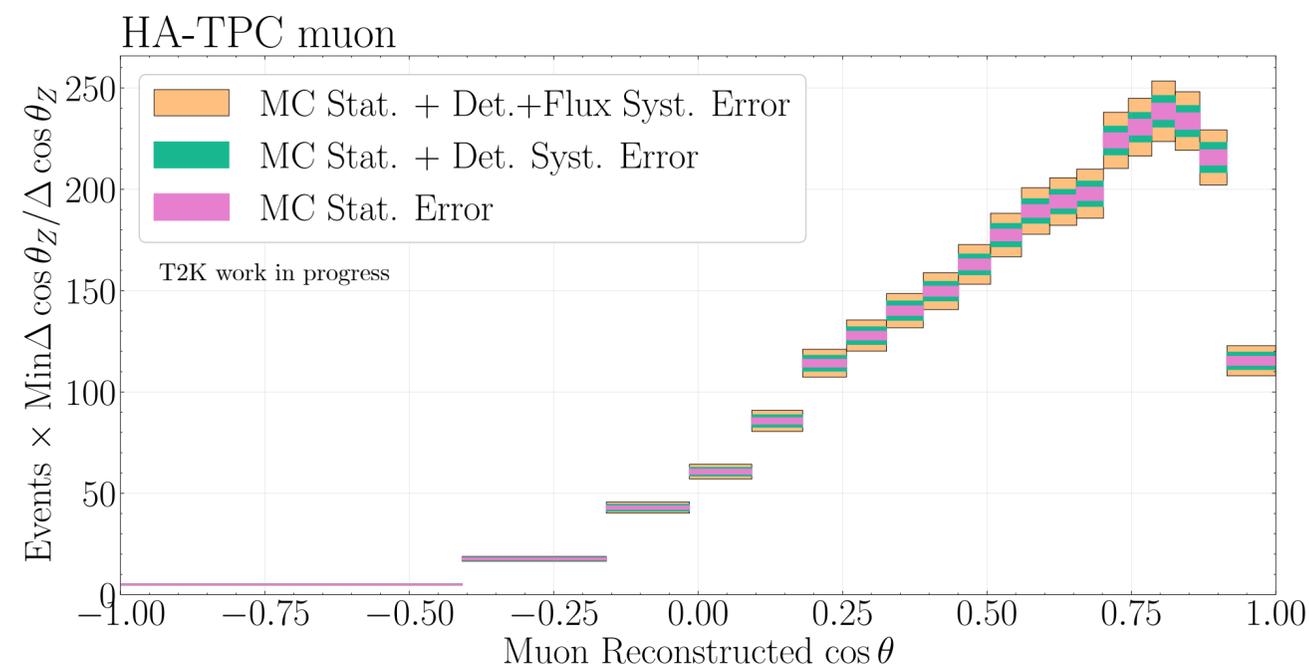
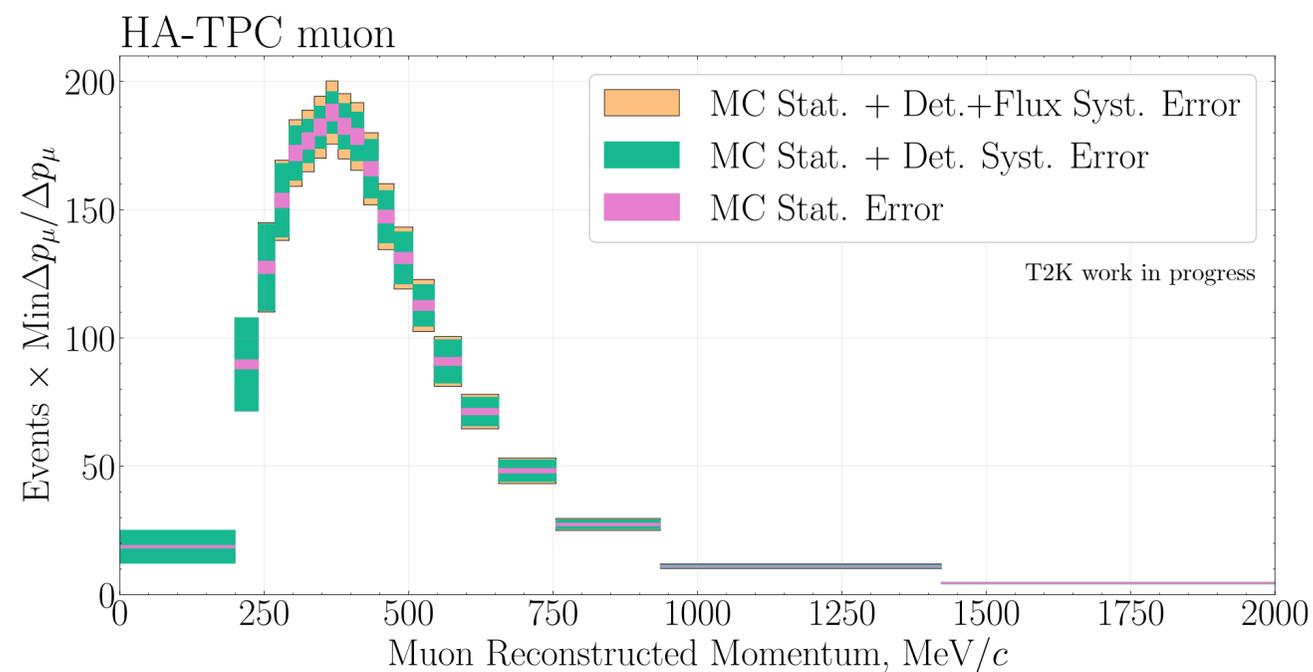
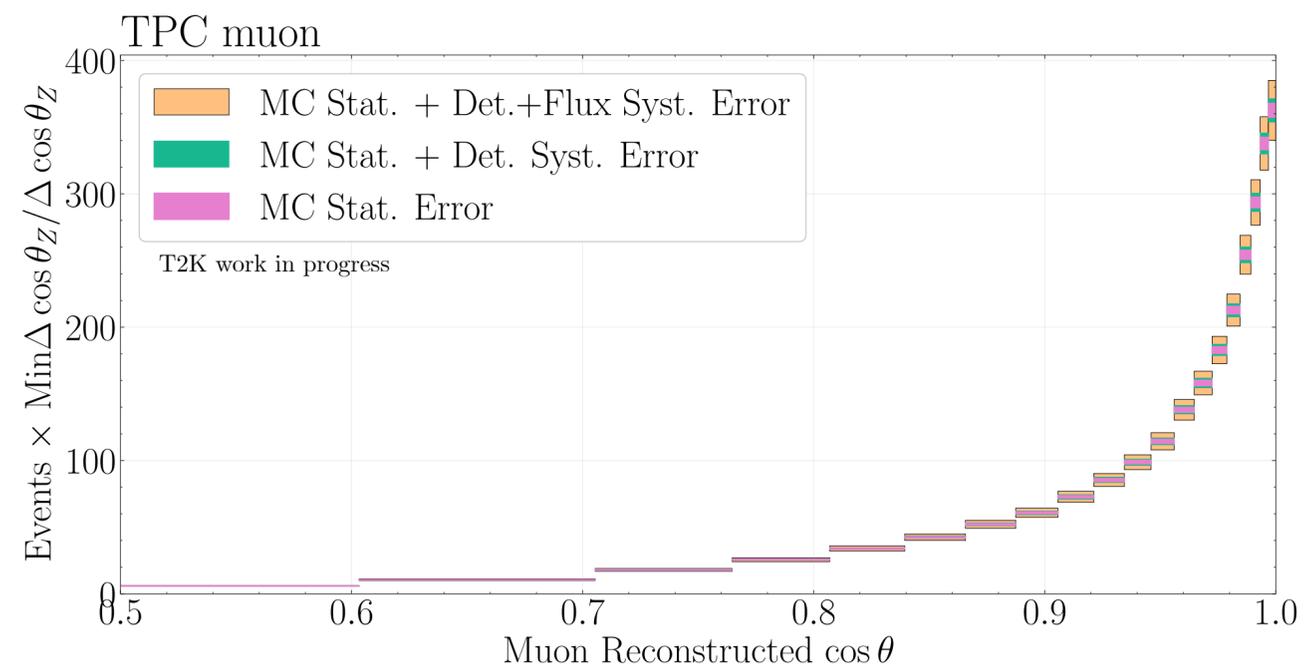
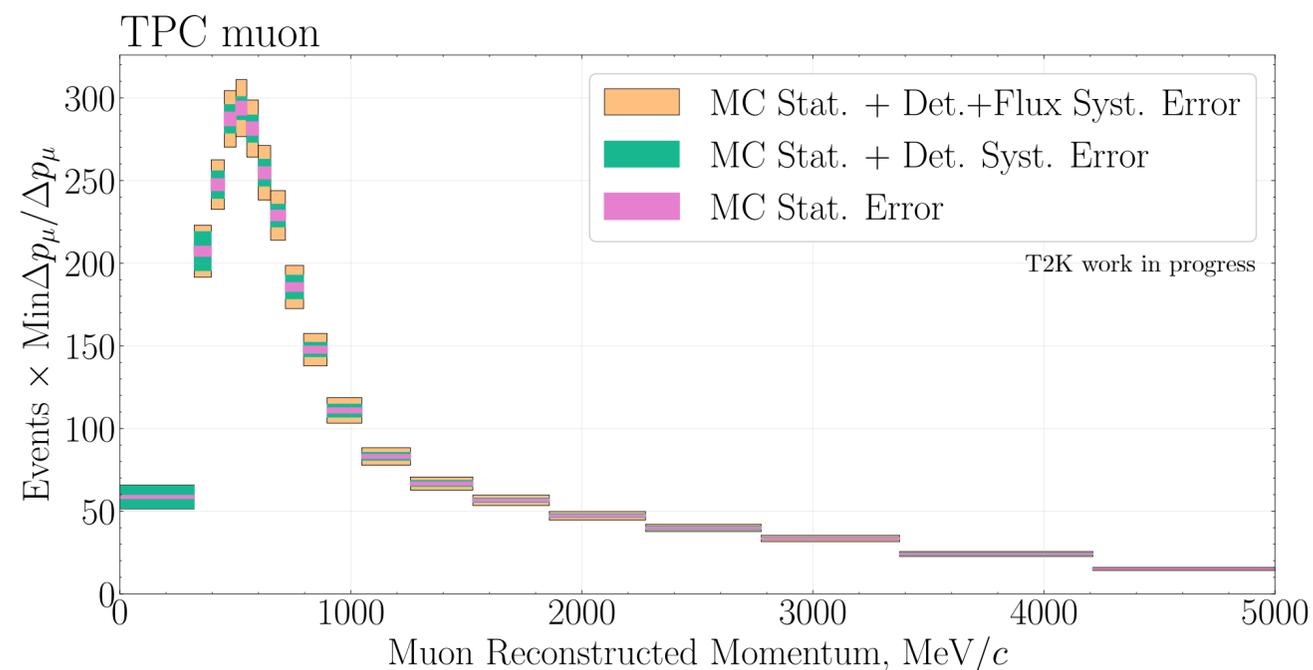
Систематические Неопределенности

- Выполнена оценка 25 систематических неопределенностей, обусловленных работой детекторной установки (например: эффективностей восстановления треков в разных модулях ND280Upgrade, импульсное разрешение и др.)
- В анализе учтены систематические неопределенности, связанные с моделированием нейтринного пучка. Основной вклад вносят:
 - Моделирование взаимодействия адронов в мишени
 - Неопределенность числа протонов на мишени
 - Моделирование материалов мишени, горнов и др.



Пример детекторных систематических ошибок

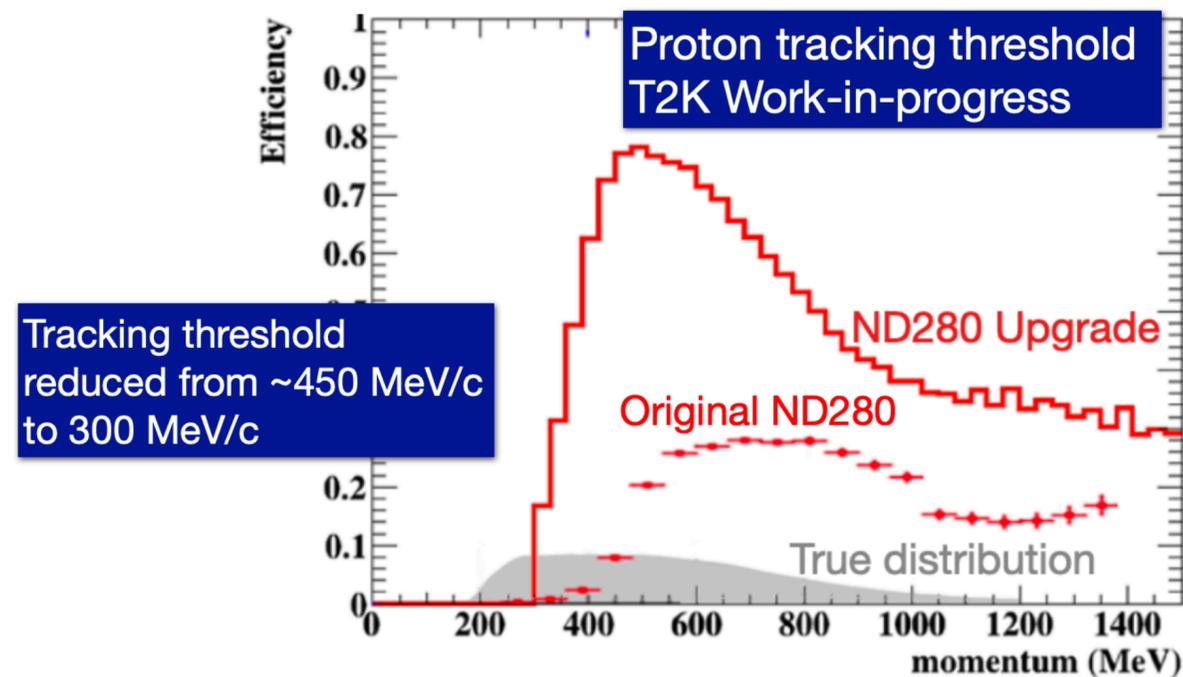
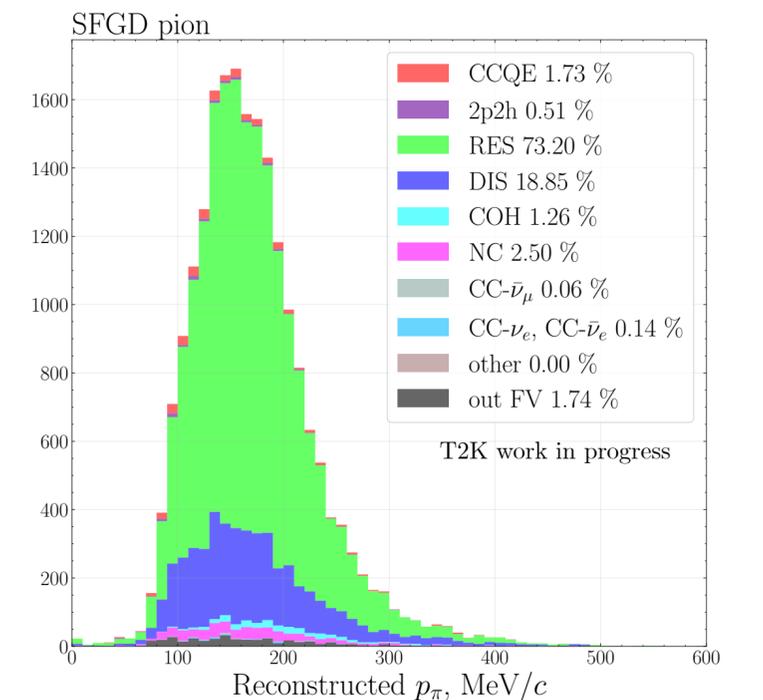
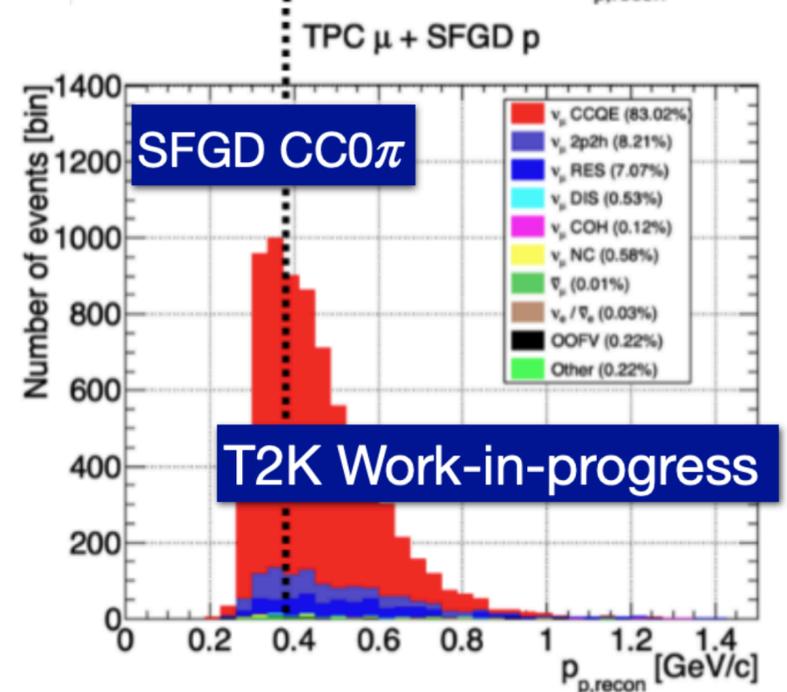
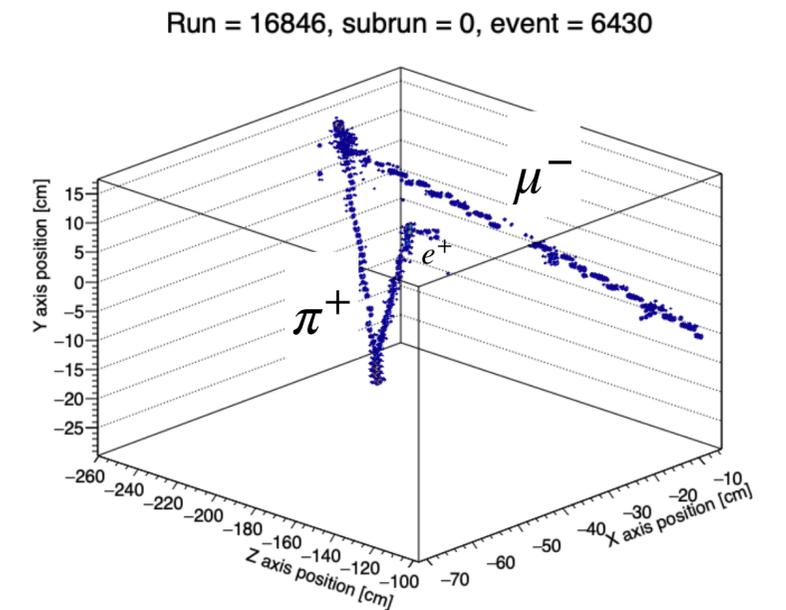
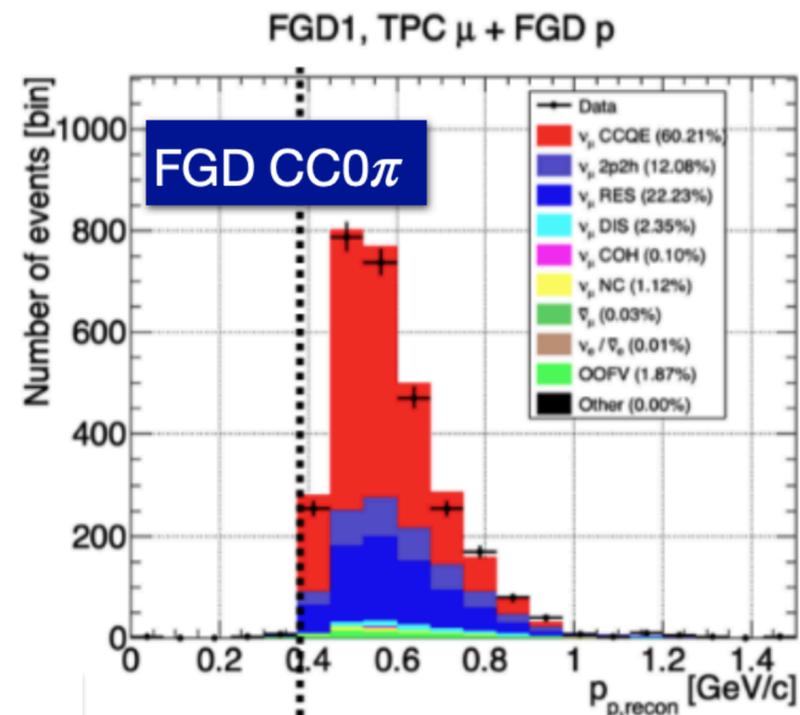
Систематические Неопределенности



- Систематическая ошибка модели потока $\sim 5-6\%$, детекторная неопределенность 2-3%

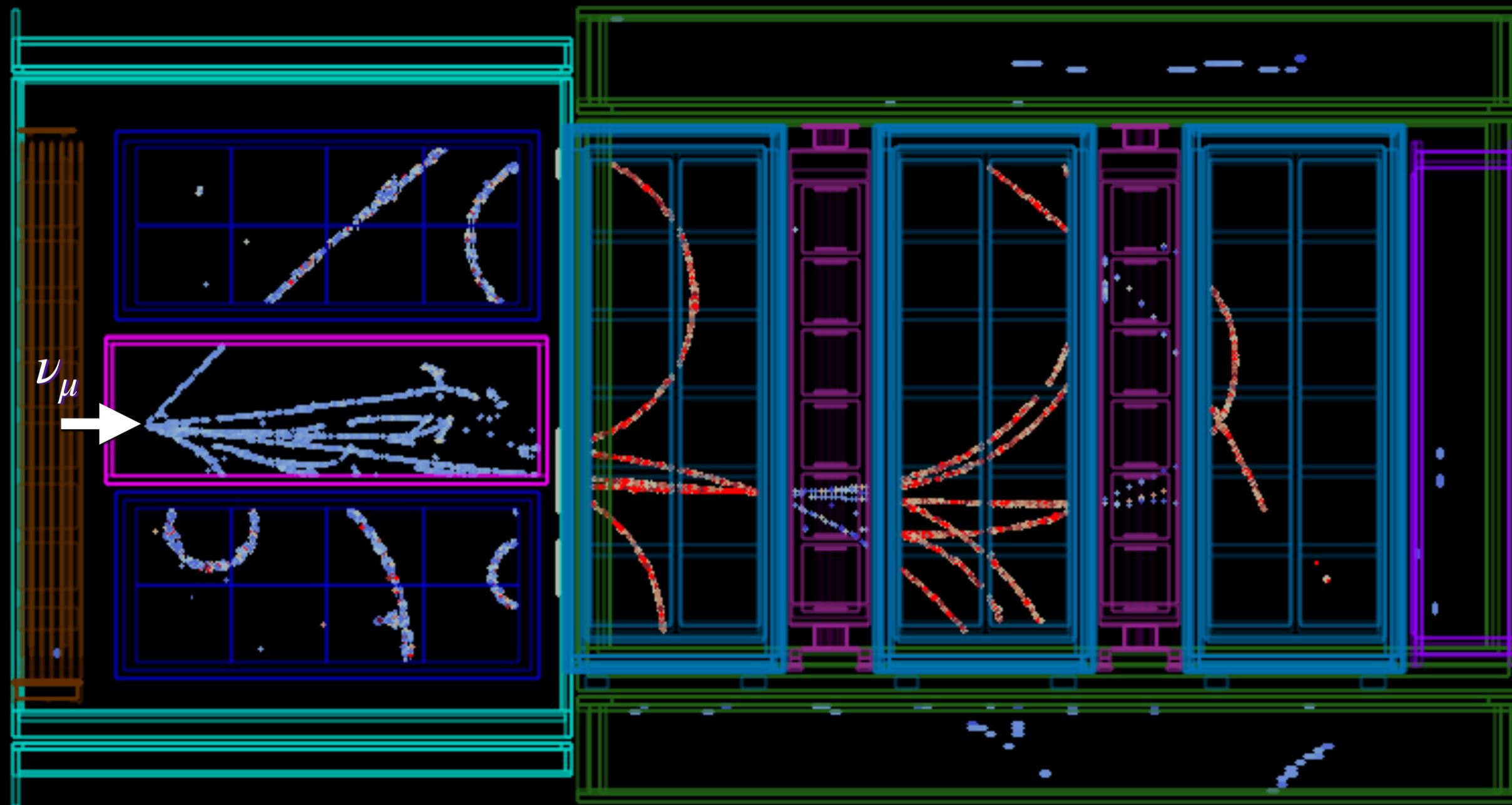
Эксклюзивный Анализ

- Разрабатывается анализ $CC-0\pi$ (CCQE), $CC-1\pi$ (CCRES)
- В ND280Upgrade с SFGD:
 - Уменьшение порога регистрации продуктов реакций
 - Увеличение чистоты отобранных образцов



Заключение

- Ускорительный эксперимент T2K занимает лидирующие позиции в изучении нейтринных осцилляций
- Ведется набор данных с использованием модернизированного ускорителя J-PARC и обновленного ближнего детектора ND280:
 - С 2024 года набрано $\sim 4 \times 10^{20}$ POT в нейтринной моде пучка
- В рамках подготовки к первому Осцилляционному Анализу T2K с использованием данных обновленного детектора:
 - Разработаны критерии отбора $\nu_{\mu}CC$ событий, вершина которых находится в активном объеме детектора SuperFGD.
 - Выполнена оценка систематических неопределенностей, связанных с работой детекторной установки
 - Ведется разработка методов эксклюзивного анализа $\nu_{\mu}CC-0/1\pi$ взаимодействий для задач осцилляционного анализа и прецизионного измерения сечений взаимодействия нейтрино



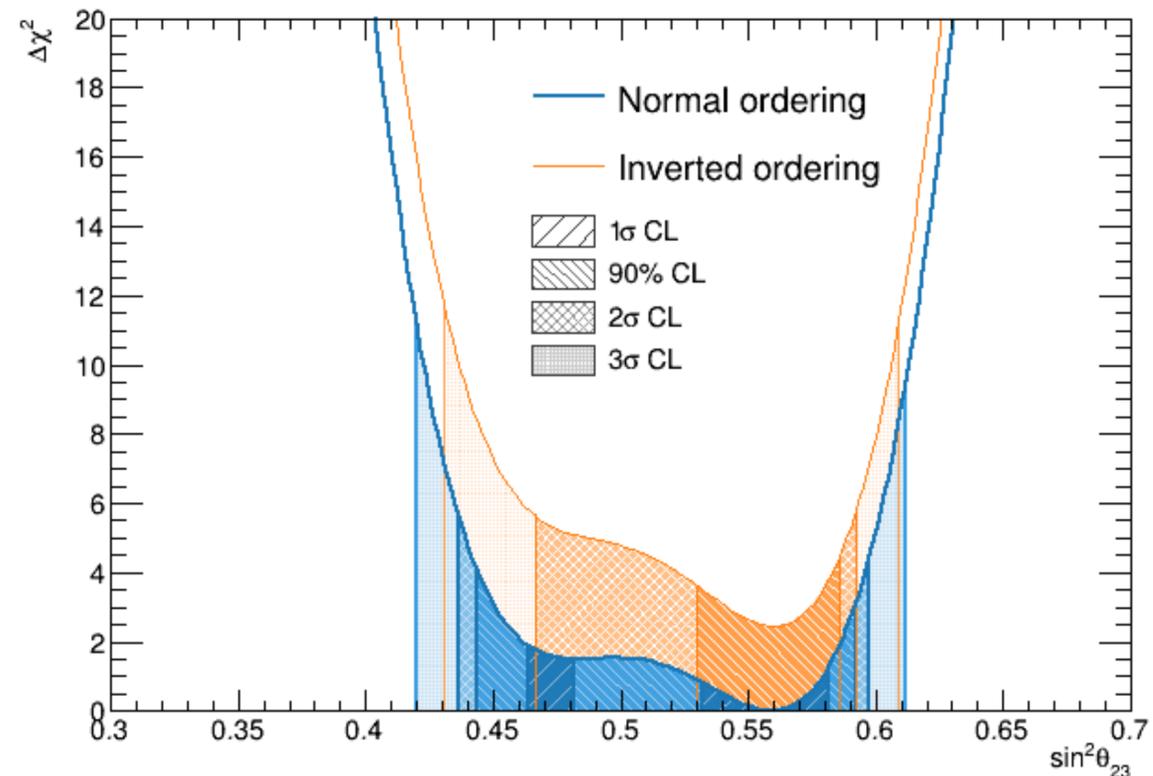
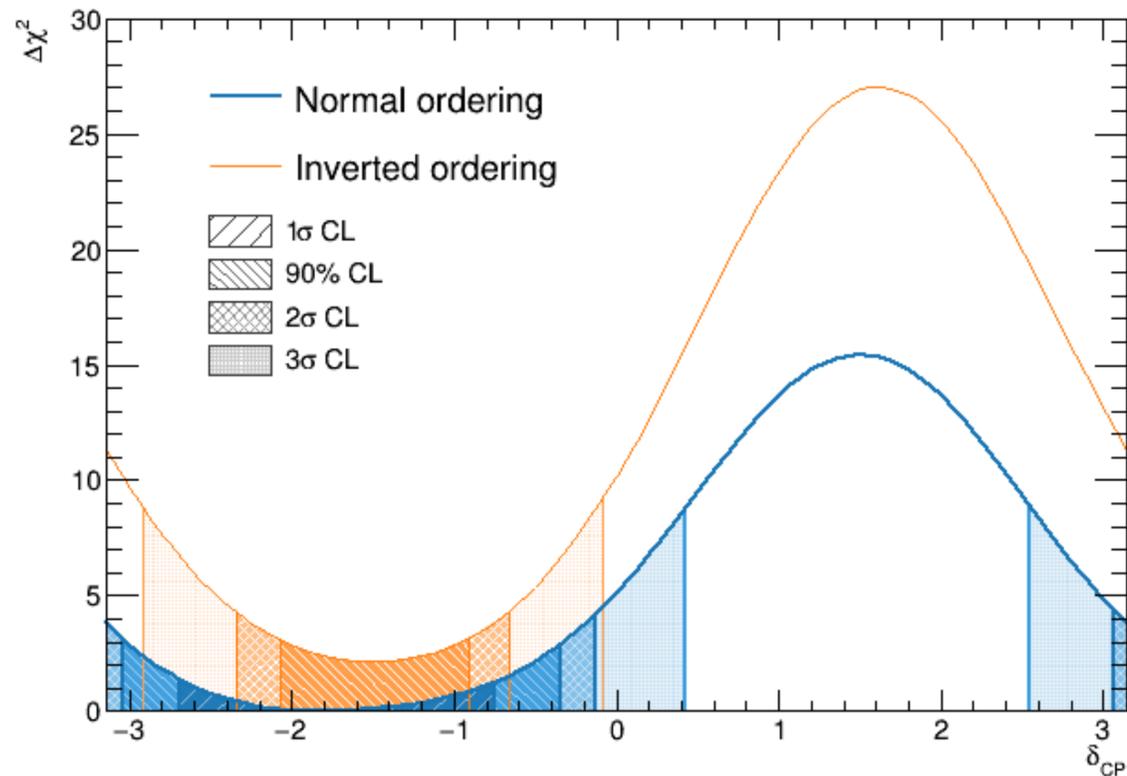
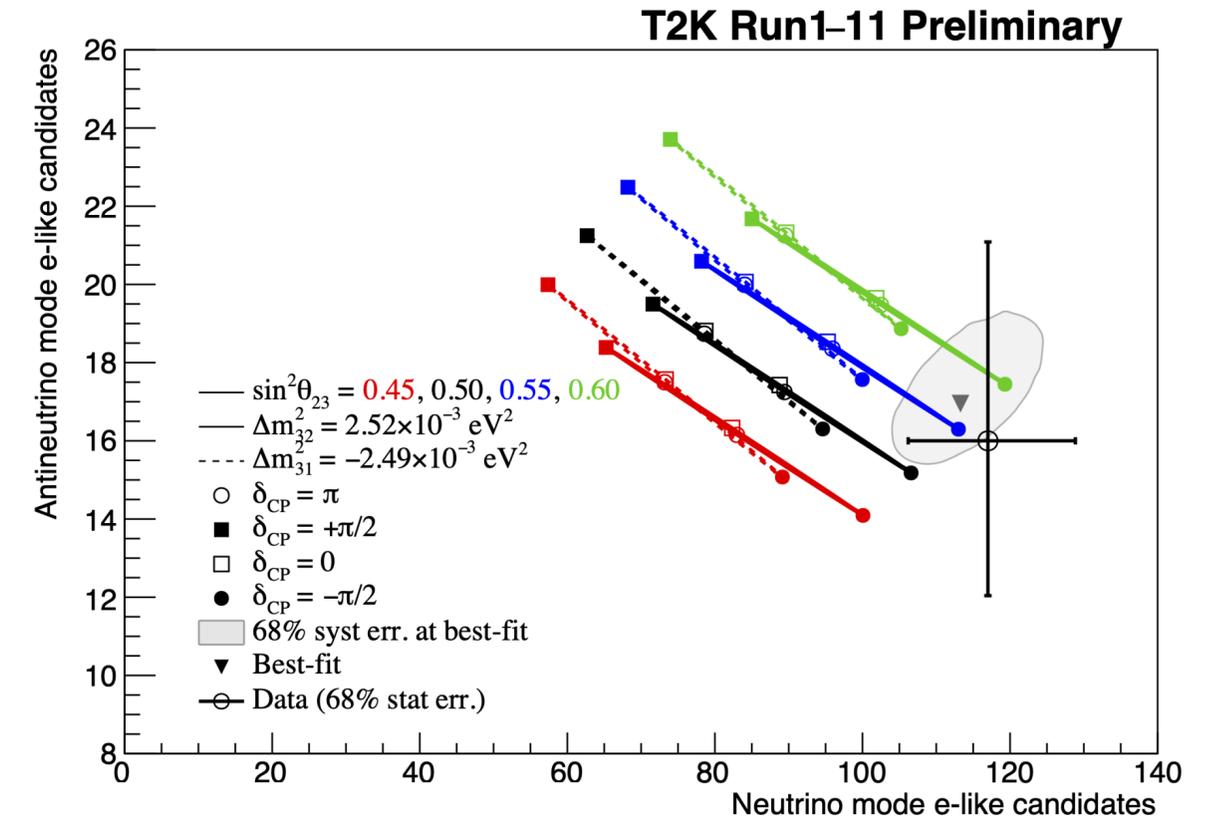
Спасибо за внимание!

Backup

Осцилляционные Результаты T2K

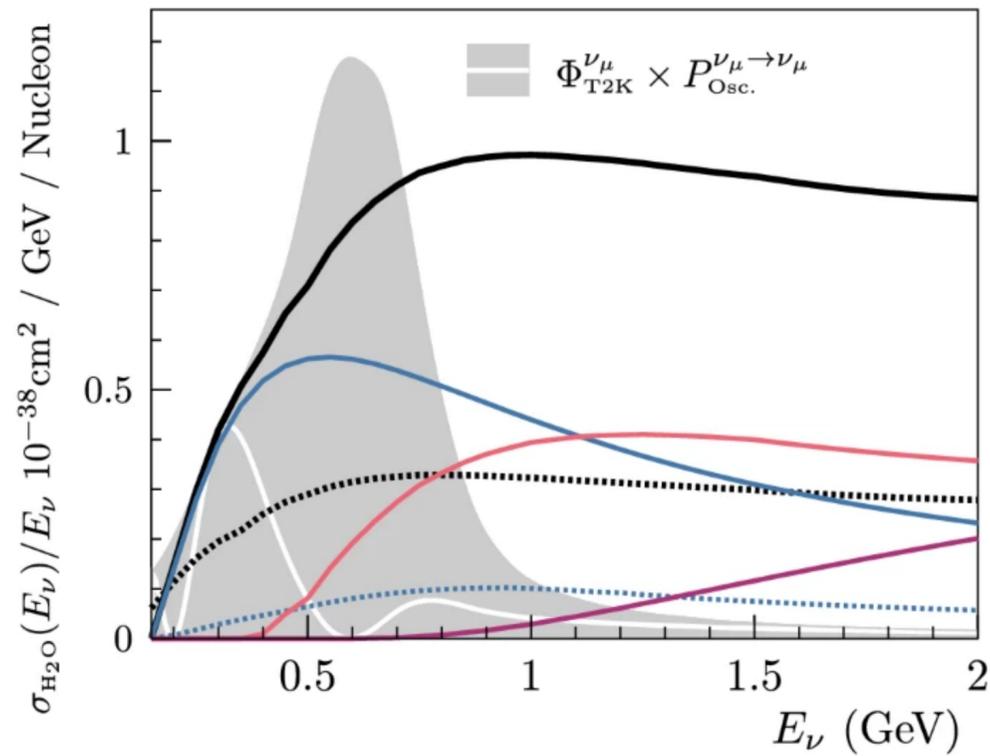
- World-leading measurements of θ_{23} and Δm_{32}^2 :
 - Mild preference for upper octant of θ_{23} and normal mass hierarchy
- $\delta_{CP} = 0$ and π (CP-conservation) excluded at 90% CL

([Eur. Phys. J. C 83, 782 \(2023\)](#))

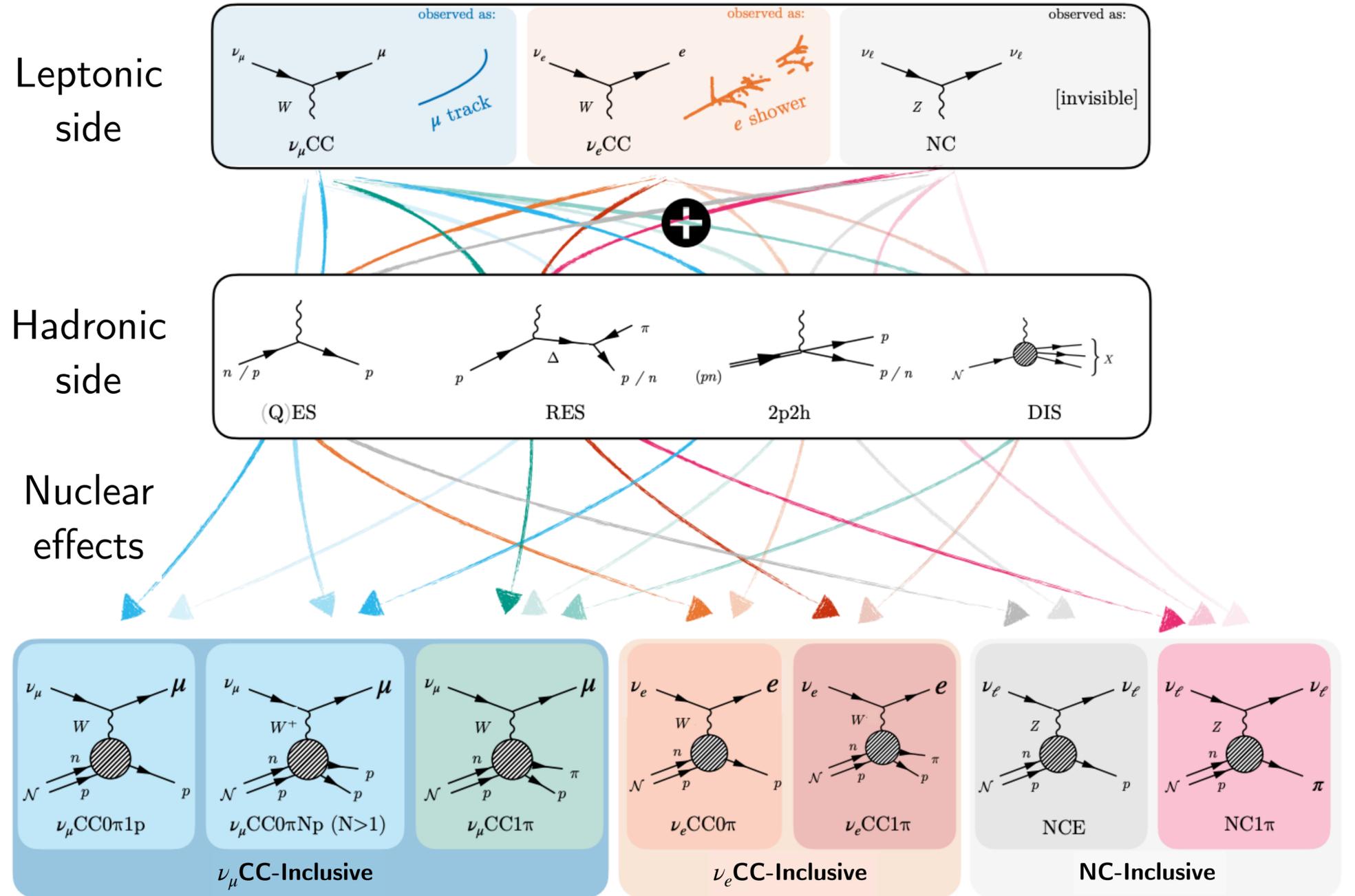


Нейтринные Взаимодействия

- CC Inclusive
- CC Quasi-elastic
- CC Resonant 1 π
- ⋯ NC Inclusive
- ⋯ CC 2p2h
- CC Multi- π + DIS



Eur. Phys. J. Spec. Top. 230, 4469–4481 (2021)



Образцы Событий Super-Kamiokande

