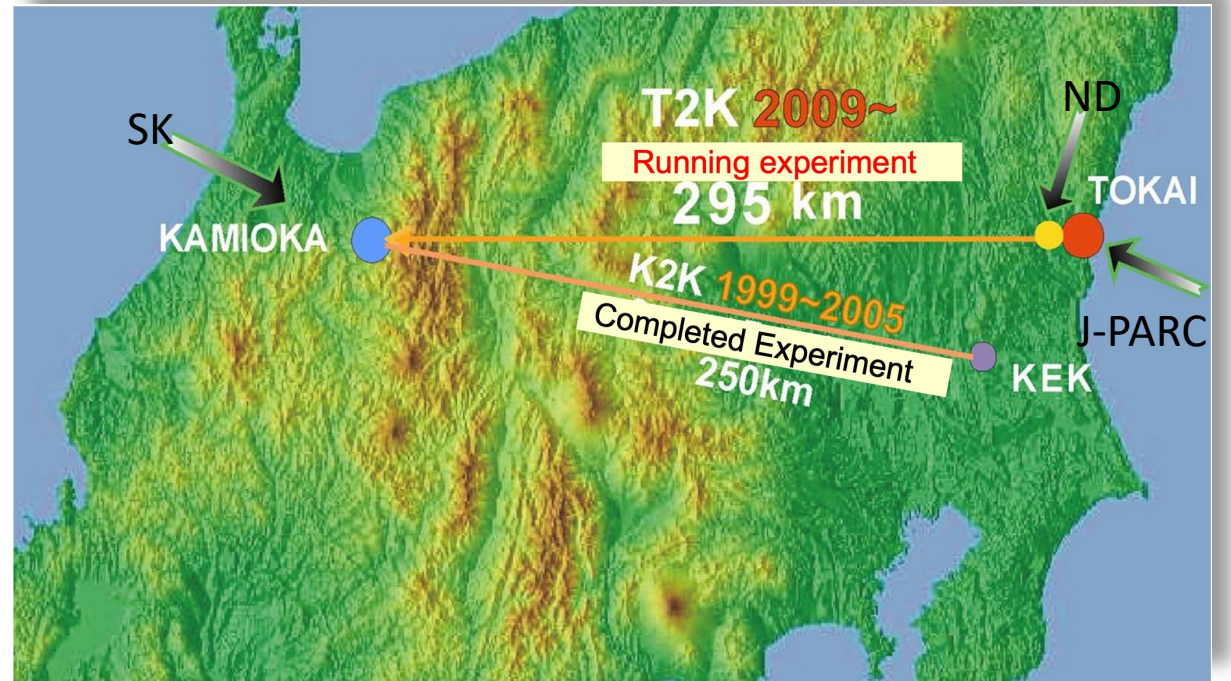




# Исследование нейтринных осцилляций в экспериментах K2K и T2K



М. Хабибуллин (ИЯИ РАН)

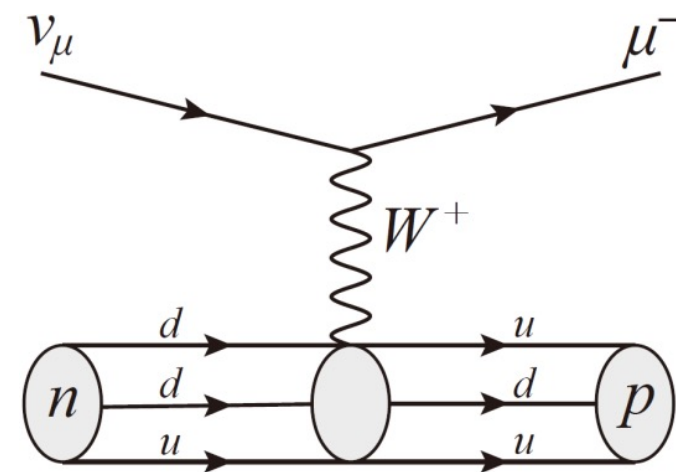
Юбилейный семинар: 70-лет Ю.Г. Куденко

5 октября 2021 г.



# Осцилляционные параметры нейтрино

- Нейтрино (при *рождении* и *детектировании*) описываются собственными состояниями *слабых взаимодействий*  $|\nu_\alpha\rangle$  ( $\alpha = e; \mu; \tau$ )
- $|\nu_\alpha\rangle$  – суперпозиция собственных *массовых* состояний  $|\nu_i\rangle$  ( $i = 1, 2, 3$ ):  $|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U^*_{\alpha i} |\nu_i\rangle$
- Связь – через унитарную  $3 \times 3$  матрицу  $U$  (PMNS)



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

PMNS  $\equiv$  Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata



# Осцилляции нейтрино

(в случае Дираковского нейтрино)

$$P_{\alpha \rightarrow \beta} = |\langle \nu_{\beta}(L) | \nu_{\alpha} \rangle|^2 = \left| \sum_i U_{\alpha i}^* U_{\beta i} e^{-i \frac{m_i^2 L}{2E}} \right|^2$$

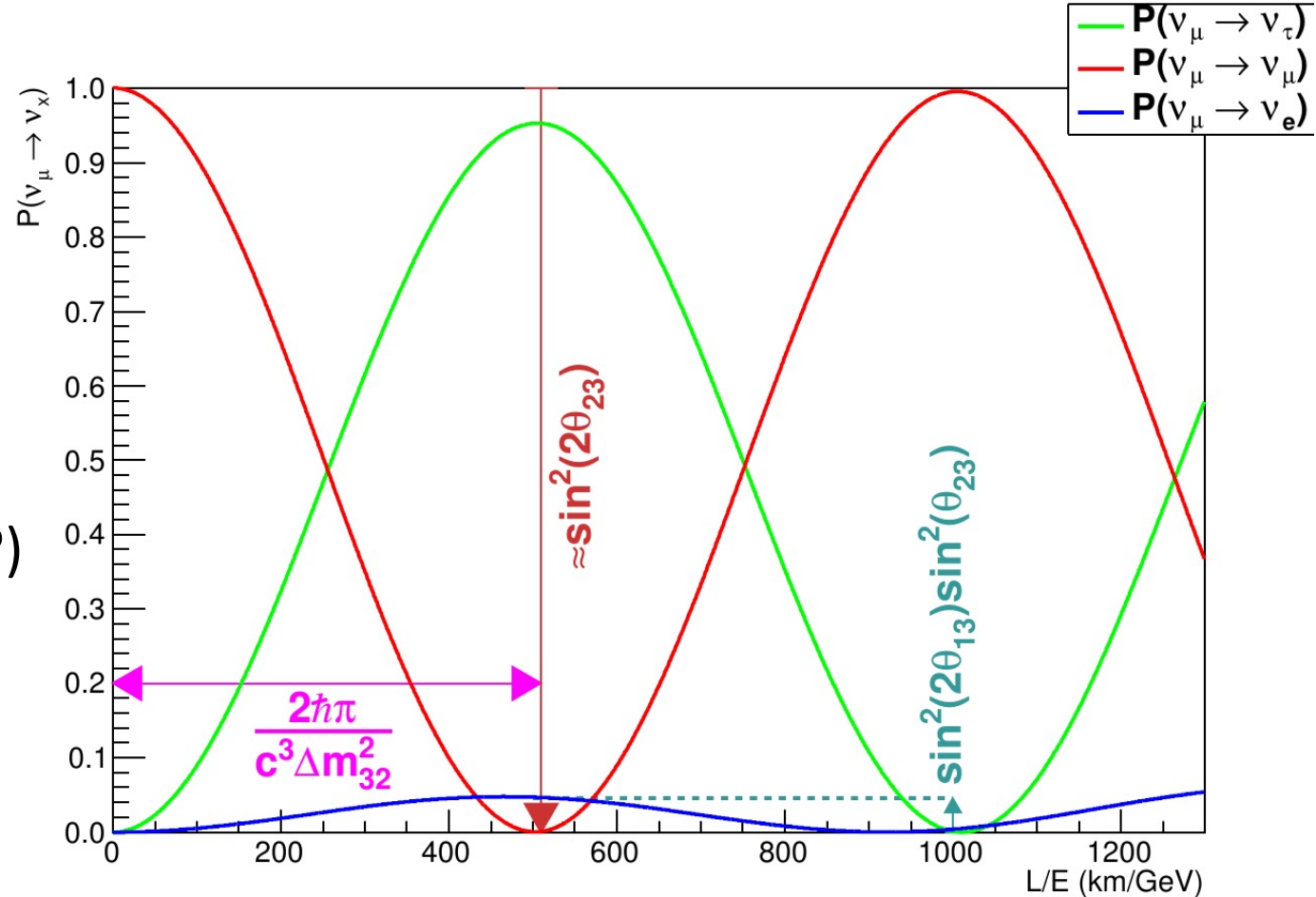
Вероятность перехода  $P(\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta})$

зависит от

- трёх углов смешивания  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{13}$
- одной CP нарушающей фазы  $\delta_{CP}$
- двух разностей  $\Delta m_{32}^2$ ,  $\Delta m_{21}^2$ \*)
- иерархии масс ( $m_3 > m_2$  или  $m_3 < m_2$ ?)
- энергии нейтрино  $E$
- пройденного расстояния  $L$

\*)  $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2, i \neq j$

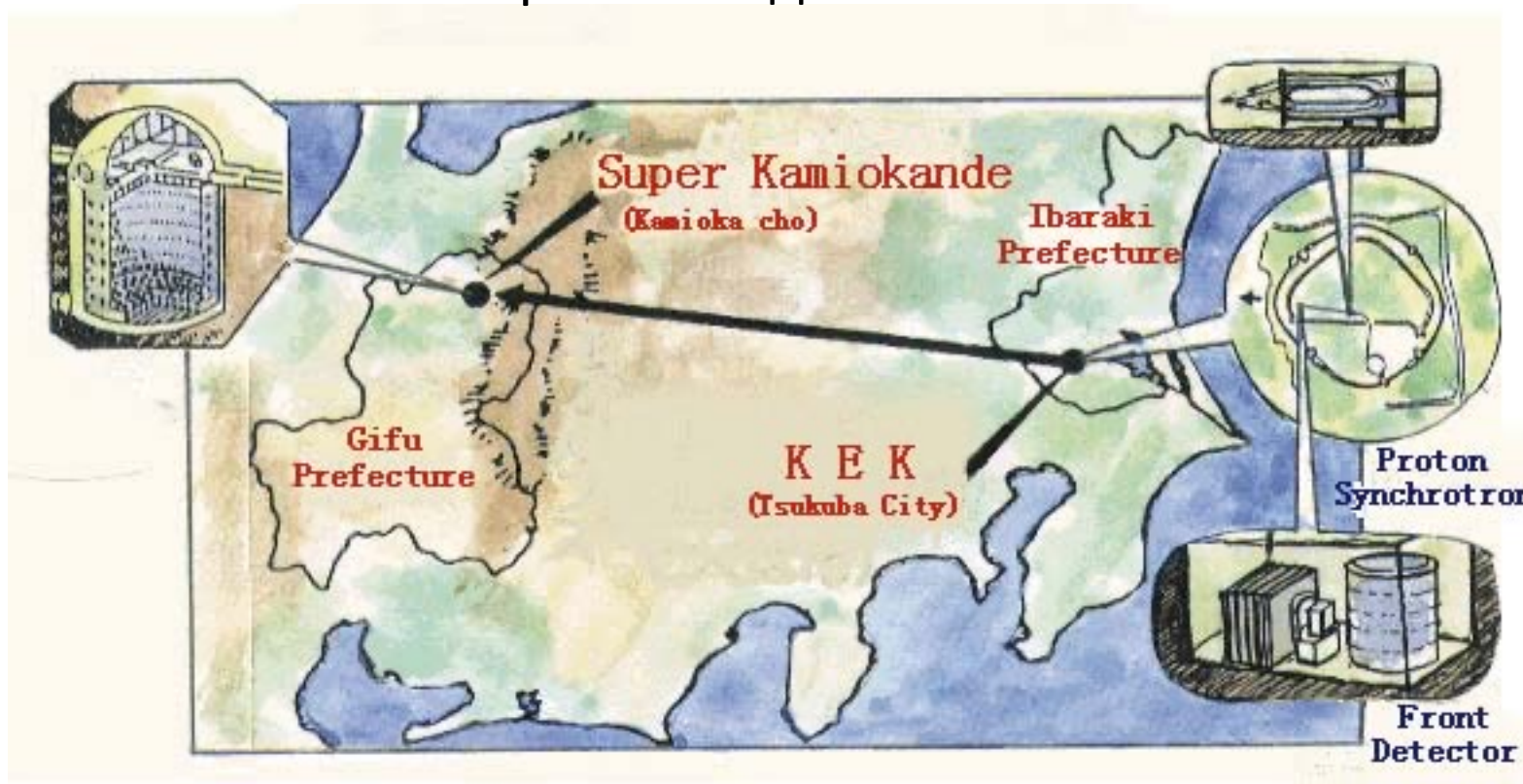
$$\Delta m_{12}^2 + \Delta m_{13}^2 + \Delta m_{23}^2 = 0$$





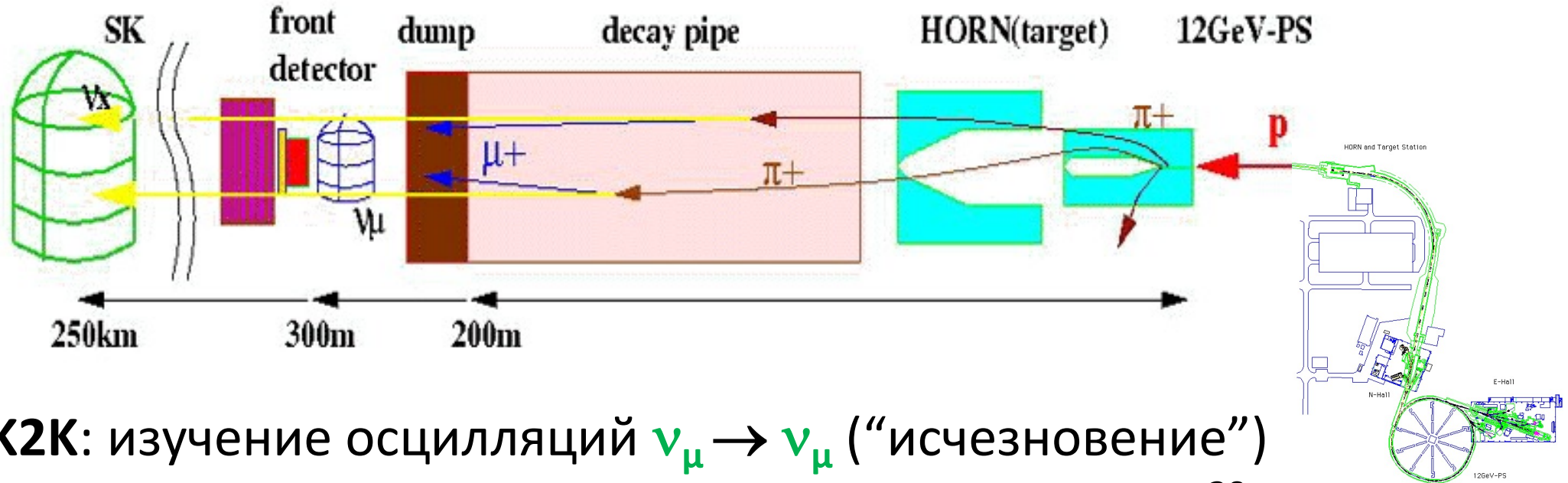
# K2K (KEK-to-Kamioka)

Первый ускорительный нейтринный эксперимент с длинной базой





# Эксперимент K2K (1999 – 2004)



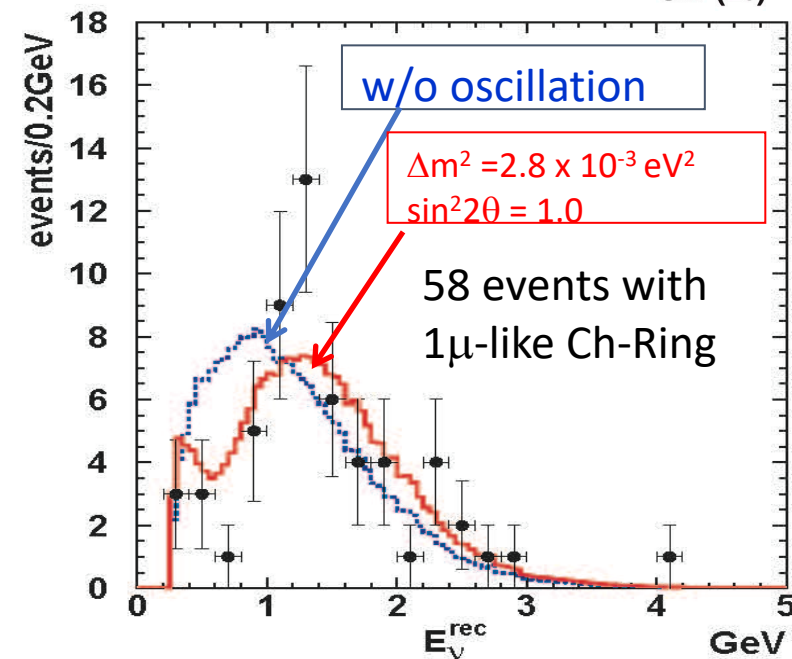
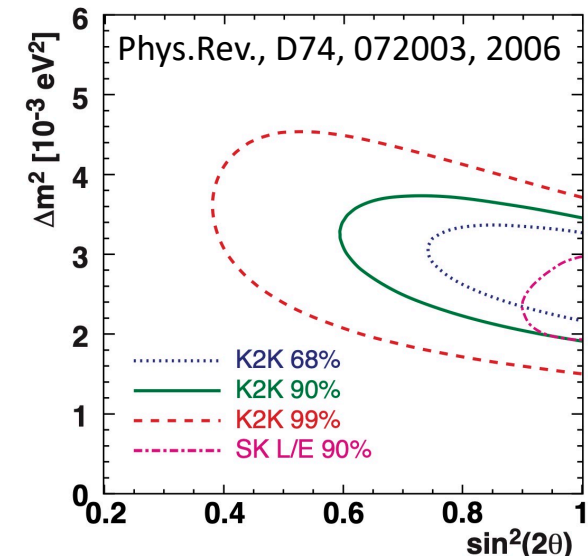
- Цель K2K: изучение осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$  (“исчезновение”)
  - Набор статистики: **1999-2001; 2003-2004**; всего  **$0.9 \times 10^{20}$  POT\***)
  - Источник: протонный синхротрон, КЕК-PS,  $E_p = 12$  ГэВ; *Al* мишень
  - Ближние детекторы: **1 kt** water Cherenkov; SciFi; LeadGlass/SciBar; MRD
  - Дальний детектор: **50 kt** water Cherenkov (Super-Kamiokande)
- $L = 250 \text{ km} / \langle E_\nu \rangle = 1.3 \text{ GeV}$**

\*) POT = Protons On Target



# Эксперимент K2K: результаты

- **K2K** обнаружил **дефицит** мюонных нейтрино ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ ): зарегистрировано **112** событий (без осцилляций ожидалось  **$158.1_{-8.6}^{+9.2}$**  событий). Отсутствие осцилляций исключено на уровне  **$4.3\sigma$**
- Осцилляционные параметры **соответствуют** атмосферным значениям, полученным в эксперименте Супер-Камиоканде (**SK**):  
 $\Delta m^2_{32} \approx 2.8 \times 10^{-3} \text{ eV}^2/c^4$ ;  $\sin^2 2\theta_{23} \approx 1.0$
- Подтверждено **искажение** энергетического спектра нейтрино в дальнем детекторе SK





# Эксперимент К2К: участники

**1998 г.:** институты из **3** стран  
(США ; Южная Корея и Япония)

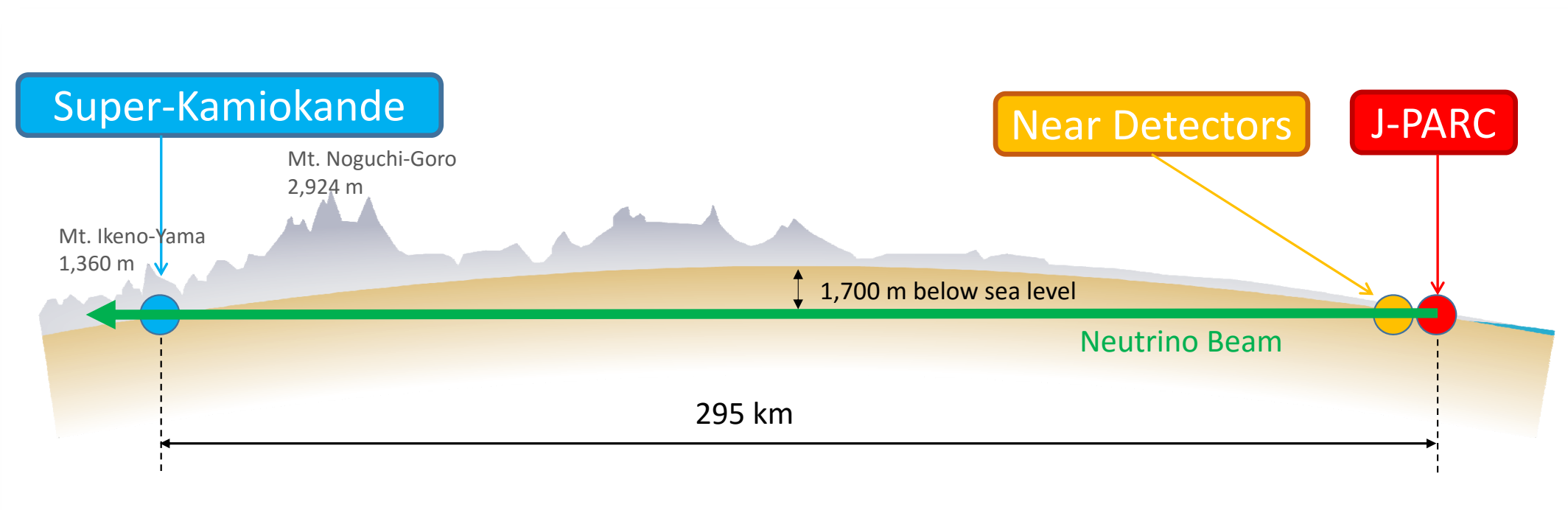


**2004 г.:** институты из **10** стран  
(+ Испания; Италия; Канада;  
Польша; Россия; Франция;  
Швейцария)



От России: в **2002 г.** группа ИЯИ  
РАН (В.А. Матвеев, С.П. Михеев,  
Ю.Г. Куденко и др.) вступила в  
**К2К** (и в проект **T2К**)

# Эксперимент T2K (Tokai-to-Kamioka)







# Эксперимент T2K: краткая история



**2001:** Письмо о намерениях (*Letter of Intent*)

2001: начало строительства протонного ускорителя J-PARC

2004: начало строительства нейтринного канала

2009: первый пуск ускорителя, приемка

**2010:** начало набора данных ( $\nu$ -режим), мощность пучка  
50-100 кВт

**2011:** указание на обнаружение  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  осцилляций

**2013:** открытие  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  осцилляций

2014: антинейтринный режим, первые ограничения  $\delta_{CP}$

2016: Breakthrough Prize (K2K/T2K и 4 других эксперимента)

**2019:** первые указания на нарушение **CP** в  $\nu$ -осцилляциях

2020-2021: **гадолиний** в SK,  $Gd_2(SO_4)_3$ , 0.01%

...

## Primary goals

(as in **2006** T2K proposal):

1. The discovery of  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  (i.e., the confirmation that  $\theta_{13} > 0$ ).
2. Precision measurements of oscillation parameters in  $\nu_\mu$  disappearance.
3. Search for sterile neutrinos.

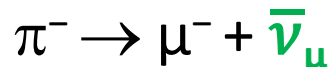
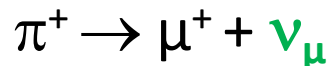
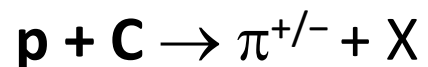
## Current goals (2021):

1. CP violation ( $\delta_{CP}$ ) in  $\nu$ -sector?
2. Precision measurements of  $\theta_{23}$ : which octant ( $\theta_{23} > \pi/4$  or  $\theta_{23} < \pi/4$ )?
3. Mass ordering:  $m_3 > m_2$  or  $m_3 < m_2$ ??

# Источник нейтрино

## Протонный комплекс J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

**Мишень:** графит  
( $\varnothing 26 \text{ mm} \times 914 \text{ mm}$ )



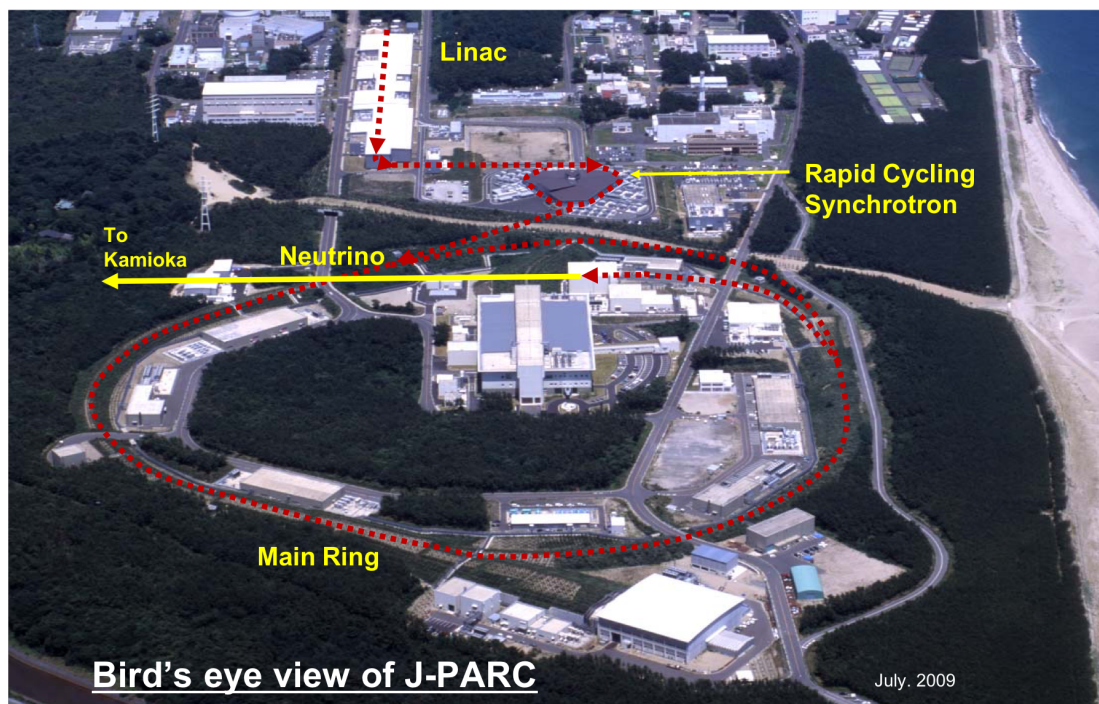
3 э/м (horns):  $\pm 250 \text{ кА}$

$E_{\nu}$  (пик,  $2.5^{\circ}$ ):  $\sim 0.6 \text{ ГэВ}$

**Состав пучка (в пике):**

$\nu$ -режим:  $\sim 97\% \nu_{\mu}$

$\bar{\nu}$ -режим:  $\sim 96\% \bar{\nu}_{\mu}$



3 ускорителя:

- 1) линейный (400 МэВ)
- 2) малое кольцо (3 ГэВ)
- 3) основное кольцо (30 ГэВ)

Энергия протонов: 30 ГэВ

Мощность пучка:  $\sim 515 \text{ кВт}$

Структура: 8 bunches

Период: 2.48 с

Интенсивность:  $\sim 2.6 \text{ E}14 \text{ ppp}$

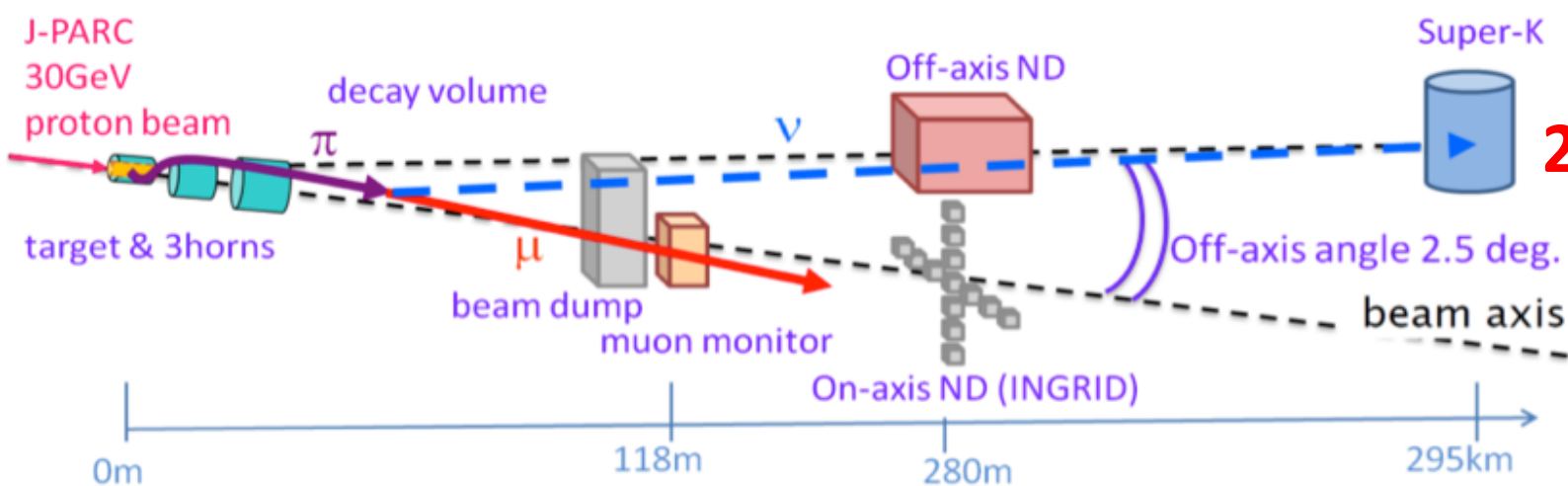
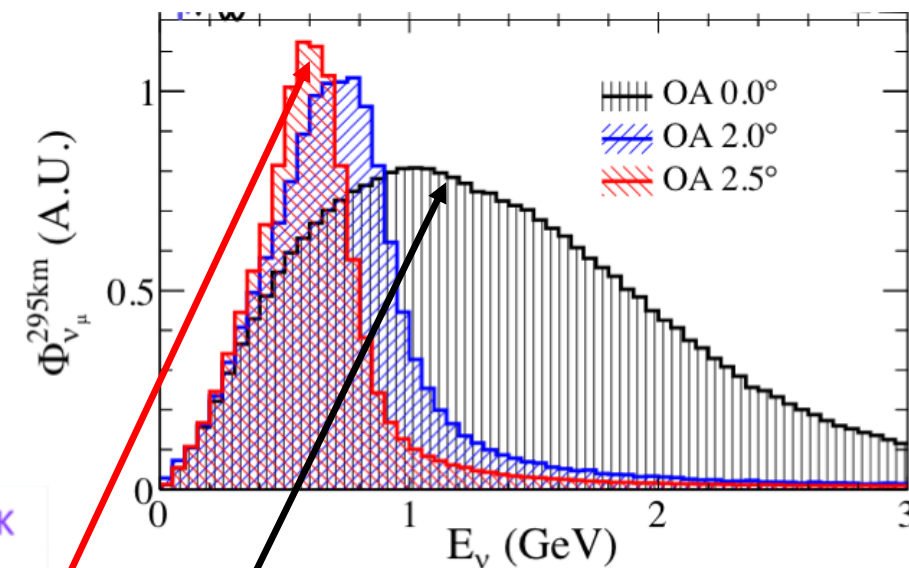
[ppp = protons per pulse]



# Внеосевой (off-axis) пучок нейтрино



- Кинематика распада  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ : **узкий спектр нейтрино под небольшим углом к оси пучка, пик  $E_\nu$  (@2.5°)  $\sim 0.6$  ГэВ.**
- В T2K пик для угла  $2.5^\circ$  соответствует осцилляционному максимуму при  $L = 295$  км.
- При этом подавляются нейтрино с высокой энергией



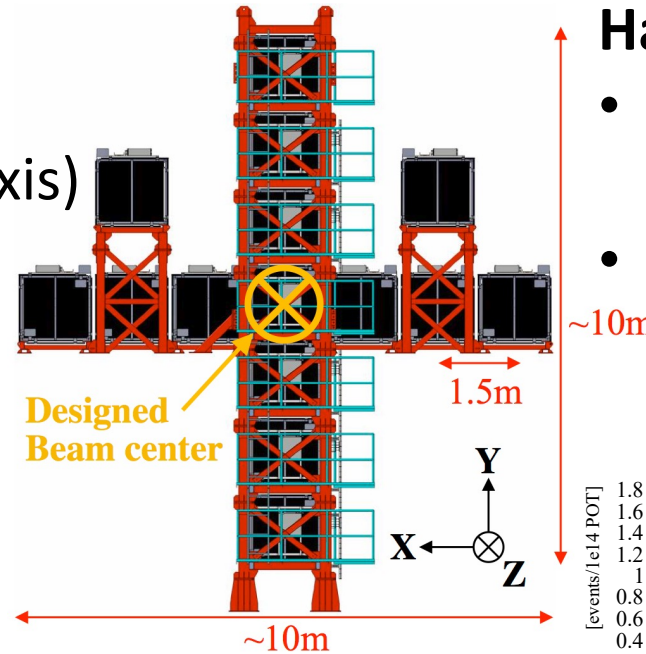


# Ближний детектор INGRID (on-axis)



## Ближний детектор INGRID (Interactive Neutrino GRID):

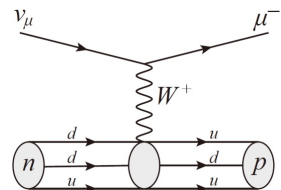
- расположен на оси пучка (on-axis)
- состоит из 14 + 2 модулей
- каждый модуль – сэндвич из пластикового сцинтиллятора и железа
- дополнительно: протонный модуль полностью из пластикового сцинтиллятора



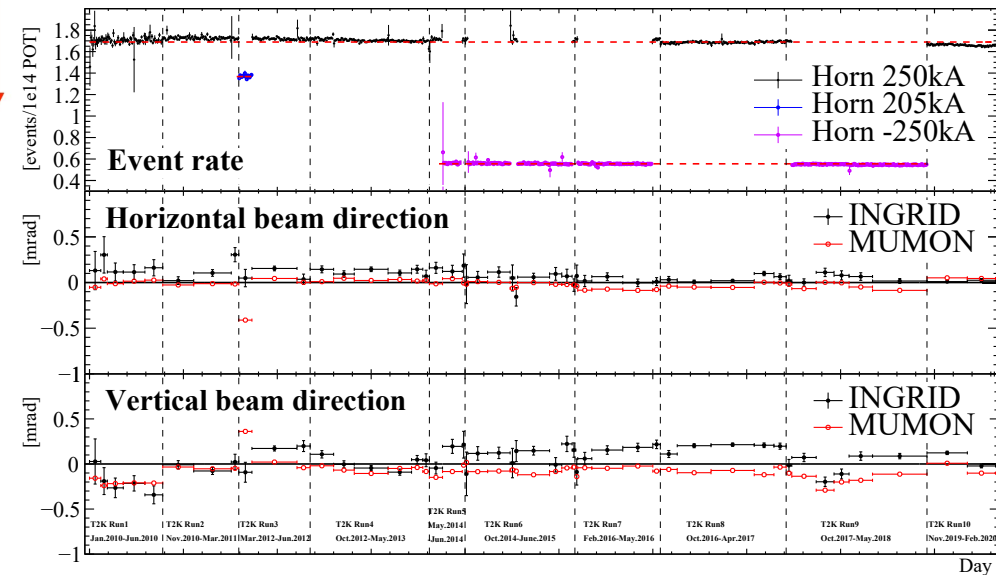
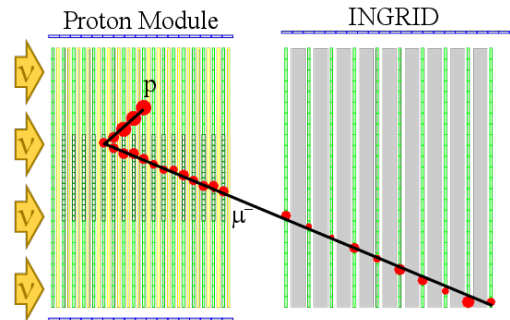
## Назначение INGRID:

- мониторинг нейтринного пучка (направление и стабильность)
- сечение вз-вия  $\nu$ : Fe, C

1 mrad shift of  $\nu$ -beam  $\Rightarrow$  2% shift in  $E_\nu$  peak energy @ 295 km



CCQE





# Ближний детектор ND280 (off-axis @2.5°) T2K

## Ближний детектор ND280

- Трекер = 3 TPC + 2 FGD в

магнитном поле 0.2 Т

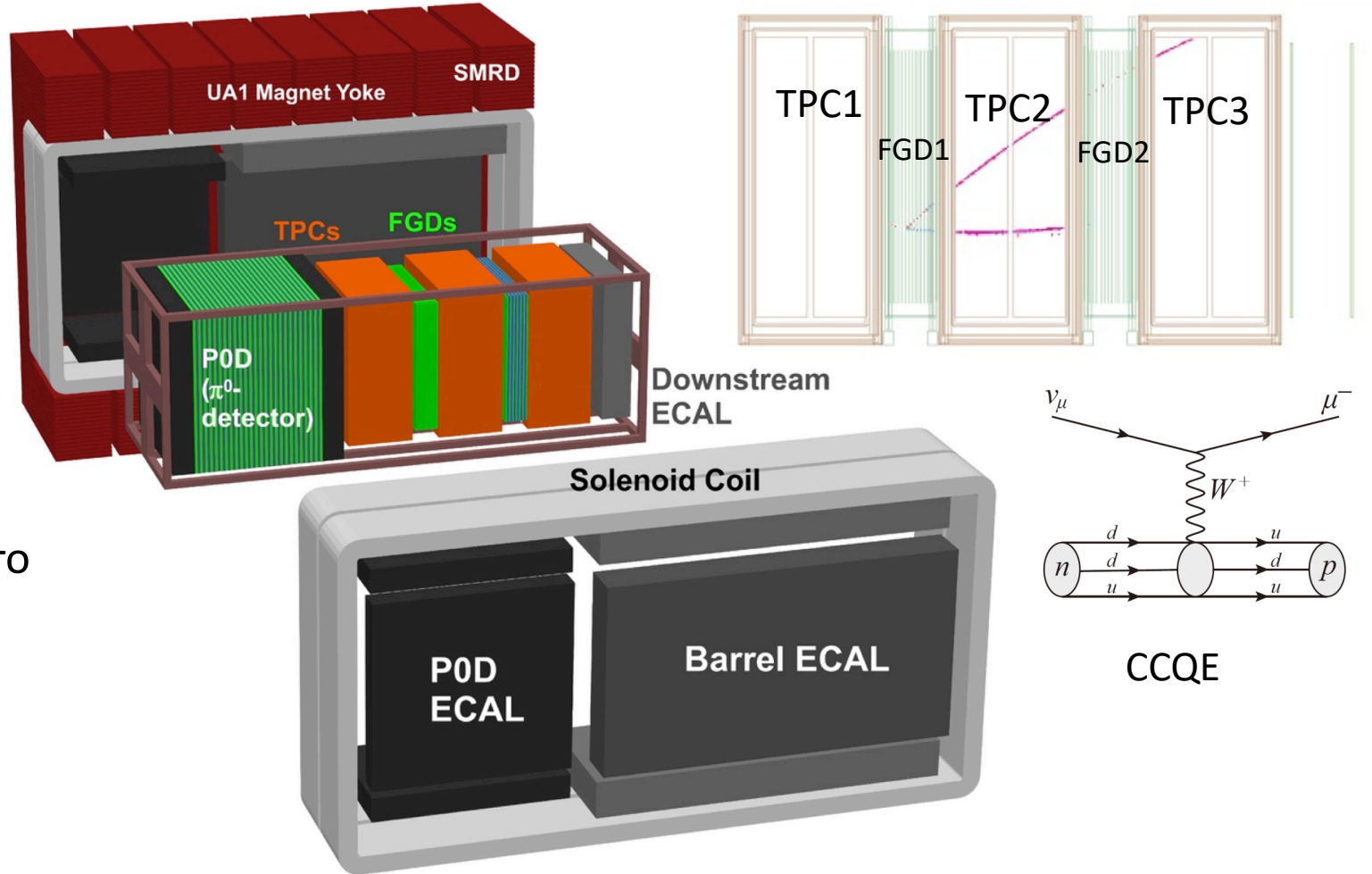
(FGD1: plastic scintillator;

FGD2: plastic scintillator +water)

- POD; ECaL; SMRD

## Задачи ND280

- измерение параметров нейтринного пучка до осцилляций;
- ограничение неопределённостей нейтринного потока и сечений нейтринных взаимодействий



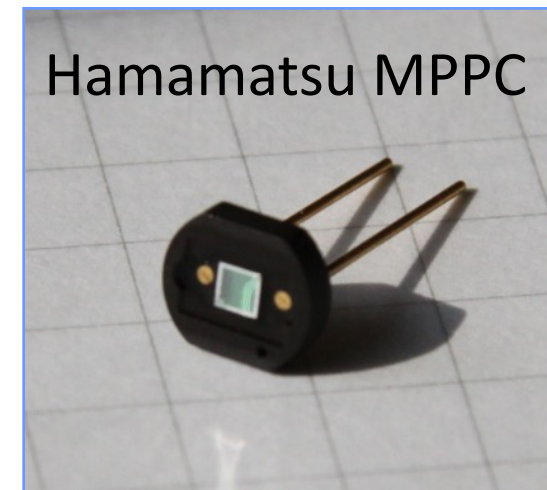
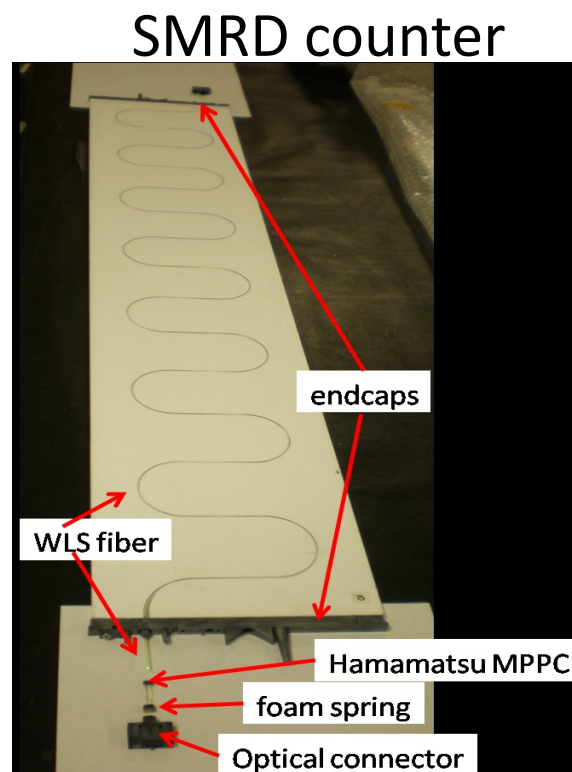
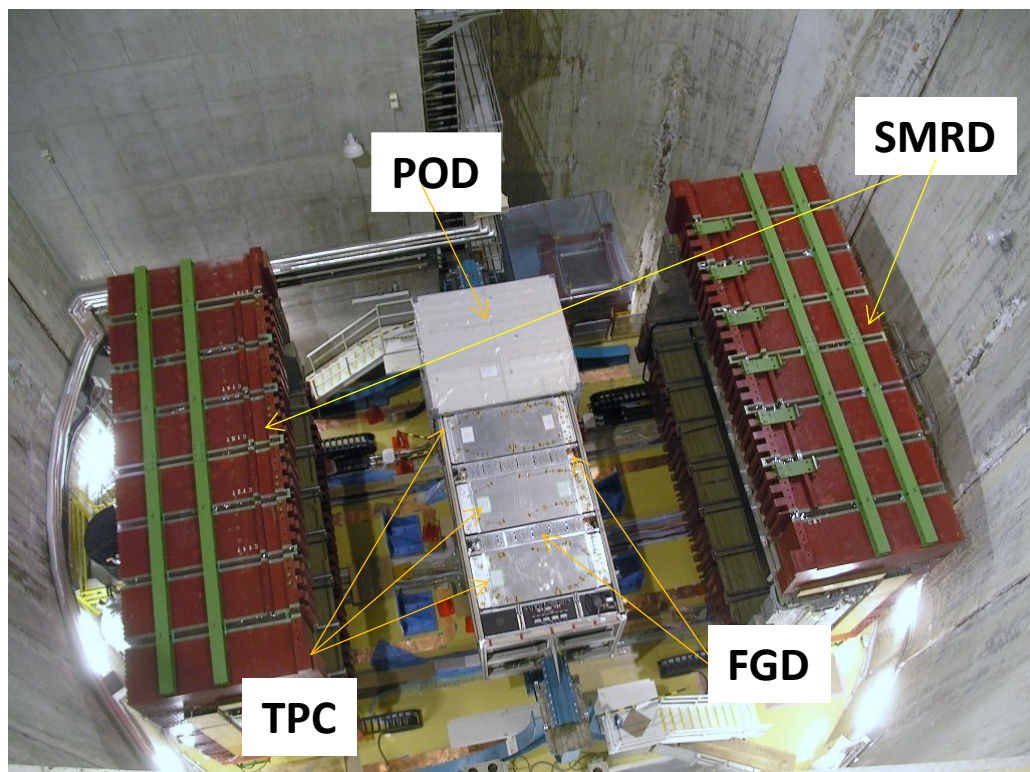
TPC = Time projection chamber

FGD = fine-grained detector

SMRD = Side Muon Range Detector

ECaL = e/m calorimeter  
POD =  $\pi^0$  detector

CCQE = charged-current quasi elastic



Около 60 тыс. фотодиодов (ND280 & INGRID)

- 1) Сцинтилляционные счетчики для SMRD детектора (в кооперации с ООО «УНИПЛАСТ», г. Владимир);
- 2) НИОКР по улучшению лавинных микропиксельных фотодиодов (ЦПТА, Москва) → Серия Рабочих Совещаний **PhotoDet (PD15** – в Троицке, 2015)



# Ближний детектор WAGASCI/BabyMIND:

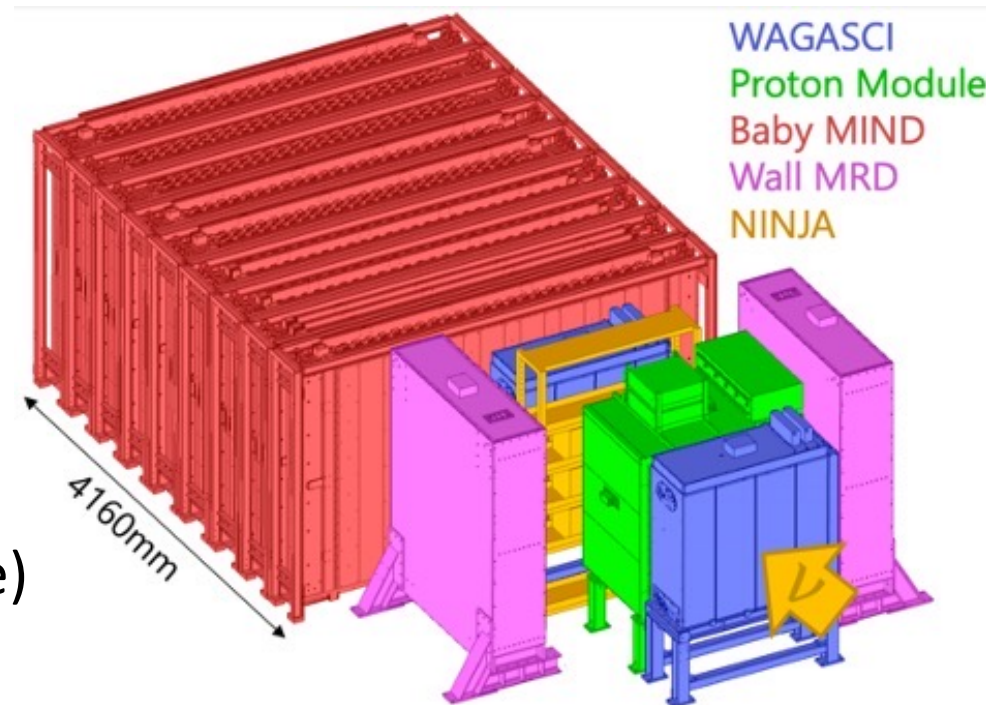
## (off-axis @1.5°)

**WAGASCI** (WATER-Grid-SCIntillator) – детектор, сцинтилляционные ячейки которого заполнены водой.

**Baby MIND** - магнитный нейтринный детектор (сэндвич из железа и пластиковых сцинтилляторов)

**Wall MRD** – сцинтилляционный детектор мюонного пробега

Весь комплекс изучает взаимодействия нейтрино (1-2 Гэв) с ядрами кислорода (в воде) и углерода (в пластике)



### Вклад ИЯИ РАН:

- 1) сцинтилляционные счетчики для BabyMIND
- 2) сцинтилляционные счетчики для Wall MRD



# Дальний детектор T2K: Super-Kamiokande **T2K**

## Super-Kamiokande:

- ✓ 50 тыс. тонн чистой воды
- ✓ Водный черенковский детектор
- ✓ высокоэффективное (>99%) разделение  $\mu$ - и  $e$ - сигналов
- ✓ GPS синхронизация с пучком J-PARC

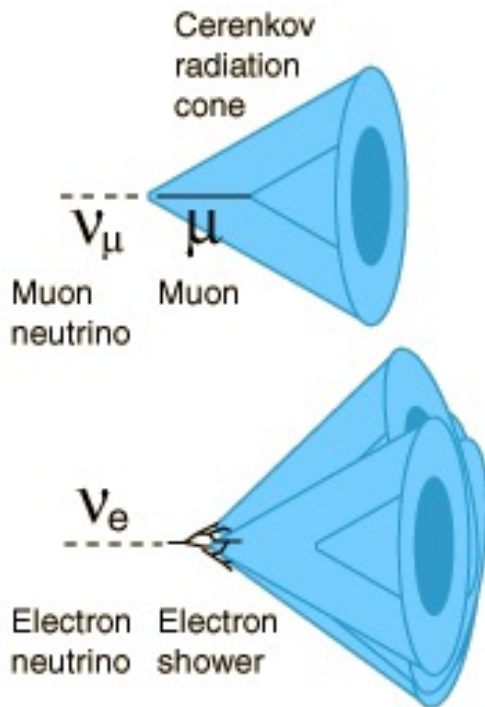
### Внутренний детектор (ID):

- ✓ >11000 ФЭУ ( $\varnothing$ 50 см)
- ✓ 40% photo-coverage

### Внешний детектор (OD):

- ✓ ~2000 PMTs ( $\varnothing$ 20 см)

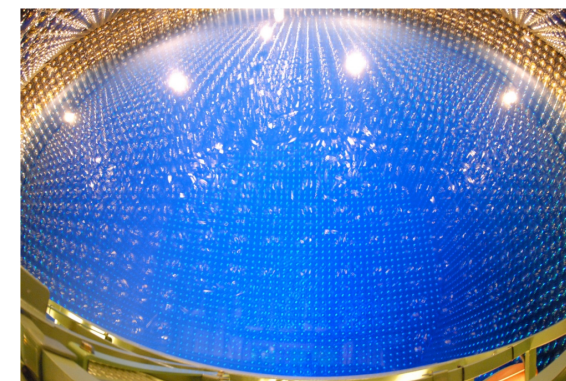
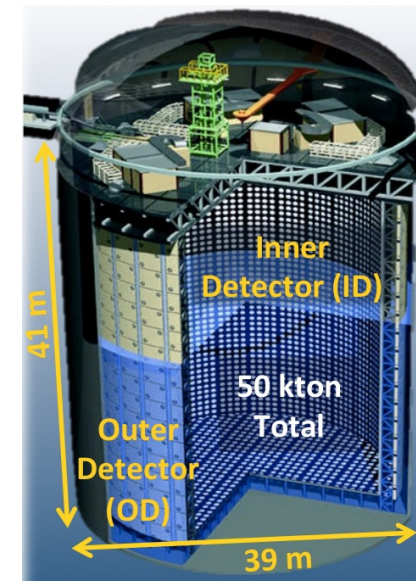
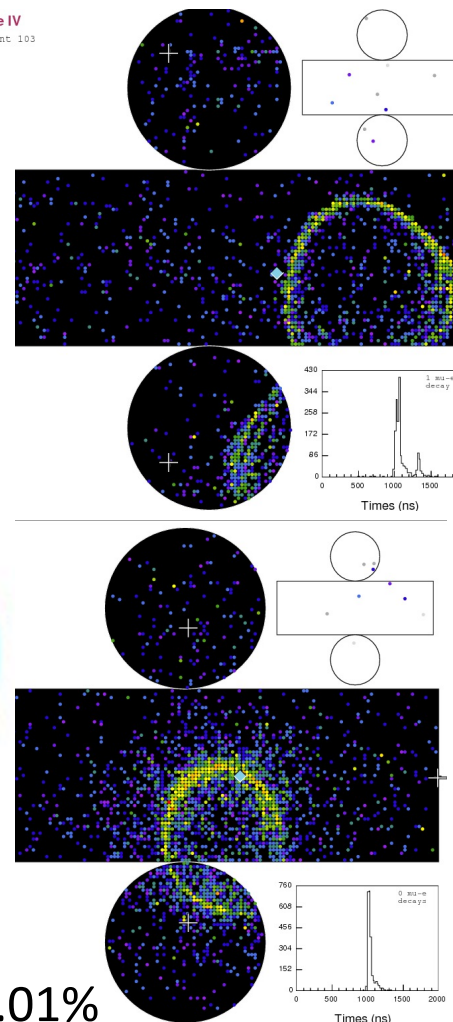
2020-2021: гадолиний в SK,  $Gd_2(SO_4)_3$ , 0.01%



```

iokande IV
ab 0 Event 103
it
v 4243 pe
l pe
l
: 0 MeV/c

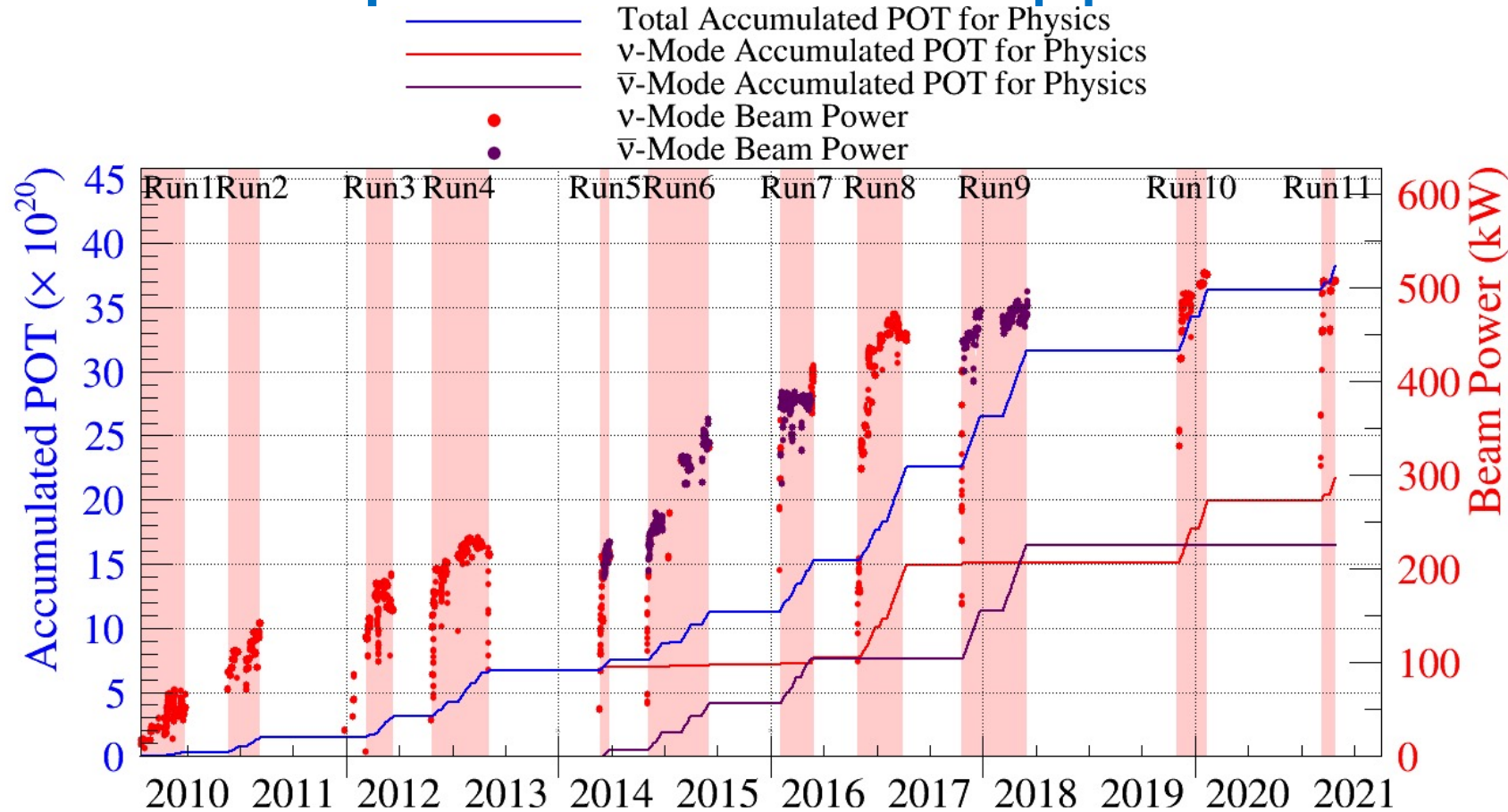
```







# Экспериментальные данные T2K



Достигнутая мощность пучка: **522 кВт**;  
 Стабильная работа: при **515 кВт**

POT = protons on target

Всего **набрано** данных (23 янв 2010 г. – 27 апр 2021 г.):  **$3.82 \times 10^{21}$  POT**

$\nu$ -режим:  $2.17 \times 10^{21}$  POT;  $\bar{\nu}$ -режим:  $1.65 \times 10^{21}$  POT

Всего **проанализировано** (янв. 2010 г. – фев. 2020 г.):  **$3.60 \times 10^{21}$  POT**

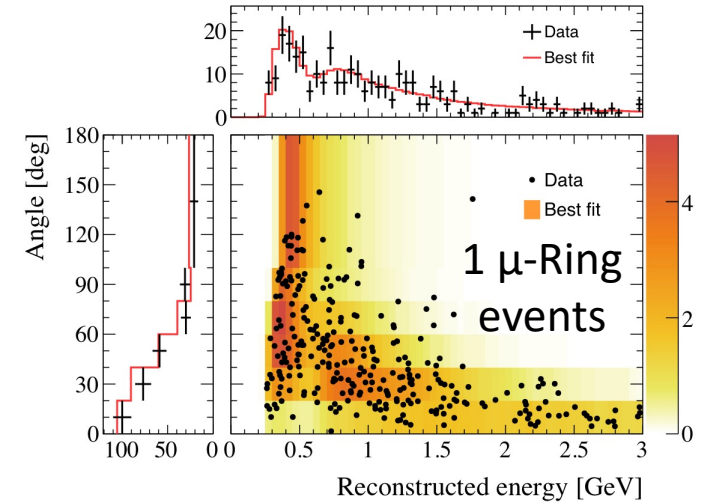
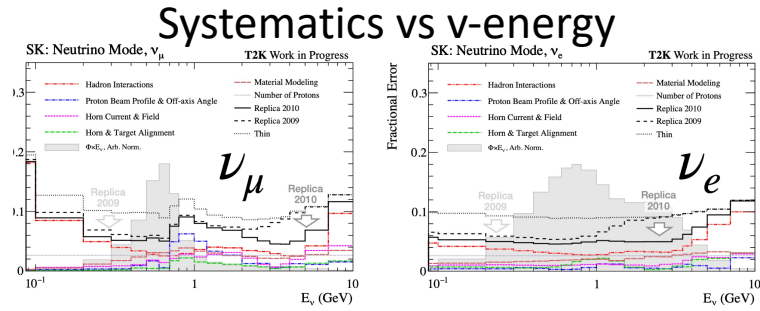
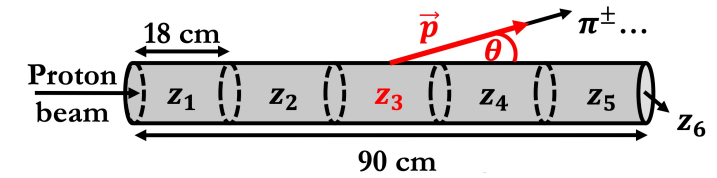
$1.96 \times 10^{21} (\nu) + 1.64 \times 10^{21} (\bar{\nu})$  POT



# Анализ данных T2K



- Вычисляются параметры **нейтринного потока, сечений взаимодействия и систематики** для ближнего и дальнего детекторов (используются данные J-PARC, NA61/SHINE, других экспериментов и моделирование – FLUKA, GEANT)
- Отбираются данные в **ND280 (18 наборов)**, а также в **SK (5 наборов)**: 3 в  $\nu$ -режиме ( $\mu$ -CCQE,  $e$ -CCQE,  $e$ -CC1 $\pi^+$ ) и 2 в  $\bar{\nu}$ -режиме ( $\mu$ -CCQE,  $e$ -CCQE)\*
- В одном подходе данные **ближнего детектора ND280** используются для **ограничения неосцилляционных параметров** (нейтринного потока, сечений взаимодействия и систематических погрешностей); затем **осцилляционные параметры** получаются **подгонкой** при анализе всех 5 наборов данных SK одновременно – методом отношения функций правдоподобия (binned likelihood-ratio method):  
 $-2\ln\lambda(\text{осцил.параметры}, \text{неосц.параметры})$
- В другом подходе **все параметры (осцил.параметры, неосц.параметры)** подгоняются одновременно **для каждого события** из данных **ND280 и SK**
- Оба подхода показывают согласующиеся результаты



\*  $\nu$ -CCQE = Charged-Current Quasi Elastic:  $\nu n \rightarrow l p$   
 $e$ -CC1 $\pi^+$  = Charged-Current One pion:  $\nu_e N \rightarrow e^- N' \pi^+$



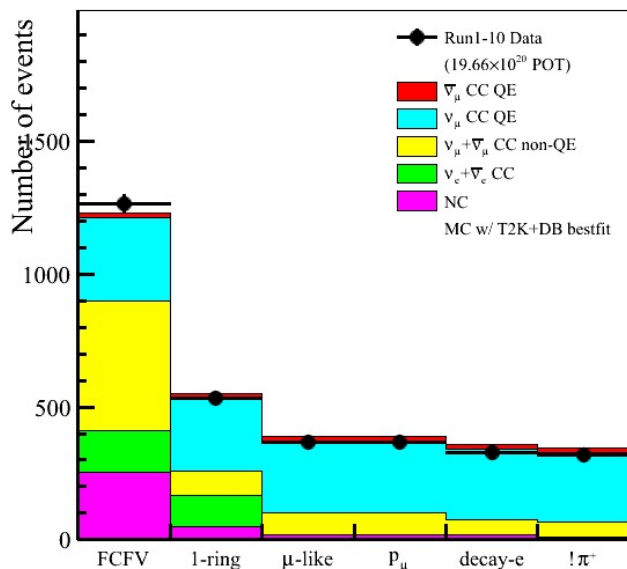
# Отбор событий в SK



Подавление фона от

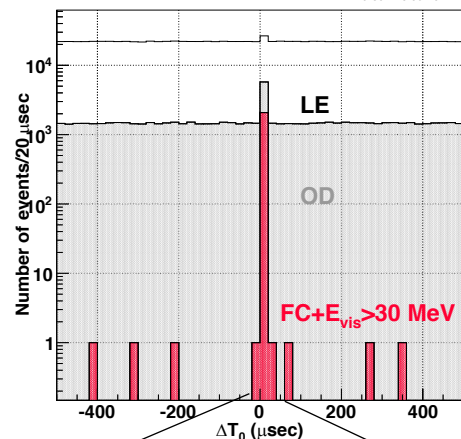
- космических лучей,
- радиоактивности окружающей среды,
- фоновых нейтринных процессов,
- шумов электроники и

т.д.

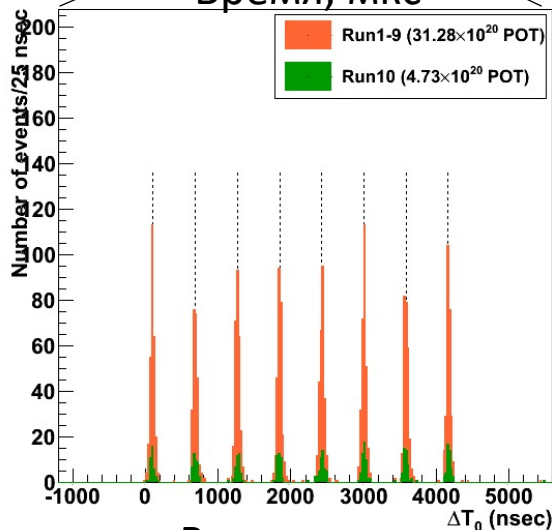


05.10.2021

[-500;500]μs



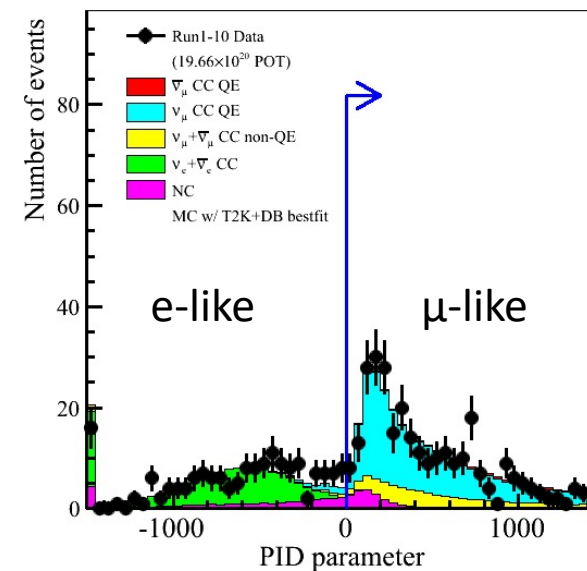
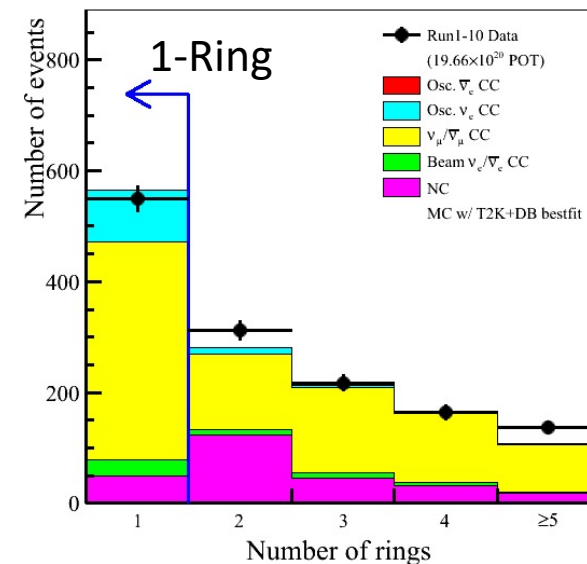
Время, мкс



Время, нс

[-1.0;5.0]μs

Эксперименты K2K и T2K. Семинар: 70 лет Ю.Г. Куденко



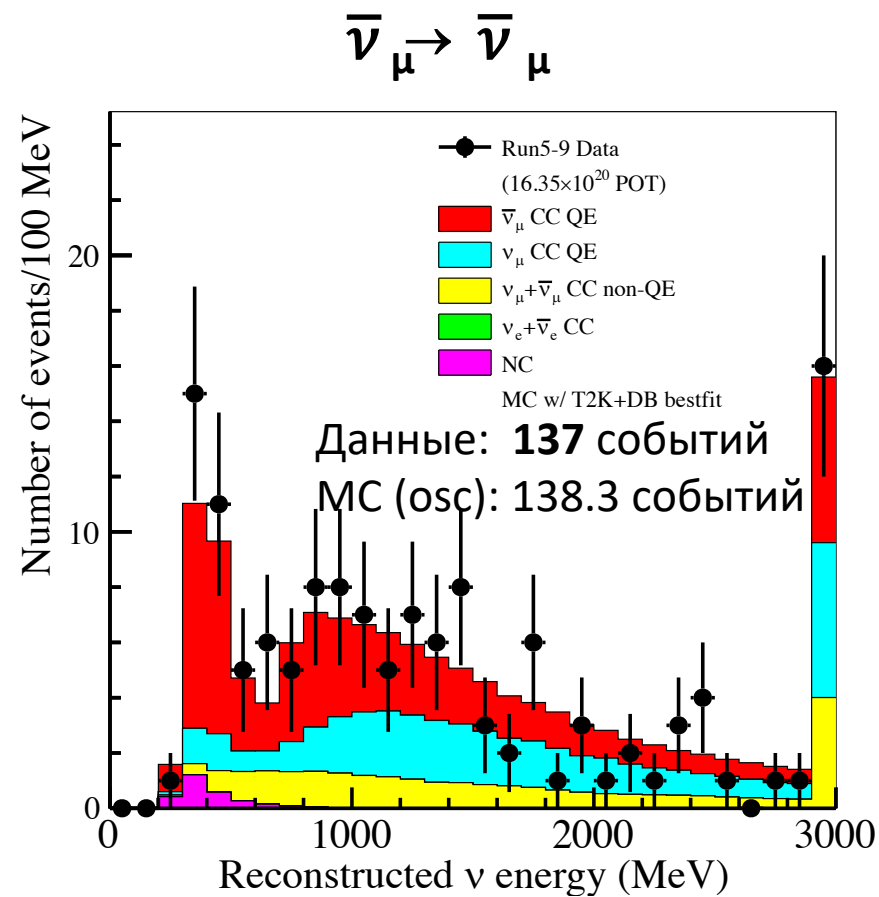
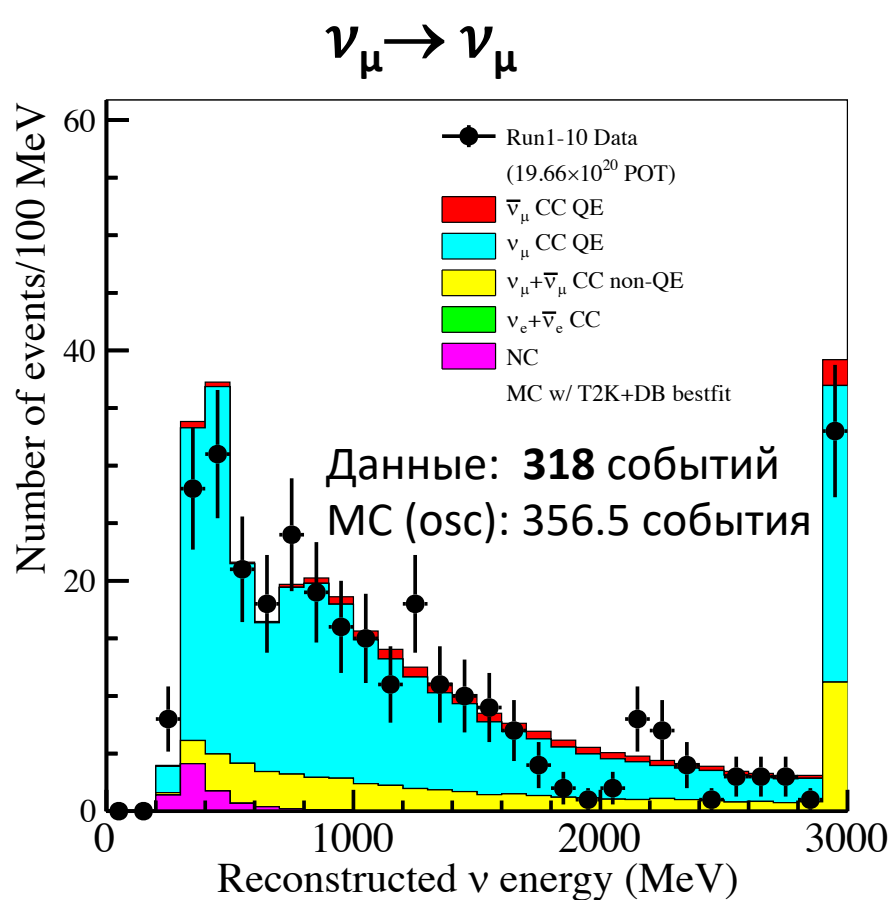
19



# Мюонные (анти)нейтрино в SK



$1.96 \times 10^{21} (\nu) + 1.64 \times 10^{21} (\bar{\nu})$  POT





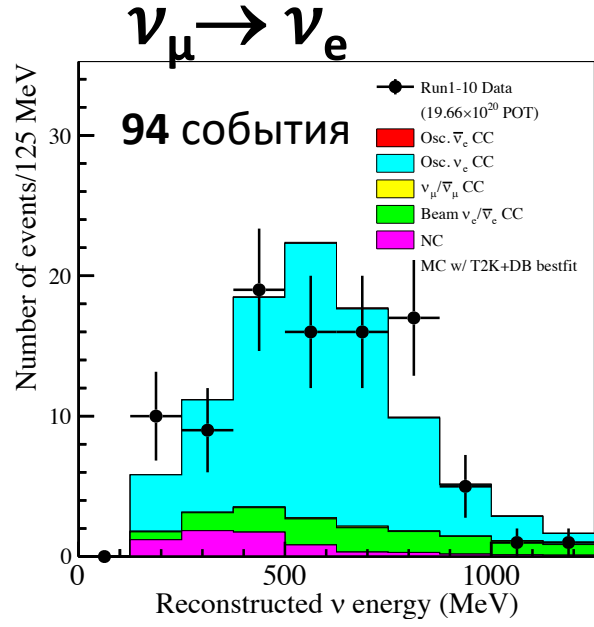
# Электронные (анти)нейтрино в SK



$1.96 \times 10^{21} (\nu) + 1.64 \times 10^{21} (\bar{\nu})$  POT

## $\nu_e$ CCQE

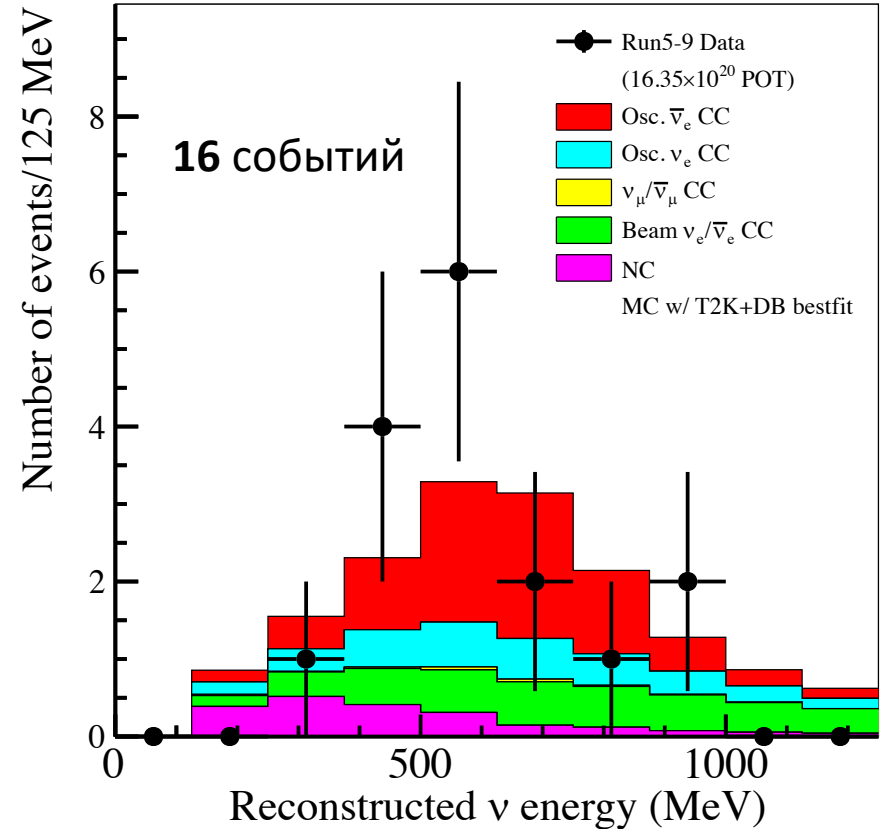
Данные: 94 события  
MC ( $\delta_{CP} = -\pi/2$ ): 97.6 соб.  
MC ( $\delta_{CP} = 0$ ): 82.4 соб.



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

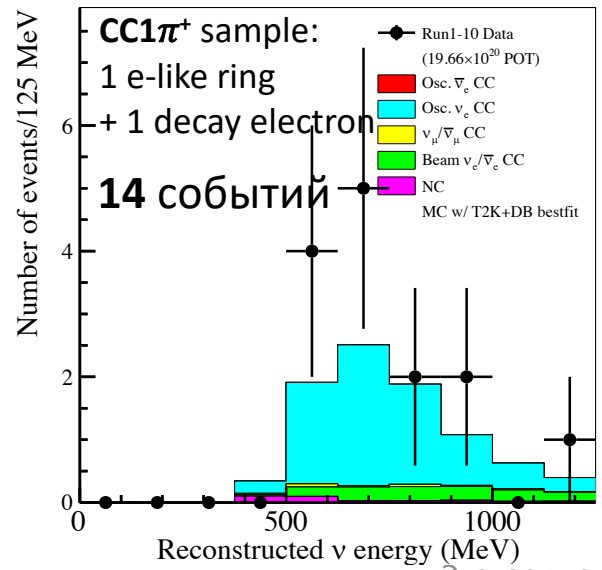
## $\bar{\nu}_e$ CCQE

Данные: 16 событий  
MC ( $\delta_{CP} = -\pi/2$ ): 16.7 соб.  
MC ( $\delta_{CP} = 0$ ): 18.96 соб.



## $\nu_e$ CC1 $\pi^+$

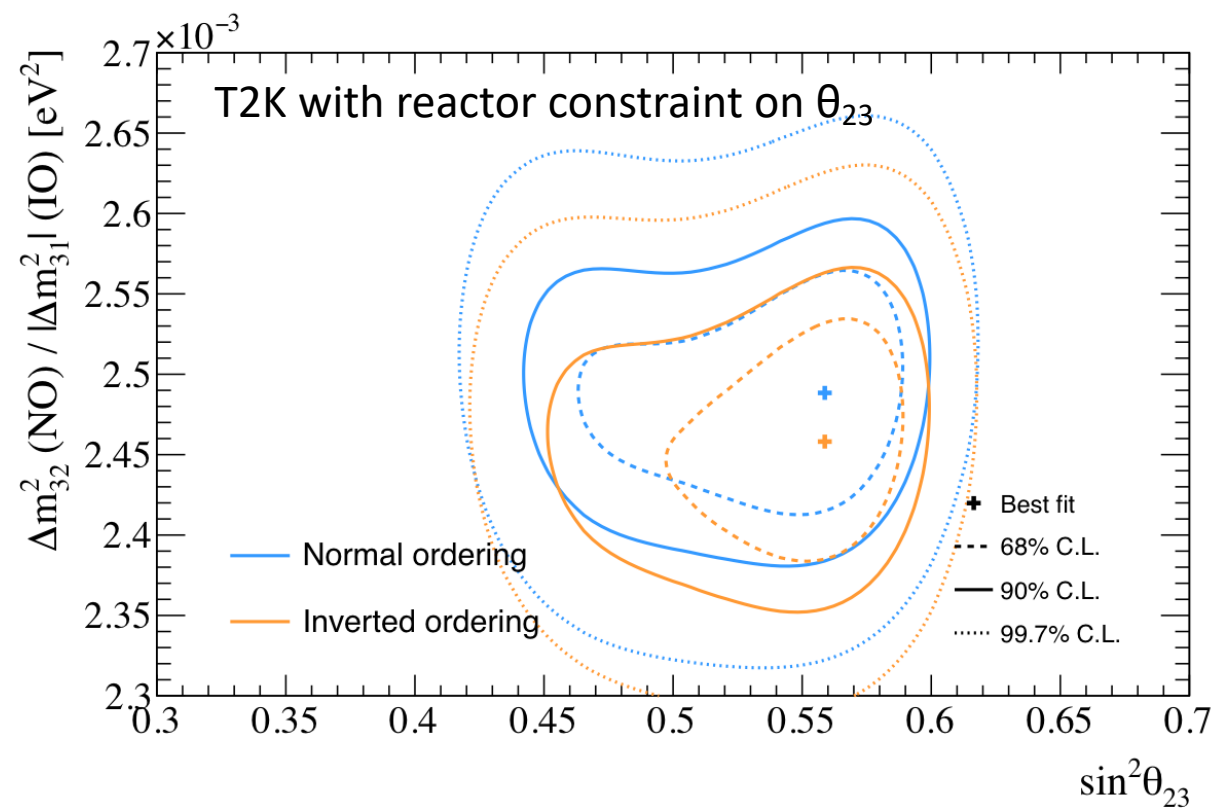
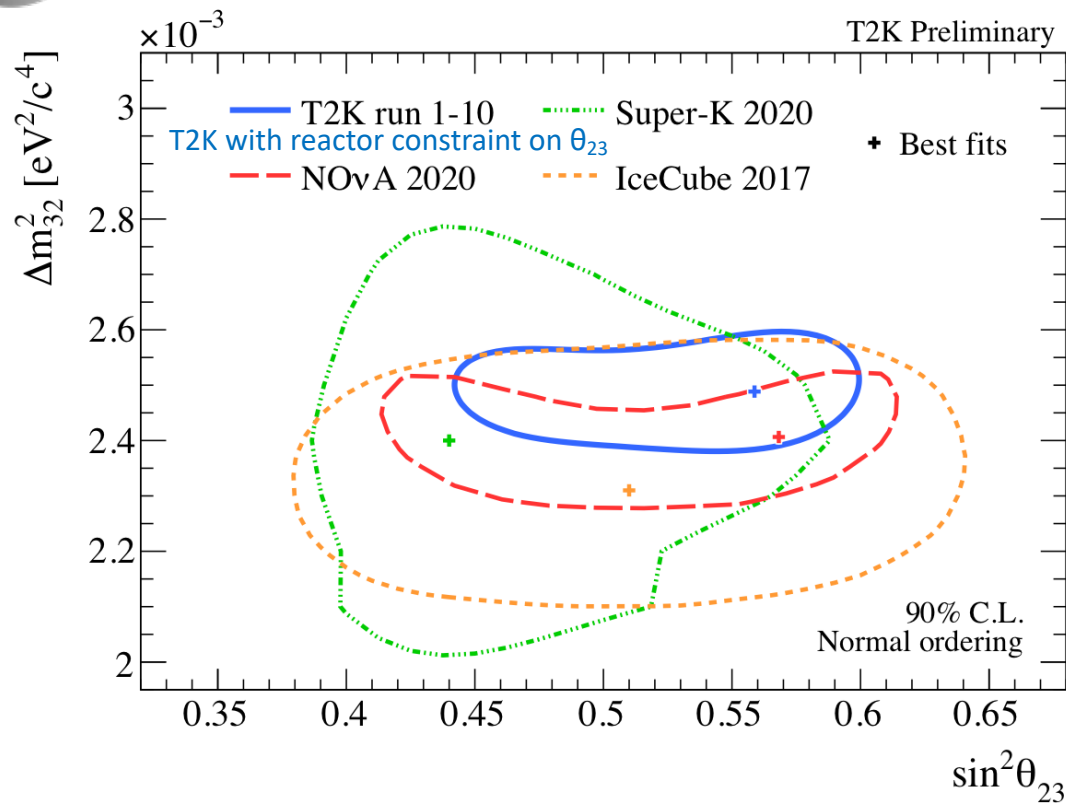
Данные: 14 событий  
MC ( $\delta_{CP} = -\pi/2$ ): 9.2 соб.  
MC ( $\delta_{CP} = 0$ ): 8.0 соб.



CCQE = Charged-Current Quasi Elastic:  $\nu_l n \rightarrow l p$   
CC1 $\pi^+$  = Charged-Current 1 charged pion:  $\nu_e N \rightarrow e^- N' \pi^+$



# Осцилляционные параметры ( $\Delta m^2_{32}, \theta_{23}$ ) T2K



Какой октант  $\theta_{23}$ ?

Апостериорная вероятность:

Какова иерархия масс?

	$\sin^2 \theta_{23} < 0.5$	$\sin^2 \theta_{23} > 0.5$	Sum
NH ( $\Delta m^2_{32} > 0$ )	0.195	0.613	0.808
IH ( $\Delta m^2_{32} < 0$ )	0.034	0.158	0.192
Sum	0.229	0.771	1.000

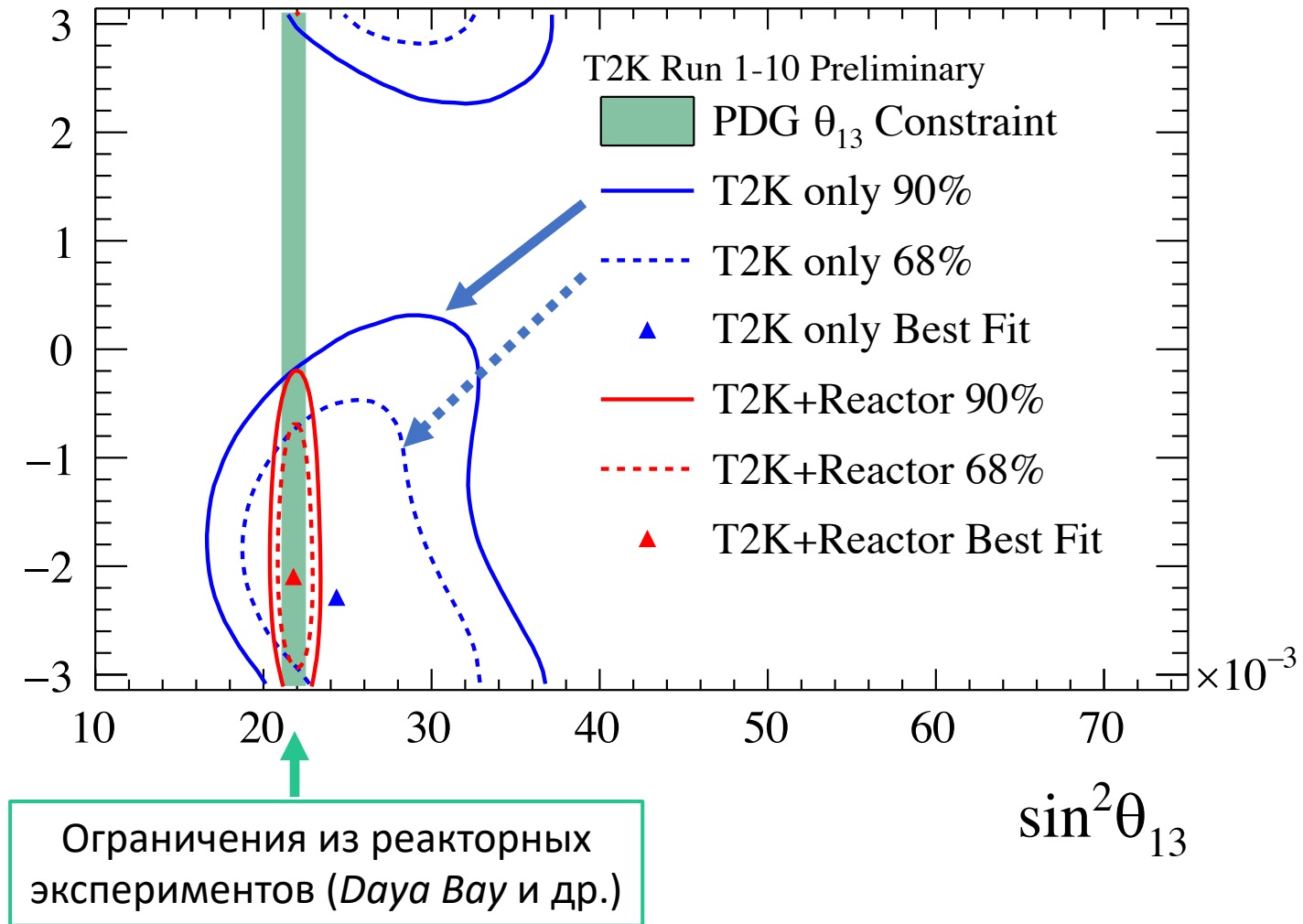
Bayes factor:

Легкое предпочтение  
**нормальной** иерар. (4.2:1)  
**верхнему октанту** (3.4:1)



# Осцилляционные параметры $\delta_{CP}$ и $\theta_{13}$ T2K

- Ограничения на  $\theta_{13}$  по результатам анализа **только данных T2K** согласуются с результатами реакторных экспериментов
- Использование ограничения на  $\theta_{13}$  из *реакторных* экспериментов (*Daya Bay* и др.) позволяет ограничить  $\delta_{CP}$



NO = Нормальная иерархия ( $m_3 > m_2$ )

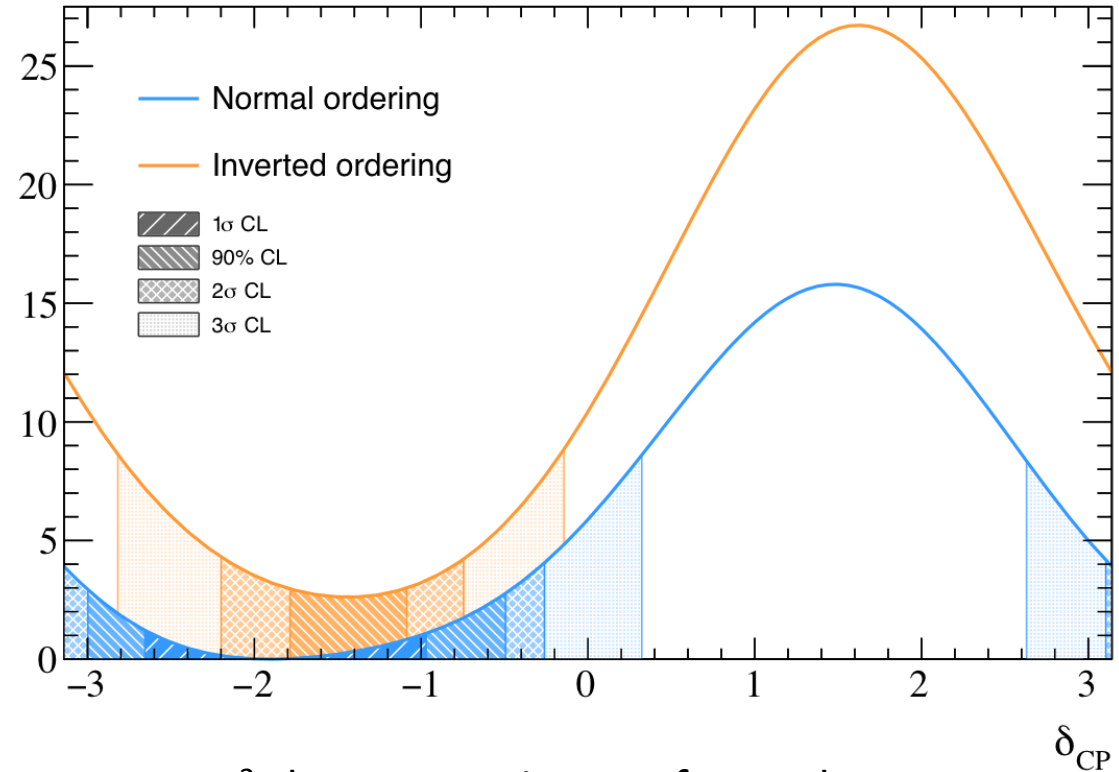


# Поиск CP нарушения: ограничение $\delta_{CP}$



После публикации *Nature* 580, 339-344 (2020)  $\Delta\chi^2$   
**обновлен анализ** (сечения/поток, SK калибровка и др.), проанализировано +~30% данных (Run 10)  
В результате:

- CP сохранение исключается на уровне достоверности **90%**
- Наилучшее значение фазы  $\delta_{CP}$  близко к максимально нарушающему CP ( $\delta_{CP}^{MAX} = -\pi/2$ )
- Значения  $\delta_{CP} = \pm\pi$  находятся на границе **2 $\sigma$**



Largest  $\Delta\chi^2$  change seen in any of our robustness studies would cause left (right) edge of 90% interval to move by 0.073 (0.080)

Confidence level	Interval (NH)	Interval (IH)
1 $\sigma$	$[-2.66, -0.97]$	
90%	$[-3.00, -0.49]$	$[-1.79, -1.09]$
2 $\sigma$	$[-\pi, -0.26] \cup [3.11, \pi]$	$[-2.20, -0.75]$
3 $\sigma$	$[-\pi, 0.32] \cup [2.63, \pi]$	$[-2.82, -0.14]$





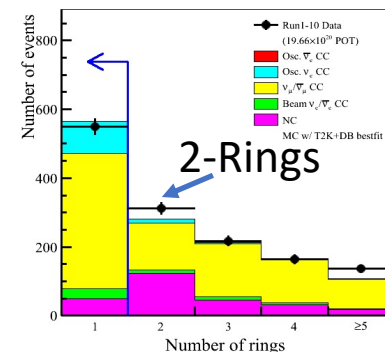
# Что дальше?



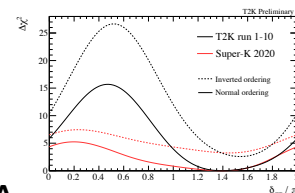
## Анализ:

- обновление анализа данных ближнего ND280 (сечения; 4π-события и др.) и дальнего SK детекторов (multi-ring события)
- объединенный анализ T2K-Super-K (атмосферные нейтрино)
- объединенный анализ T2K-NOvA

} чувствительность к иерархии масс



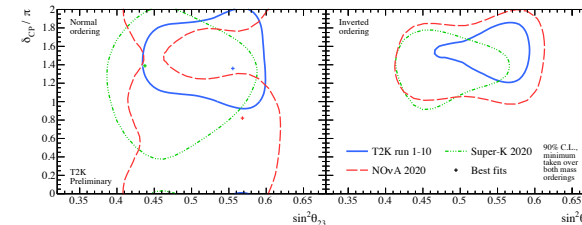
## T2K-Super-K



## «Железо»:

- модернизация ближнего детектора ND280 (см. доклад С. Суворова) -> уменьшение систематических погрешностей
- обновление систем питания и RF ускорительного комплекса J-PARC -> увеличение мощности пучка с ~500 кВт до 1.3 МВт (2026 г.)

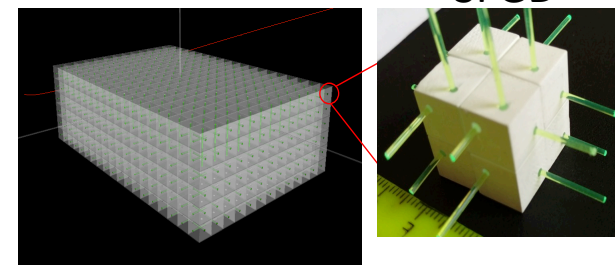
## T2K-NOvA



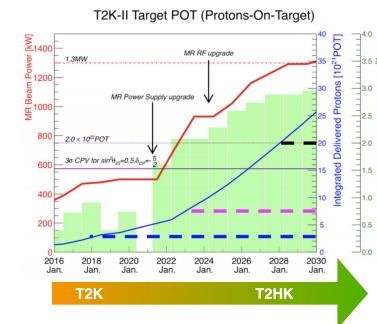
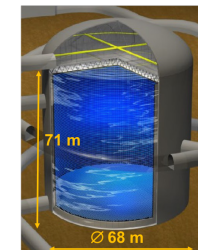
## Данные:

- T2K продолжит набирать статистику до 2026 г. [дальше – эксперимент Гипер-Камиоканде, см. доклад А. Измайлова]

## SFGD



## Hyper-K





# Заключение

## K2K (1999 – 2004 г.):

- подтверждены осцилляции мюонных нейтрино (дефицит)

## T2K (2010 – 2026?):

- За 11 лет сеансов (23.01.2010 – 27.04.2021) накоплено  $3.82 \times 10^{21}$  POT ( $\nu$ :  $2.17 \times 10^{21}$ ;  $\bar{\nu}$ :  $1.65 \times 10^{21}$  POT); достигнута мощность 522 кВт
- Результаты для **CP нарушающей фазы** указывают на значение, близкое к максимальному  $\delta_{CP}^{MAX} = -\pi/2$  (для нормальной иерархии масс)
- Значения **CP сохраняющей фазы**  $\{\delta_{CP} = 0 \text{ и } \delta_{CP} = \pm\pi\}$  **исключены** на 90% уровне достоверности для  $3.60 \times 10^{21}$  POT ( $\nu$ :  $1.96 \times 10^{21}$ ;  $\bar{\nu}$ :  $1.64 \times 10^{21}$  POT)
- В 2022 г. планируется модернизация ближнего детектора ND280 и продолжение набора данных



# С Днем Рождения, Юрий Григорьевич!



2006 г.

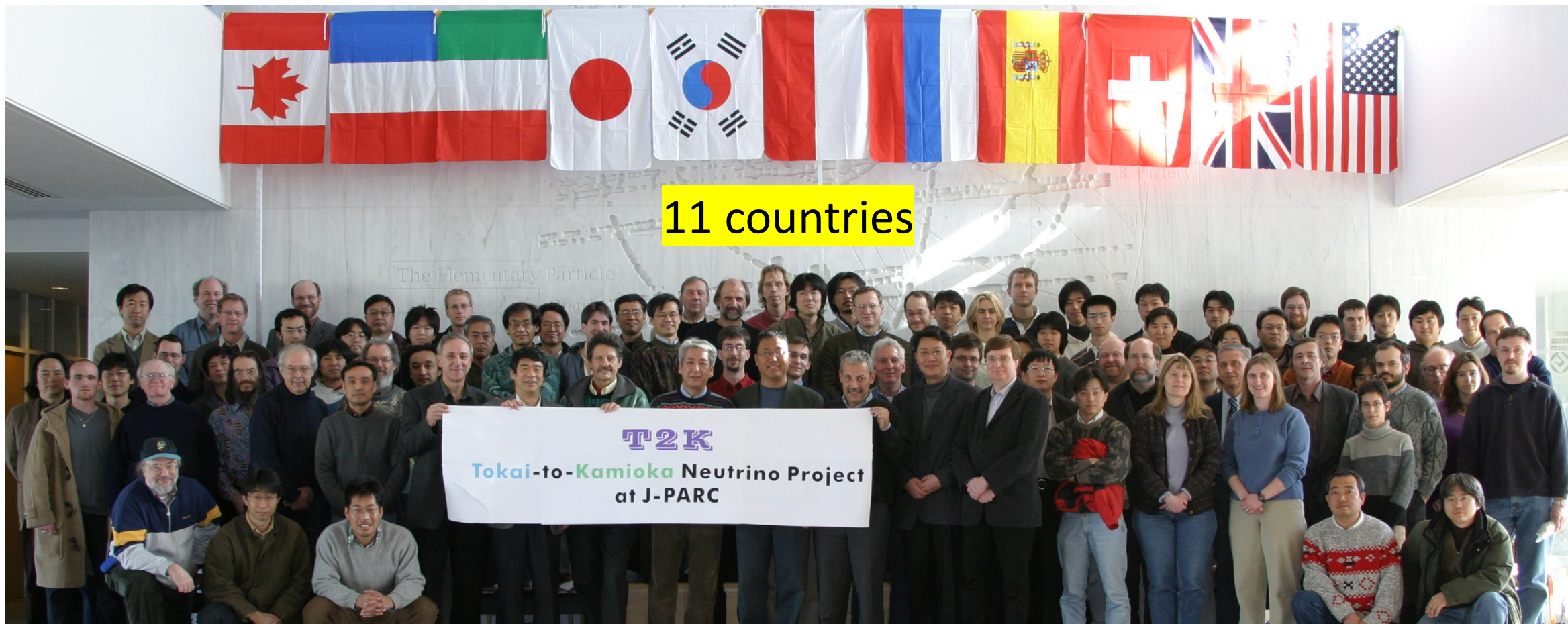


2019 г.





# Проект T2K: участники (2004 г.)



# Эксперимент T2K: участники (2021 г.)



~470 members, 74 Institutes, 13 countries + CERN + JINR



Париж, 2019 г.



# Дополнительные слайды



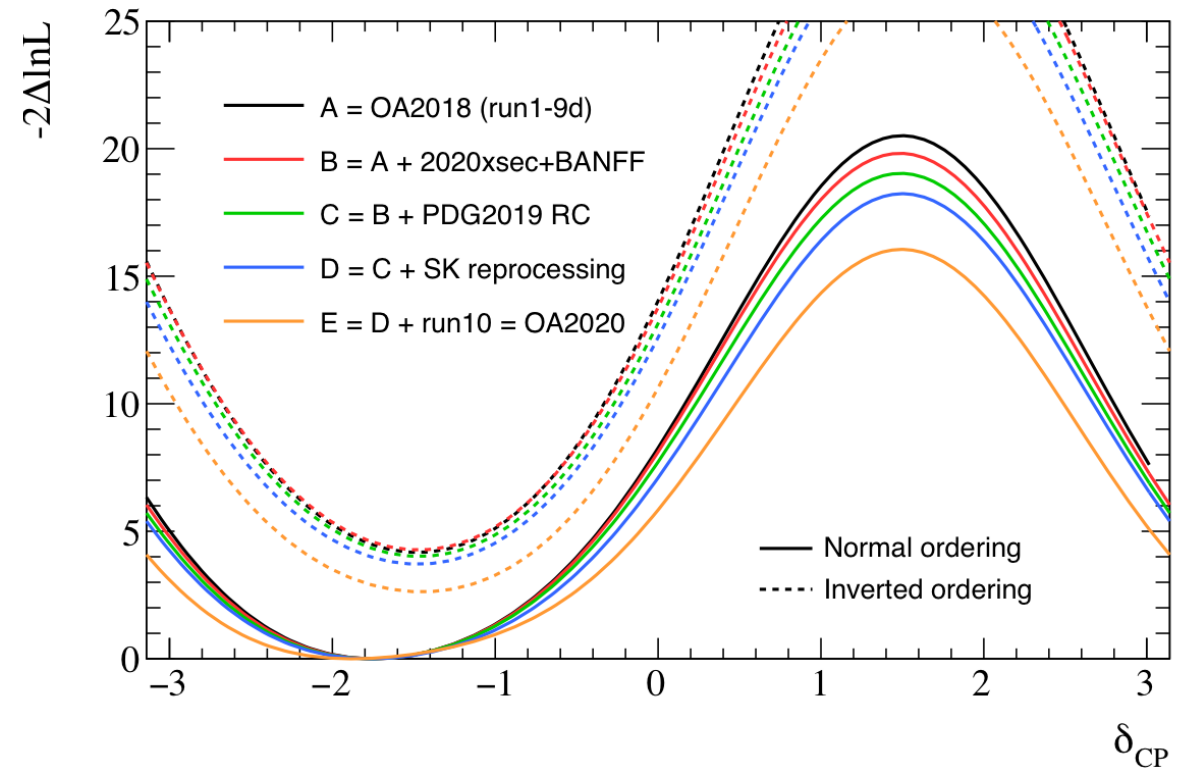
# Проверка ограничения $\delta_{CP}$



Can sequentially add improvements to the OA2018 analysis (Nature publication), and examine the measurement sensitivity:

- A: Nature result
- B: Improved cross section and flux models
- C: Using the updated reactor constraint on  $\theta_{13}$  (from 2019 Particle Data Group)
- D: New Super-K calibration, causing some events to drop in and out from samples
- E: Addition of the new Run 10 T2K data

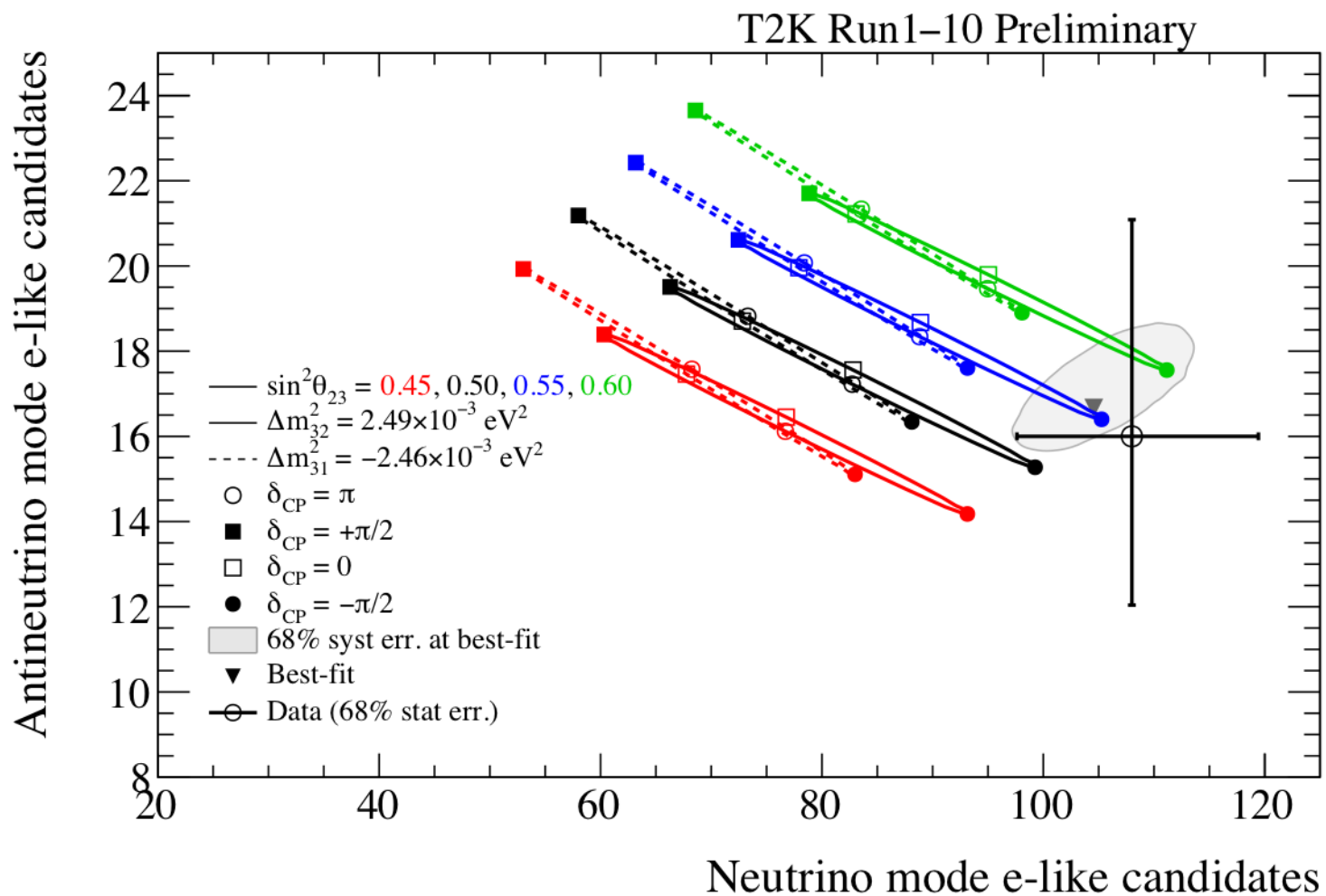
**Greatest change in our measurement (slightly weaker constraint) is driven by the addition of new data**



Configuration	T2K only				T2K + reactor			
	$\delta_{CP}^{\text{best-fit}}$	$\Delta\chi_{NH}^2(0)$	$\Delta\chi_{NH}^2(\pi)$	width	$\delta_{CP}^{\text{best-fit}}$	$\Delta\chi_{NH}^2(0)$	$\Delta\chi_{NH}^2(\pi)$	width
A = OA2018 (run1-9d)	-2.01	4.80	2.60	3.39	-1.76	8.27	6.33	2.39
B = A + 2020xsec+BANFF	-2.01	4.55	2.46	3.52	-1.76	8.11	6.04	2.51
C = B + PDG2019 RC	-2.01	4.52	2.45	3.52	-1.76	7.72	5.71	2.51
D = C + SK reprocessing	-2.01	3.67	1.87	3.77	-1.76	7.10	5.40	2.51
E = D + run10 = OA2020	-2.26	3.23	1.36	4.15	-1.88	5.83	4.08	2.76



# $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$ vs $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$







# Число событий и систематические ошибки



Mode	Expected events (MC)				Data *)	Systematic uncertainties **) (%)
	$\delta_{CP} = -\pi/2$	$\delta_{CP} = 0$	$\delta_{CP} = \pi/2$	$\delta_{CP} = \pi$		
$\nu_{\mu}$	<b>356.48</b>	355.76	356.44	357.27	<b>318</b>	3.0
$\bar{\nu}_{\mu}$	<b>138.34</b>	137.98	138.34	138.73	<b>137</b>	4.0
$\nu_e$	<b>97.62</b>	82.44	67.56	82.74	<b>94</b>	4.7
$\nu_e 1\pi^+$	<b>9.20</b>	8.01	6.51	7.71	<b>14</b>	14.3
$\bar{\nu}_e$	<b>16.69</b>	18.96	20.90	18.63	<b>16</b>	5.9

\*)  $1.96 \times 10^{21}$  ( $\nu$ ) +  $1.64 \times 10^{21}$  ( $\bar{\nu}$ ) POT

\*\*) Систематические ошибки подавлены благодаря ограничениям ближнего детектора ND280, например, для  $\nu_{\mu}$  11.1%  $\rightarrow$  3.0%;  $\bar{\nu}_{\mu}$ : 11.3%  $\rightarrow$  4.0%;  $\nu_e$ : 13.0%  $\rightarrow$  4.7%;  $\bar{\nu}_e$ : 12.1%  $\rightarrow$  5.9%;  $\nu_e 1\pi^+$ : 18.7%  $\rightarrow$  14.3%



# Вероятность перехода $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx 4c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \sin^2 \Delta_{31} \left( 1 + \frac{2a}{\Delta m_{31}^2} (1 - 2s_{13}^2) \right)$$

**Leading term including matter effect**

$$+ 8c_{13}^2 s_{12} s_{13} s_{23} (c_{12} c_{23} \cos \delta - s_{12} s_{13} s_{23}) \cos \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21}$$

**CP conserving**

$$- 8c_{13}^2 c_{12} c_{23} s_{12} s_{13} s_{23} \sin \delta \sin \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21}$$

**CP violating**

$$+ 4s_{12}^2 c_{13}^2 (c_{12}^2 c_{23}^2 + s_{12}^2 s_{23}^2 s_{13}^2 - 2c_{12} c_{23} s_{12} s_{23} s_{13} \cos \delta) \sin^2 \Delta_{21}$$

**Solar**

$$- 8c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 (1 - 2s_{13}^2) \frac{aL}{4E} \cos \Delta_{32} \sin \Delta_{31}$$

**Matter effect (small)**

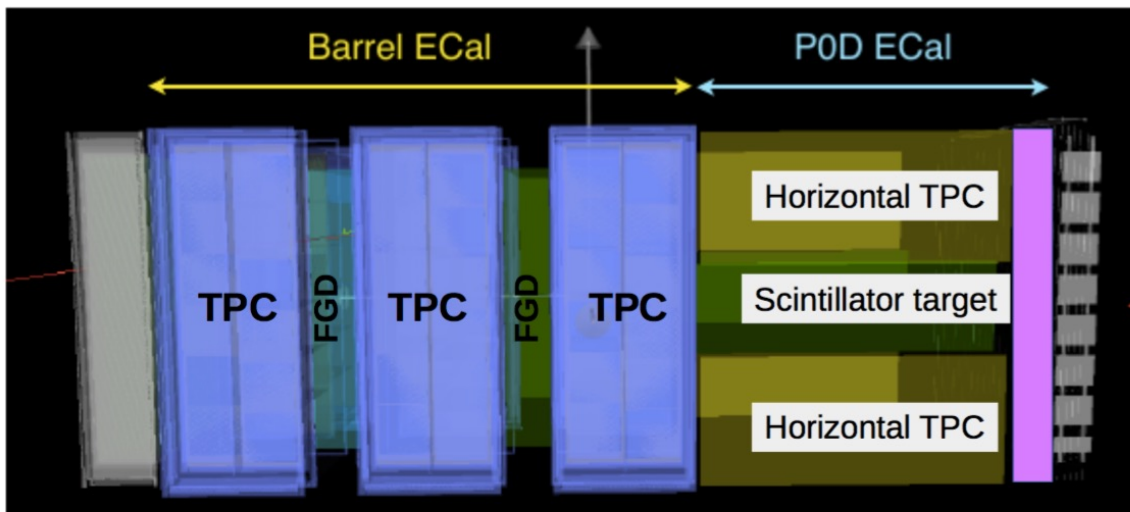
$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}, s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

$$\Delta_{ij} = \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{4E_\nu}$$

$$a \equiv 2\sqrt{2}G_F n_e E = 7.56 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \frac{\rho}{\text{gcm}^{-3}} \frac{E}{\text{GeV}}$$

replace  $\delta$  by  $-\delta$  and  $a$  by  $-a$  for  $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$

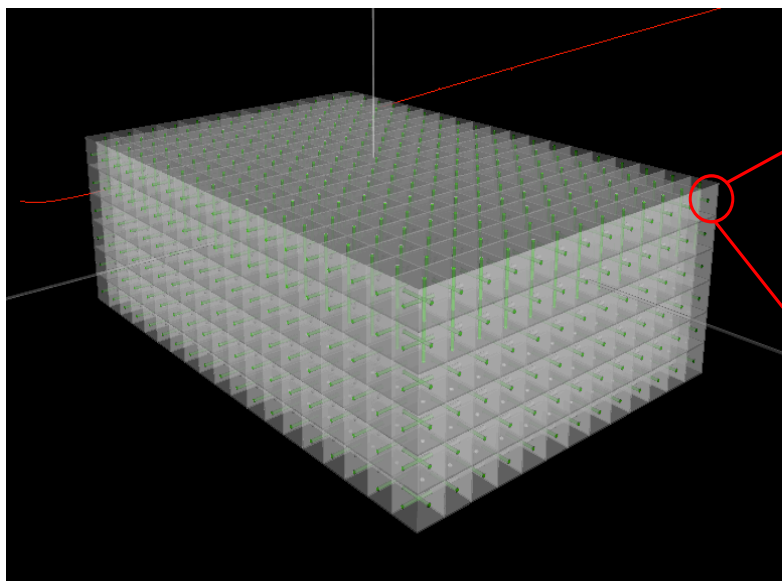
# Модернизация ближнего детектора



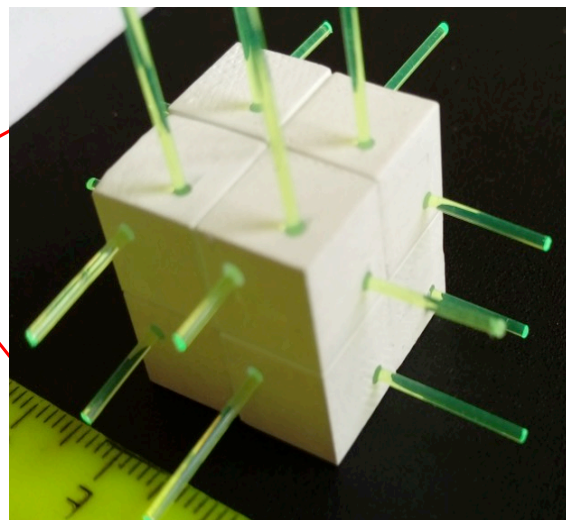
2022 г. (план):

- $\pi^0$ -детектор (POD) будет заменён - активной 3D нейтринной мишенью из сцинтилляционных кубиков (**Super-FGD**);
- и двумя горизонтальными TPC (**HTPC**)

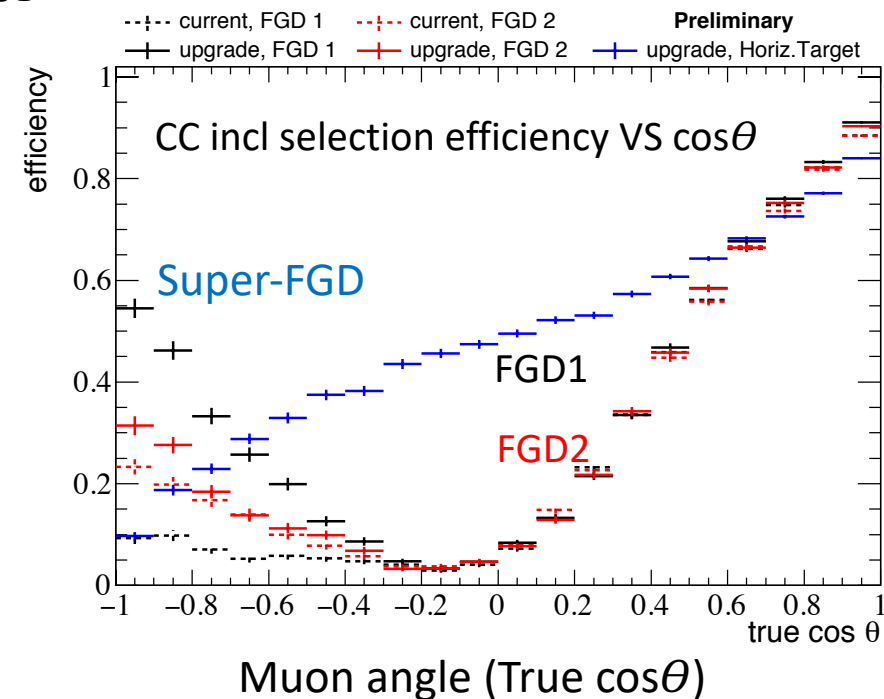
- Цели:
- а) уменьшение систематики до 3-4%;
  - б) 4 $\pi$ -акцептанс для мюонов;
  - в) снижение порога регистрации протонов (>300 МэВ/с);
  - д) детектирование нейтронов



Scintillator target (Super-FGD):  
~2 million cubes



1 cm<sup>3</sup> cubes  
3 fibers per cube





# Эксперимент Гипер-Камиоканде (НК)



2027 г. (план): старт **НК/Т2НК**

- Усиленная мощность пучка J-PARC MR: **~1.3 МВт**
  - $2.7 \times 10^{22}$  POT (за 10 лет)
- Модернизированный ближний детектор ND280
- Новый промежуточный детектор (IWCD)\* @~1 км
- Новый дальний детектор
  - с такой же пролетной базой, 295 км,
  - под тем же углом (off-axis),  $2.5^\circ$
  - 71 м (высота), 68 м (диаметр)
  - общий объём 260 тыс. тонн
  - fiducial volume **187 тыс. тонн** (~8 x SK)
  - 40% photocoverage
- Улучшенная чувствительность (3-5 $\sigma$  of CPV discovery)
- Богатая (астро)физическая программа

\* IWCD = Intermediate Water Cherenkov Detector

