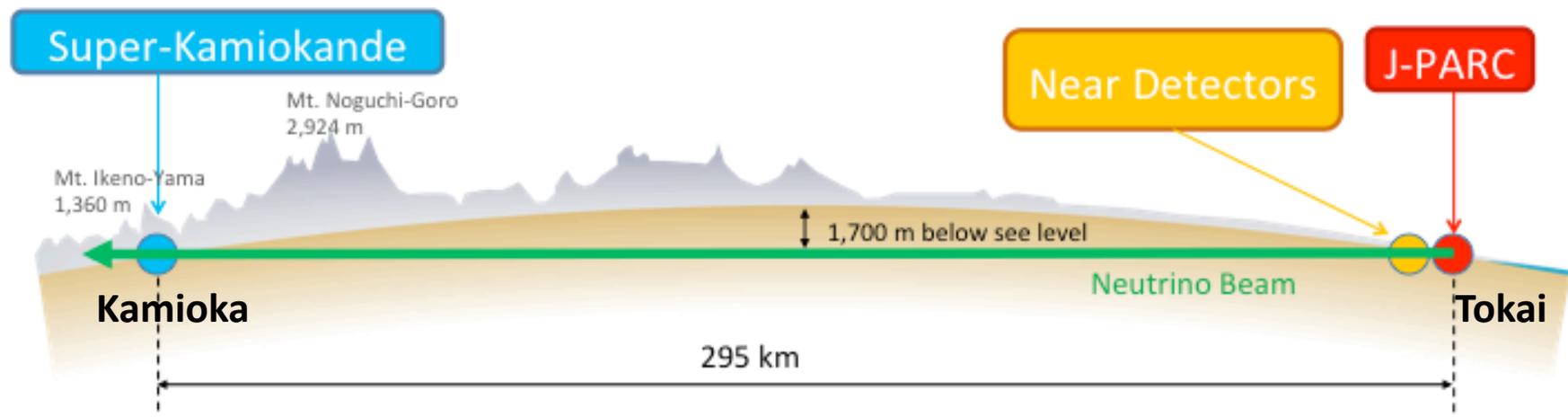


Эксперимент T2K:

последние результаты и перспективы



Марат Хабибуллин (ИЯИ РАН)

Сессия-конференция Секции ядерной физики
Отделения физических наук Российской академии наук
Новосибирск, 10-12 марта 2020



Смешивание нейтрино (напоминание)

- Собственные состояния *слабых взаимодействий* нейтрино $|\nu_\alpha\rangle$ могут быть представлены в виде линейной комбинации собственных *массовых* состояний $|\nu_i\rangle$:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum U_{\alpha i} |\nu_i\rangle, \quad (\alpha = e, \mu, \tau; i = 1, 2, 3)$$

- Связь – через матрицу Понтекорво-Маки-Накагава-Саката

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

PMNS (\equiv Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata) matrix

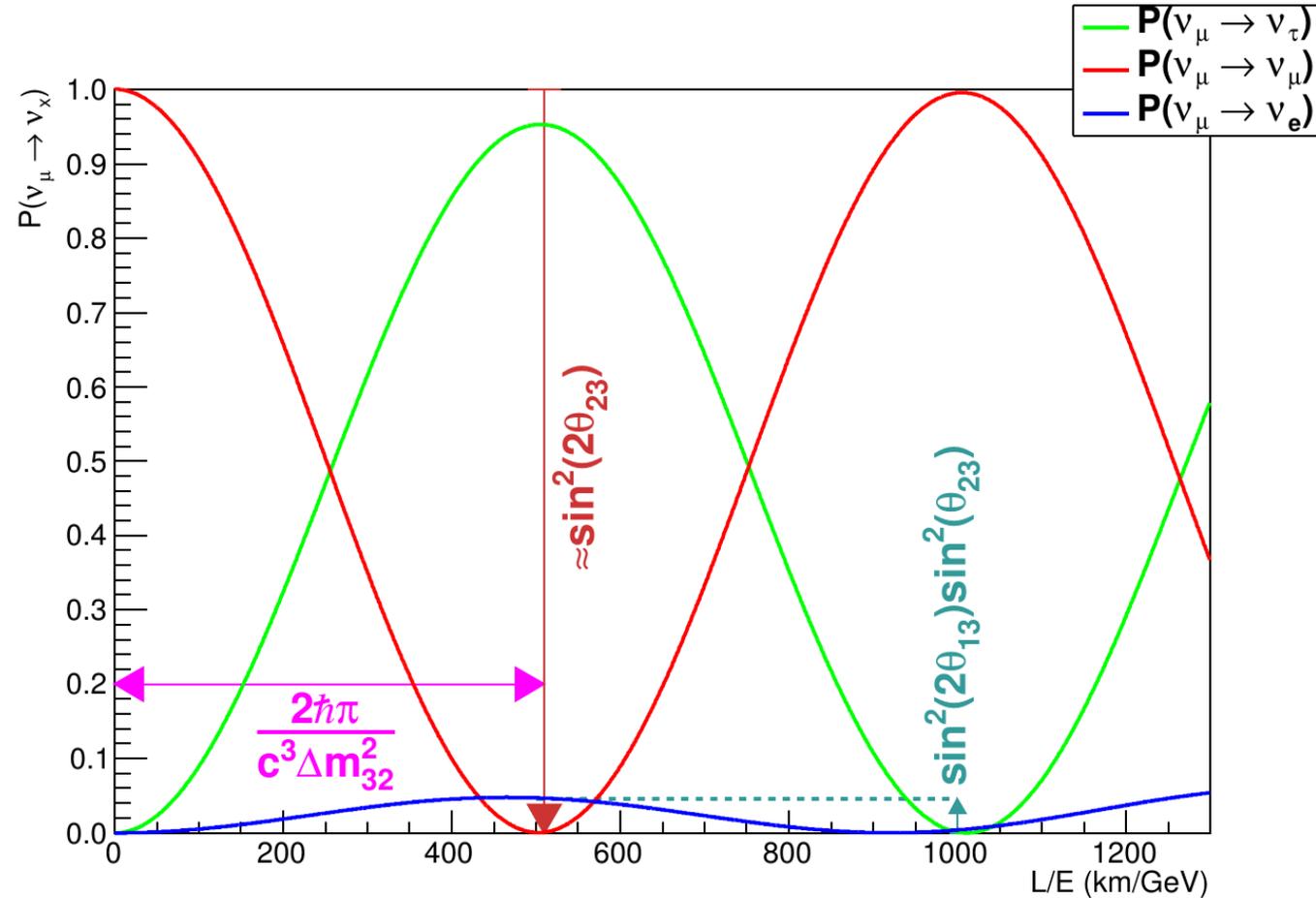


Осцилляции нейтрино (напоминание)

Вероятность перехода
 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ зависит от

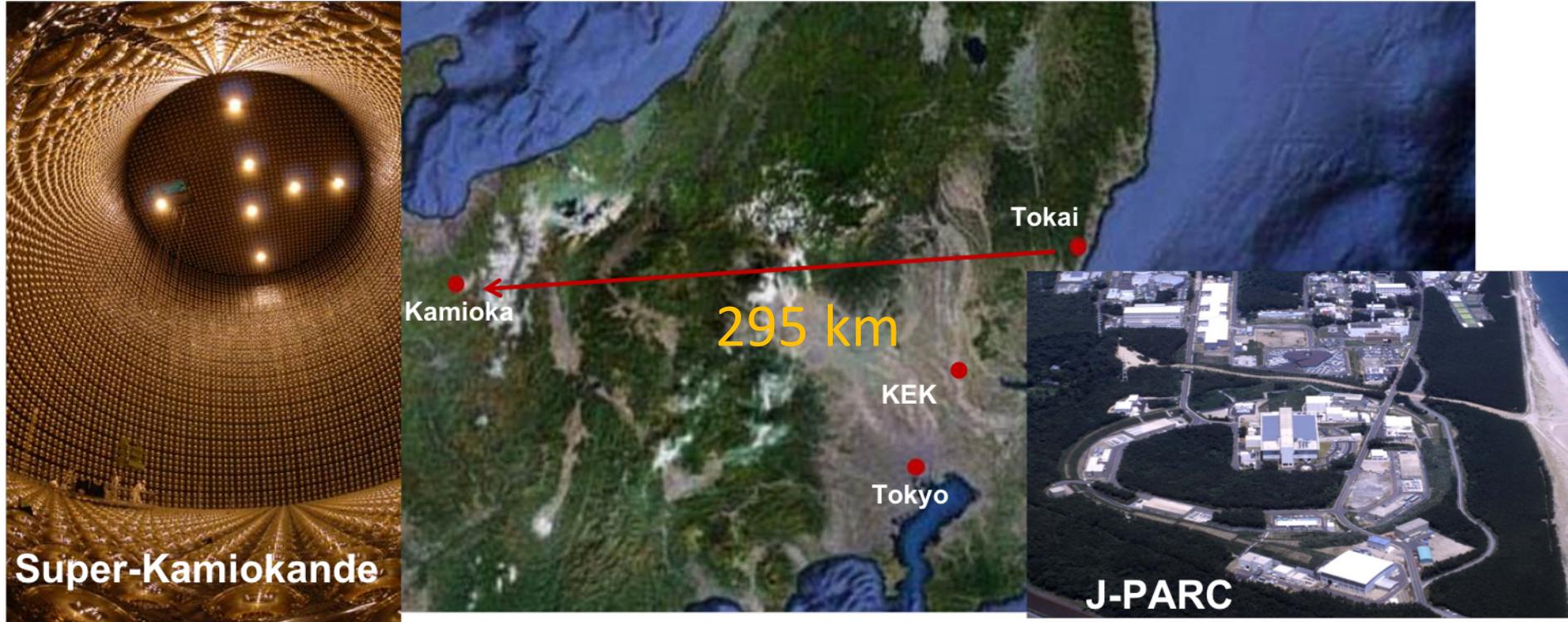
- трёх углов смешивания θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}
- одной CP нарушающей фазы δ_{CP}
- двух разностей Δm^2_{32} , Δm^2_{21} *)
- иерархии масс ($m_3 > m_2$ или $m_3 < m_2$?)
- энергии нейтрино E
- пройденного расстояния L

*) $\Delta m^2_{ij} \equiv m^2_i - m^2_j, i \neq j$





Эксперимент T2K

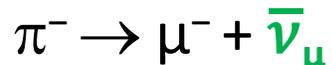
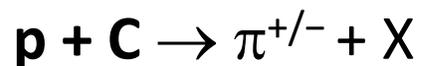


T2K = Tokai-to-Kamioka =
ускорительный нейтринный эксперимент с длинной базой

Источник нейтрино

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

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

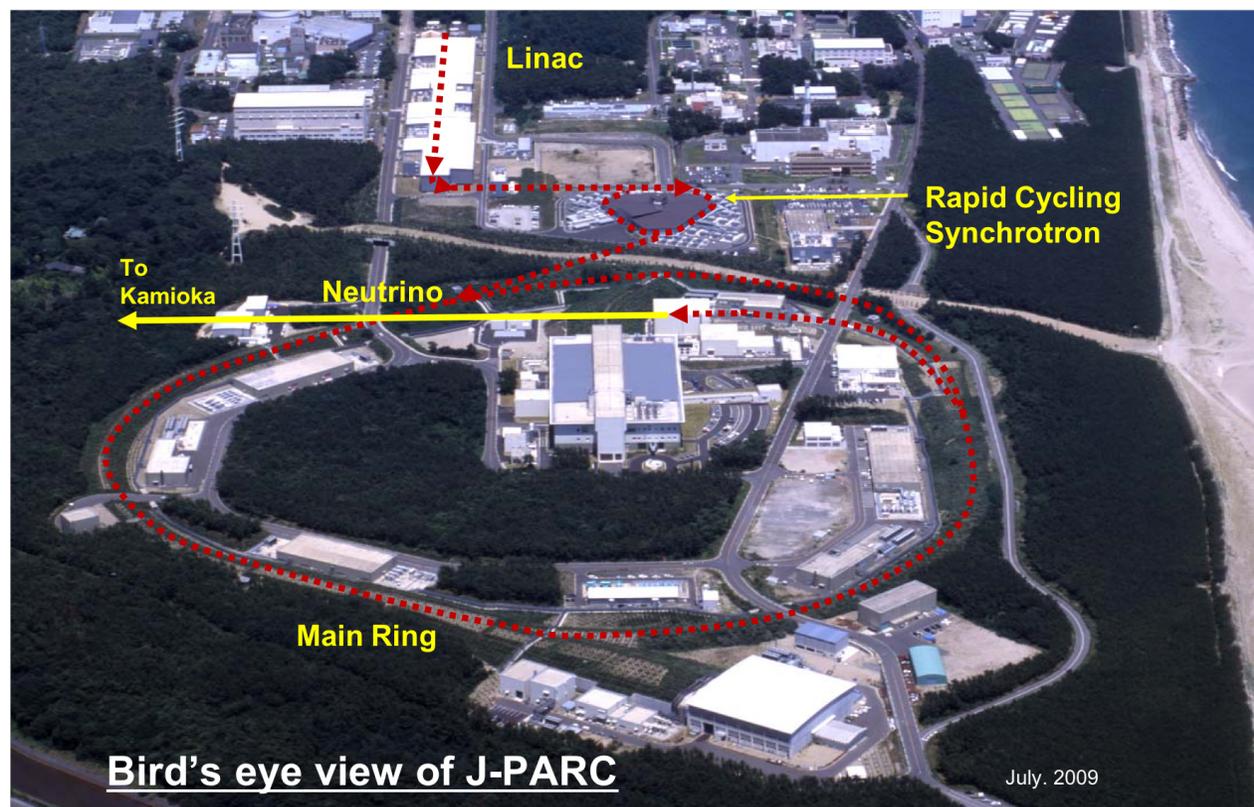


E_{ν} (пик, 2.5°): $\sim 0.6 \text{ ГэВ}$

Состав пучка (в пике):

ν -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

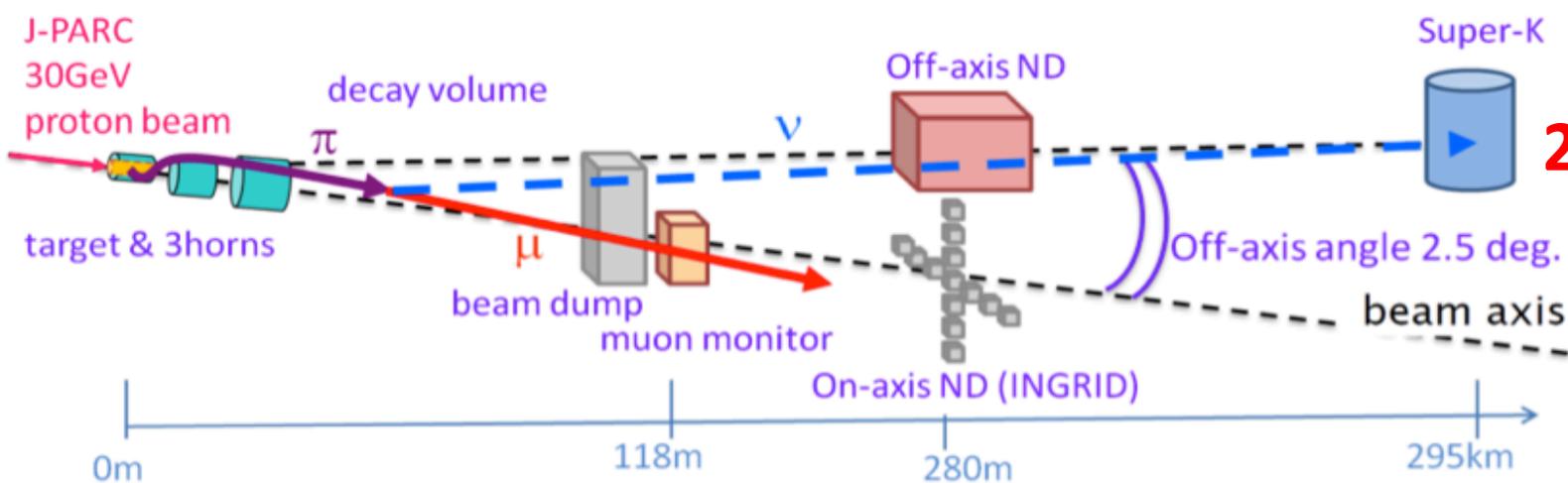
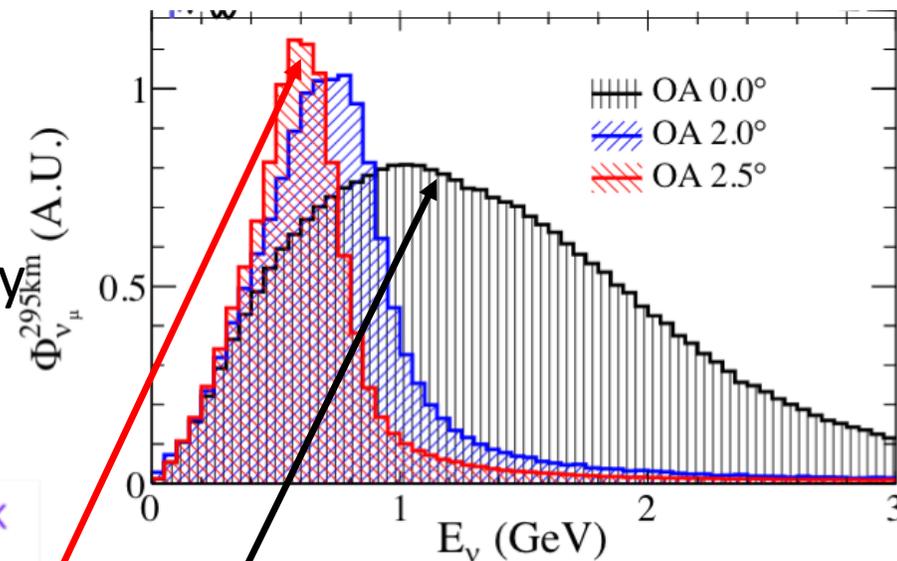
Интенсивность: $\sim 2.6 \text{ E}14 \text{ ppp}$

[ppp = protons per pulse]



Внеосевой (off-axis) пучок нейтрино

- В силу кинематики распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ энергетический спектр нейтрино, вылетающих под небольшим углом к оси исходного пионного (протонного) пучка, имеет узкий пик: E_ν (@ 2.5°): ~ 0.6 ГэВ.
- В T2K пик для угла 2.5° соответствует осцилляционному максимуму при $L = 295$ км.
- При этом подавляются нейтрино с высокой энергией

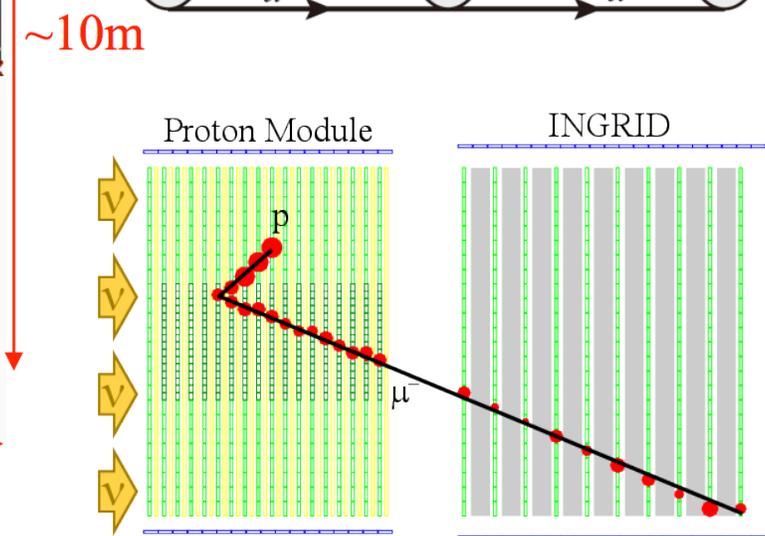
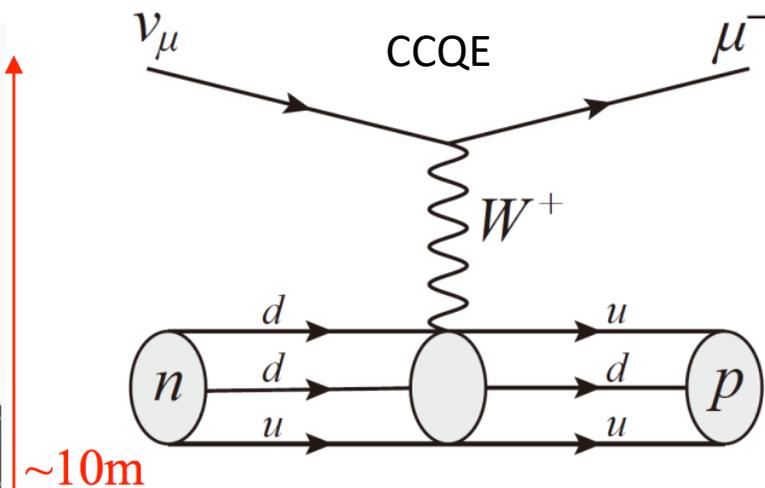
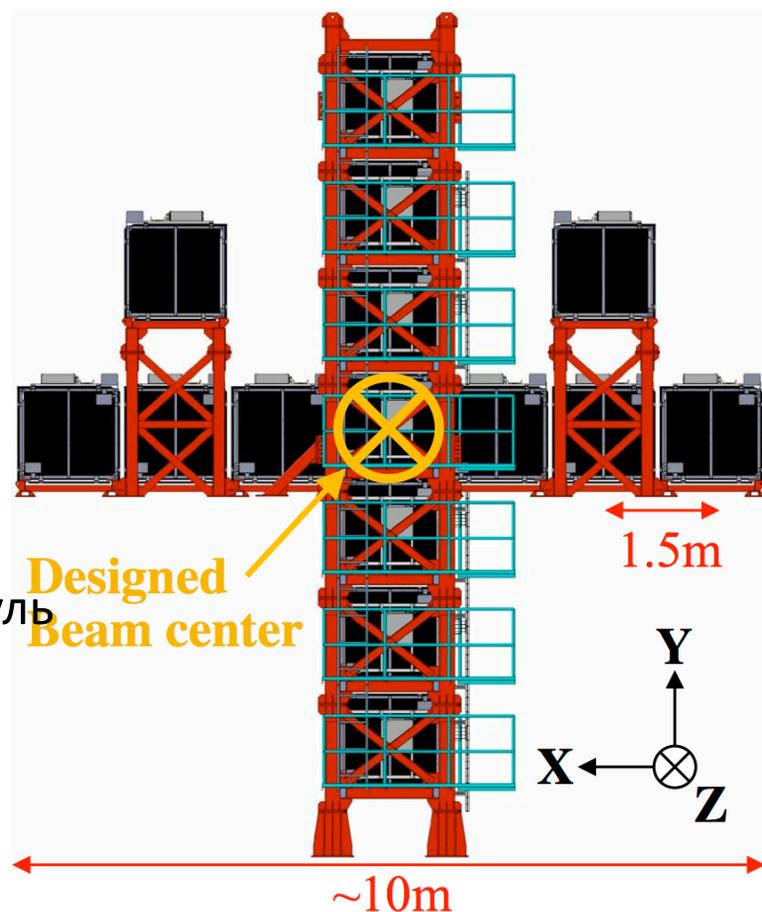


Ближний детектор INGRID (on-axis)

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 из пластикового сцинтиллятора

Служит для мониторинга нейтринного пучка (направление и стабильность)



Ближний детектор ND280 (off-axis)

Ближний детектор ND280

- Трекер = 3 TPC + 2 FGD в

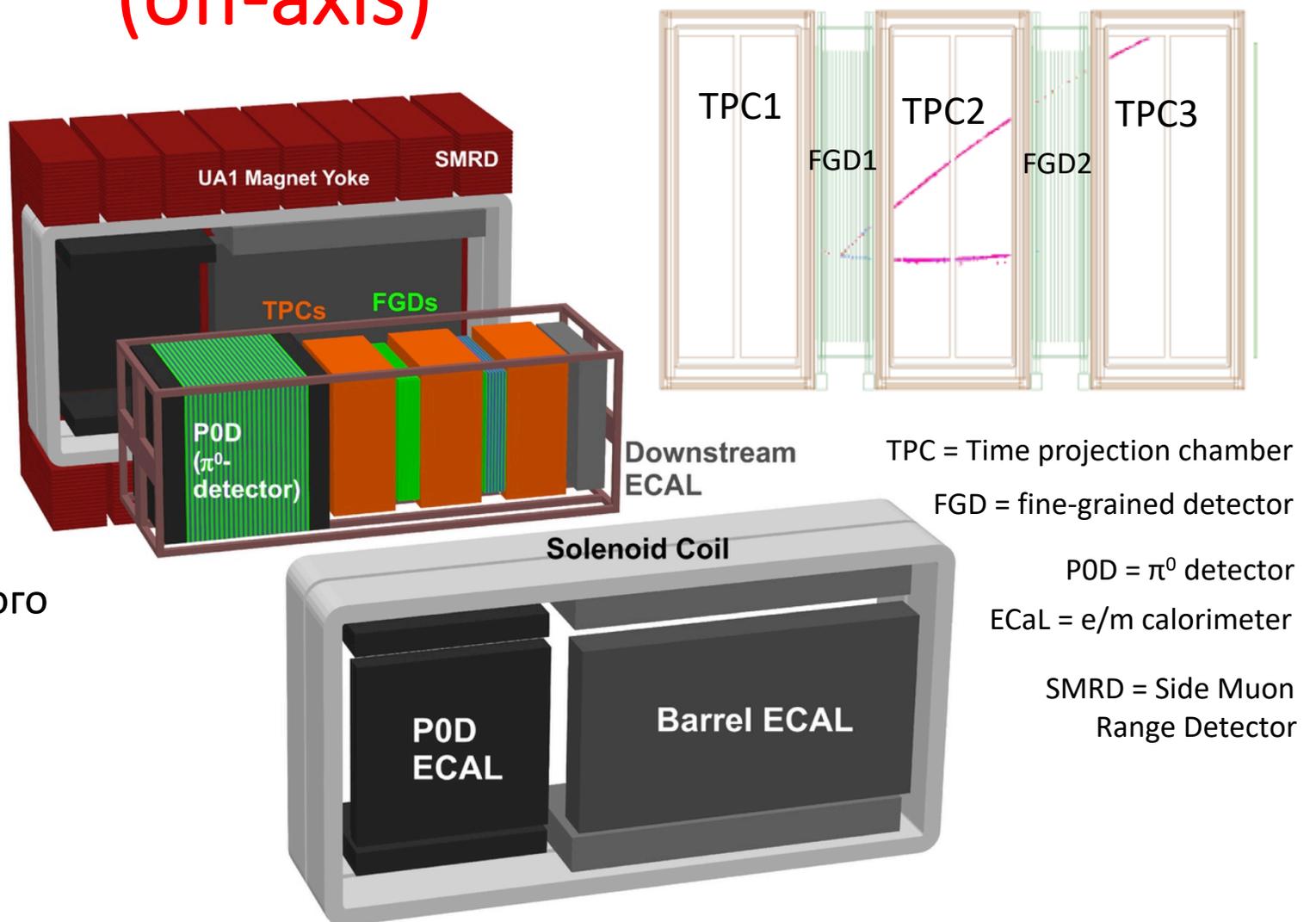
магнитном поле **0.2 Т**

(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



Дальний детектор SK

Super-Kamiokande:

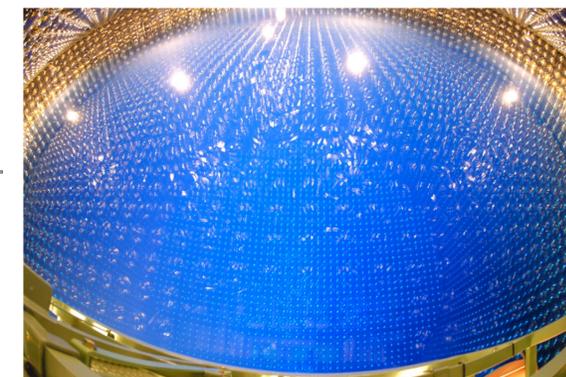
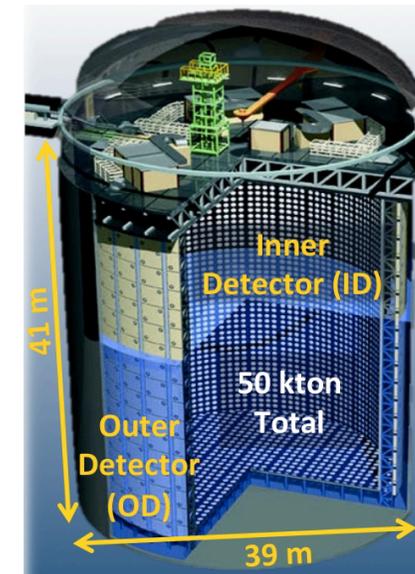
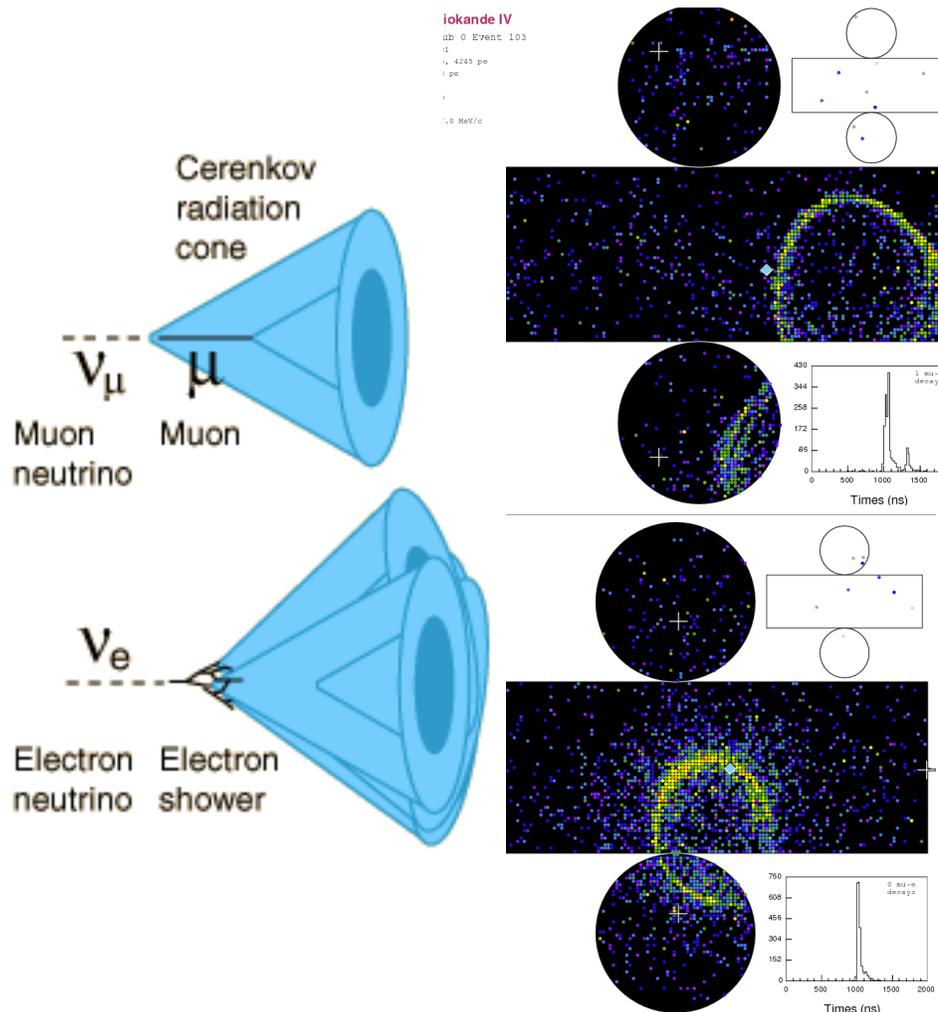
- ✓ 50 тыс. тонн чистойшей воды
- ✓ Водный черенковский детектор
- ✓ высокоэффективное (>99%) разделение μ - и e - сигналов
- ✓ GPS синхронизация с пучком J-PARC

Внутренний детектор (ID):

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

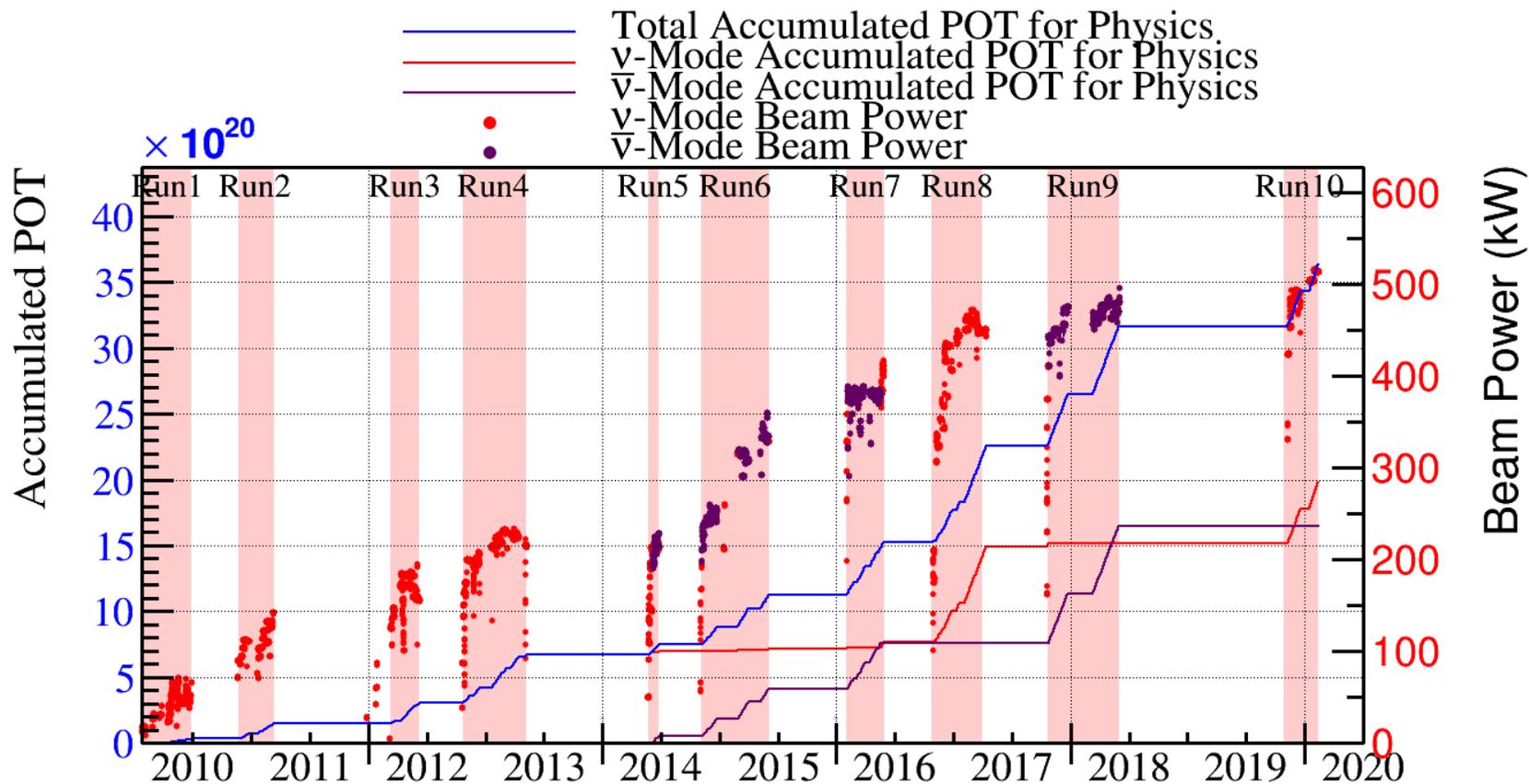
Внешний детектор (OD):

- ✓ ~2000 PMTs (\varnothing 20 см)





Экспериментальные данные T2K



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

23 Jan 2010 – 12 Feb 2020: **3.64×10^{21} POT**

ν-режим: 1.99×10^{21} POT; ν̄-режим: 1.65×10^{21} POT

Analyzed data (Jan. 2010 - May 2018): **1.49×10^{21} (ν) + 1.64×10^{21} (ν̄) POT**



Анализ данных T2K

Многоступенчатый анализ (очень упрощённая схема):

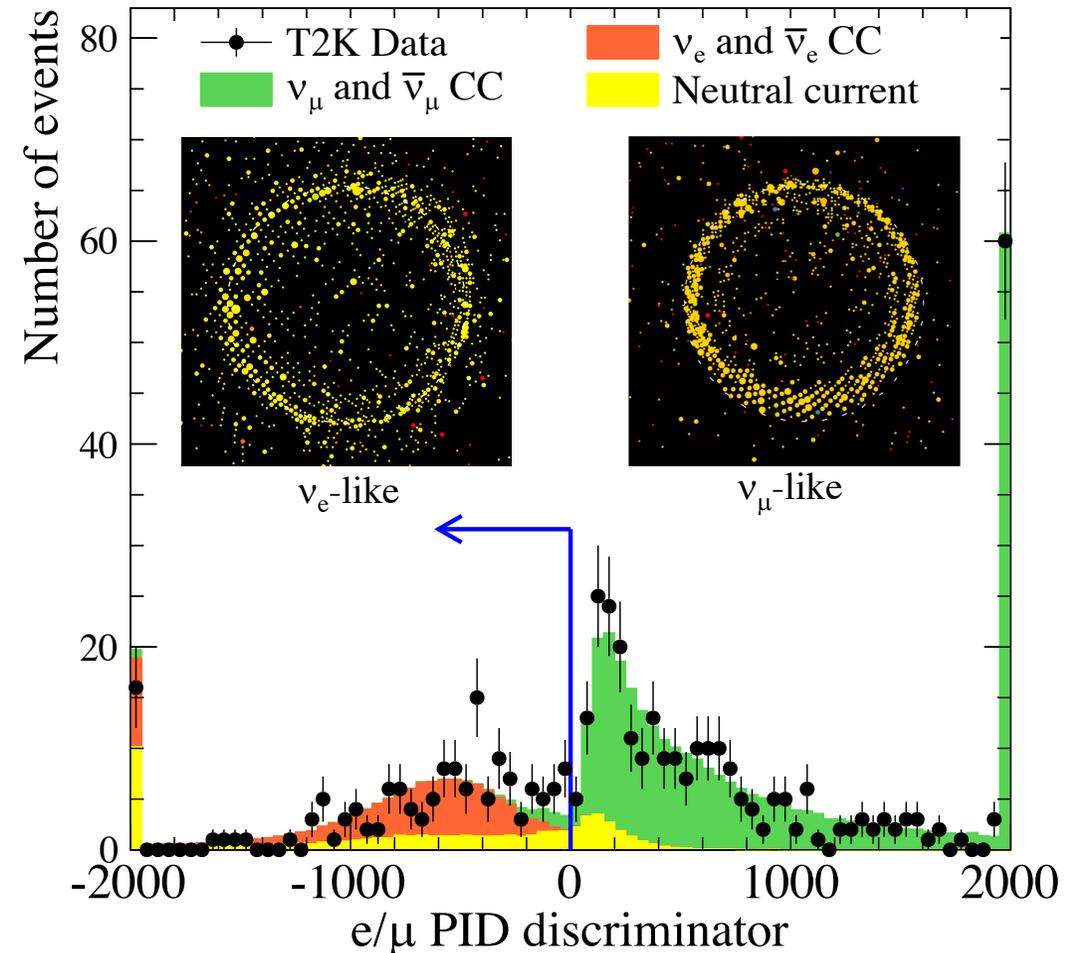
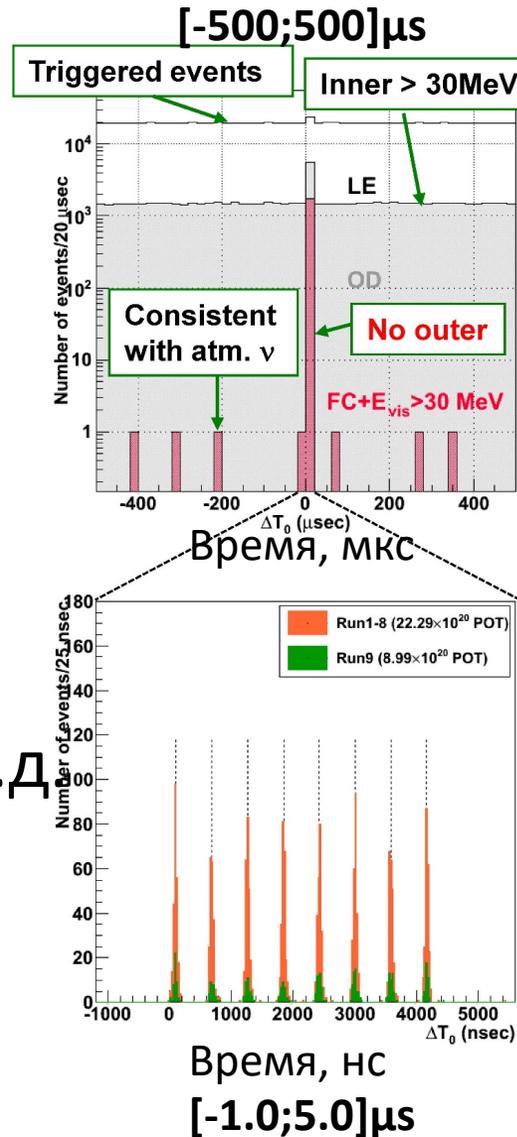
- Вычисляется **нейтринный поток** для ближнего и дальнего детекторов (используются данные J-PARC, NA61/SHINE и моделирование – FLUKA, GEANT)
- Отбираются события в дальнем детекторе **SK** и формируются **5 наборов данных**: 3 в ν -режиме (μ -CCQE, e -CCQE, e -CC1 π^+) и 2 в $\bar{\nu}$ -режиме (μ -CCQE, e -CCQE)*
- Для получения осцилляционных параметров все 5 наборов данных анализируются одновременно – методом отношения функций правдоподобия (**binned likelihood-ratio method**): $-2\ell n \lambda(\text{осцил.параметры, другие параметры})$
- Данные ближнего детектора используются для **ограничения параметров** нейтринного потока, сечений взаимодействия и систематических погрешностей

* ν -CCQE = Charged-Current Quasi Elastic: $\nu_l n \rightarrow l^- p$

e -CC1 π^+ = Charged-Current One pion: $\nu_e N \rightarrow e^- N' \pi^+$

Цель отбора событий:
подавление фона от

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



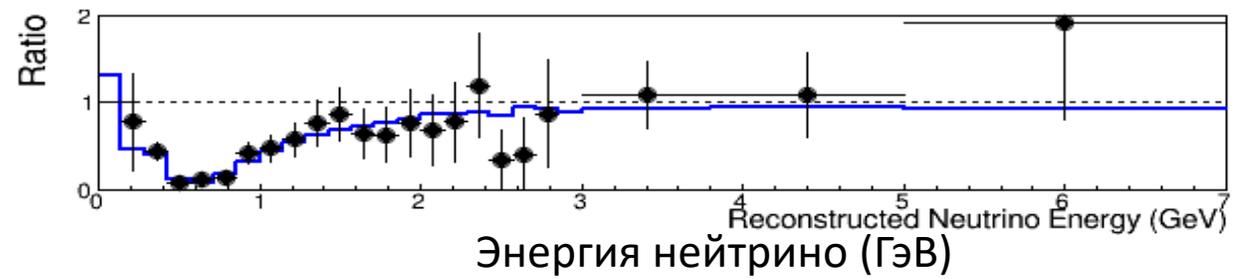
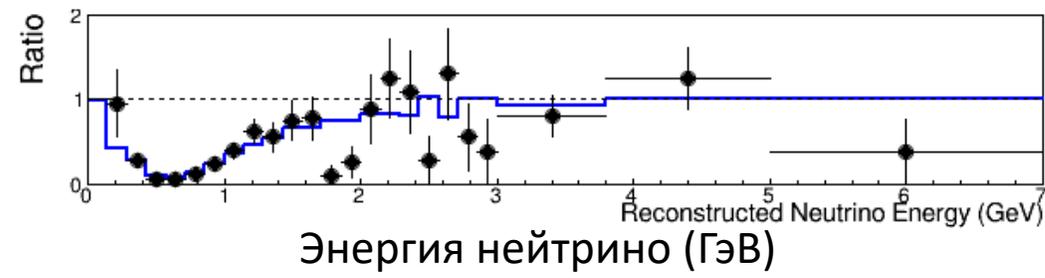
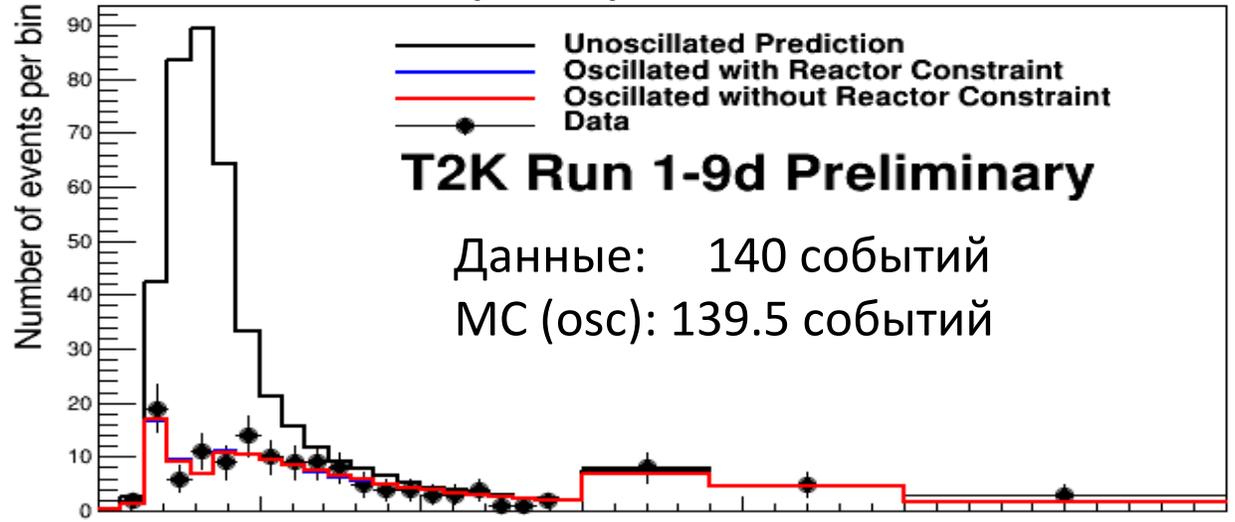
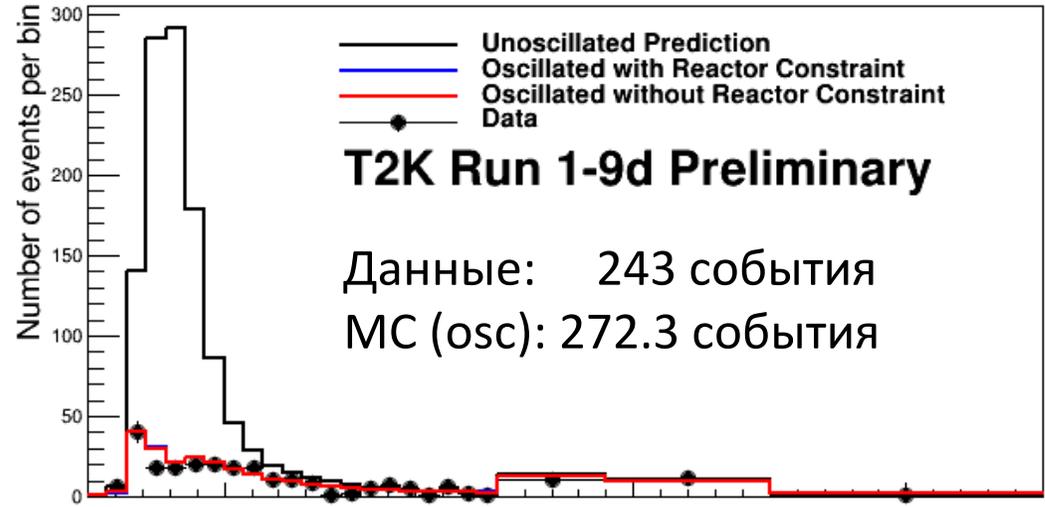


Дефицит мюонных (анти)нейтрино

$1.49 \times 10^{21} (\nu) + 1.64 \times 10^{21} (\bar{\nu})$ POT

$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$

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

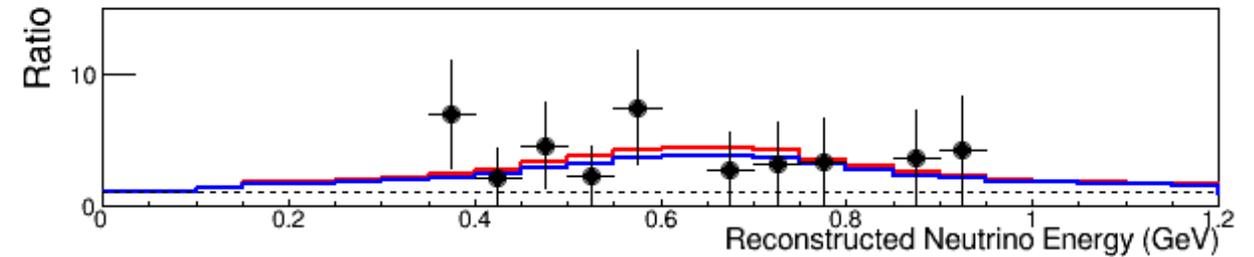
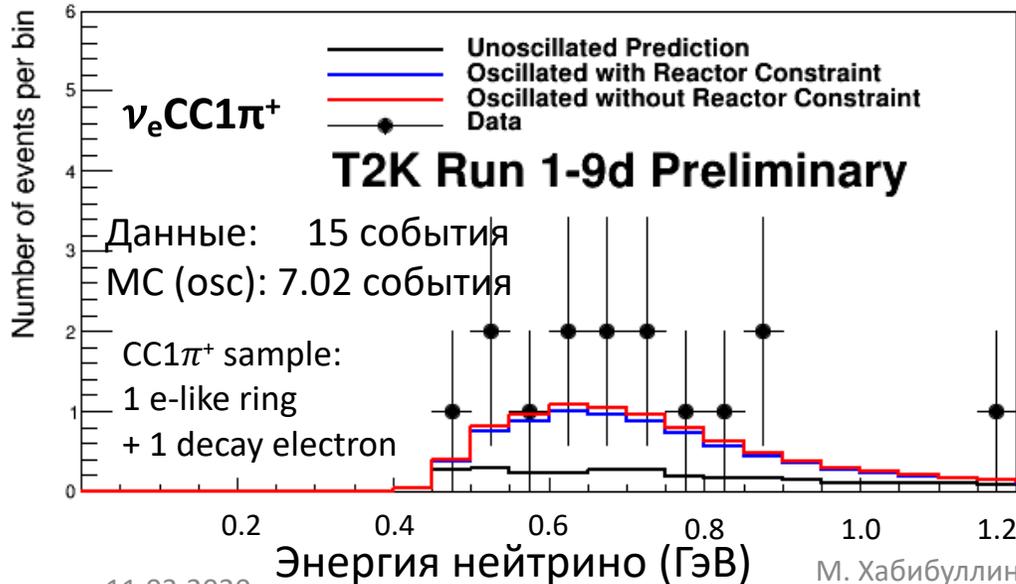
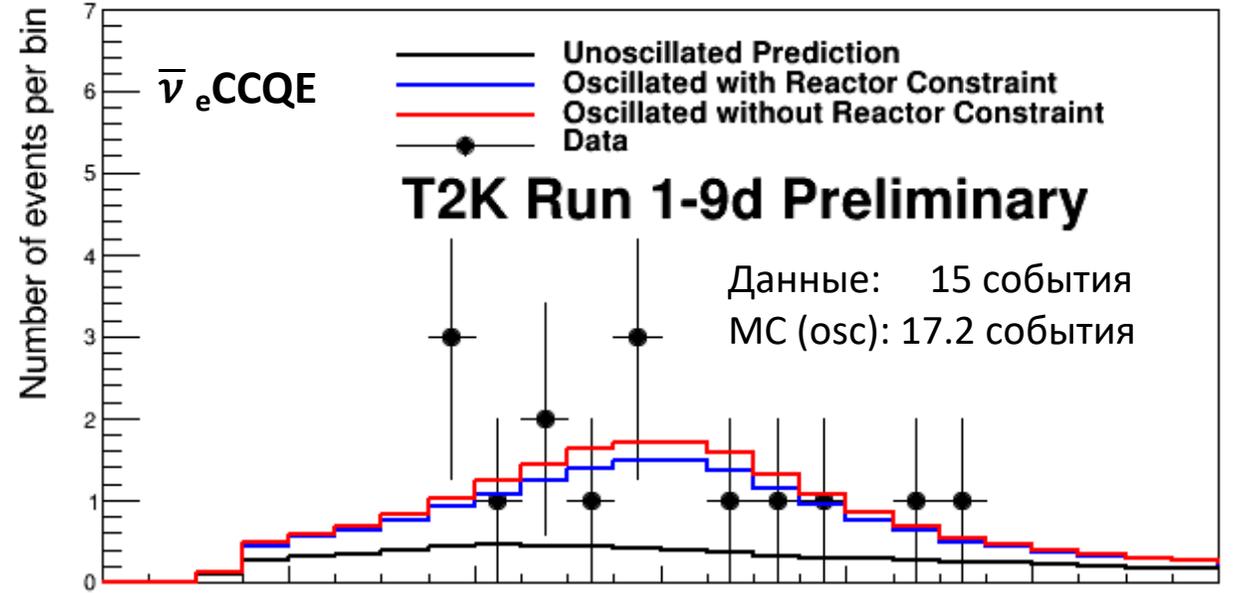
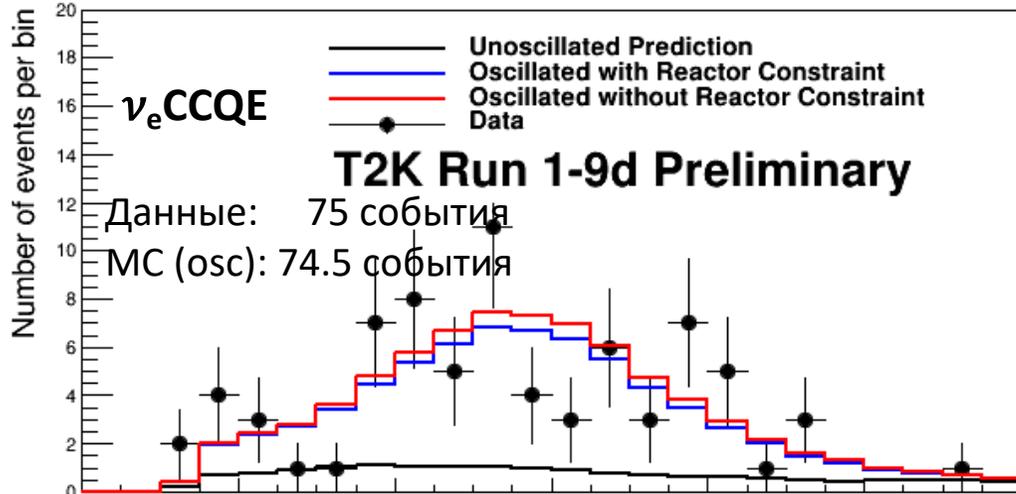




Избыток электронных (анти)нейтрино



$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ $1.49 \times 10^{21} (\nu) + 1.64 \times 10^{21} (\bar{\nu})$ POT $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$



CCQE = Charged-Current Quasi Elastic: $\nu_l n \rightarrow l^- p$

CC1 π^+ = Charged-Current 1 charged pion: $\nu_e N \rightarrow e^- N' \pi^+$



Число событий и систематические ошибки



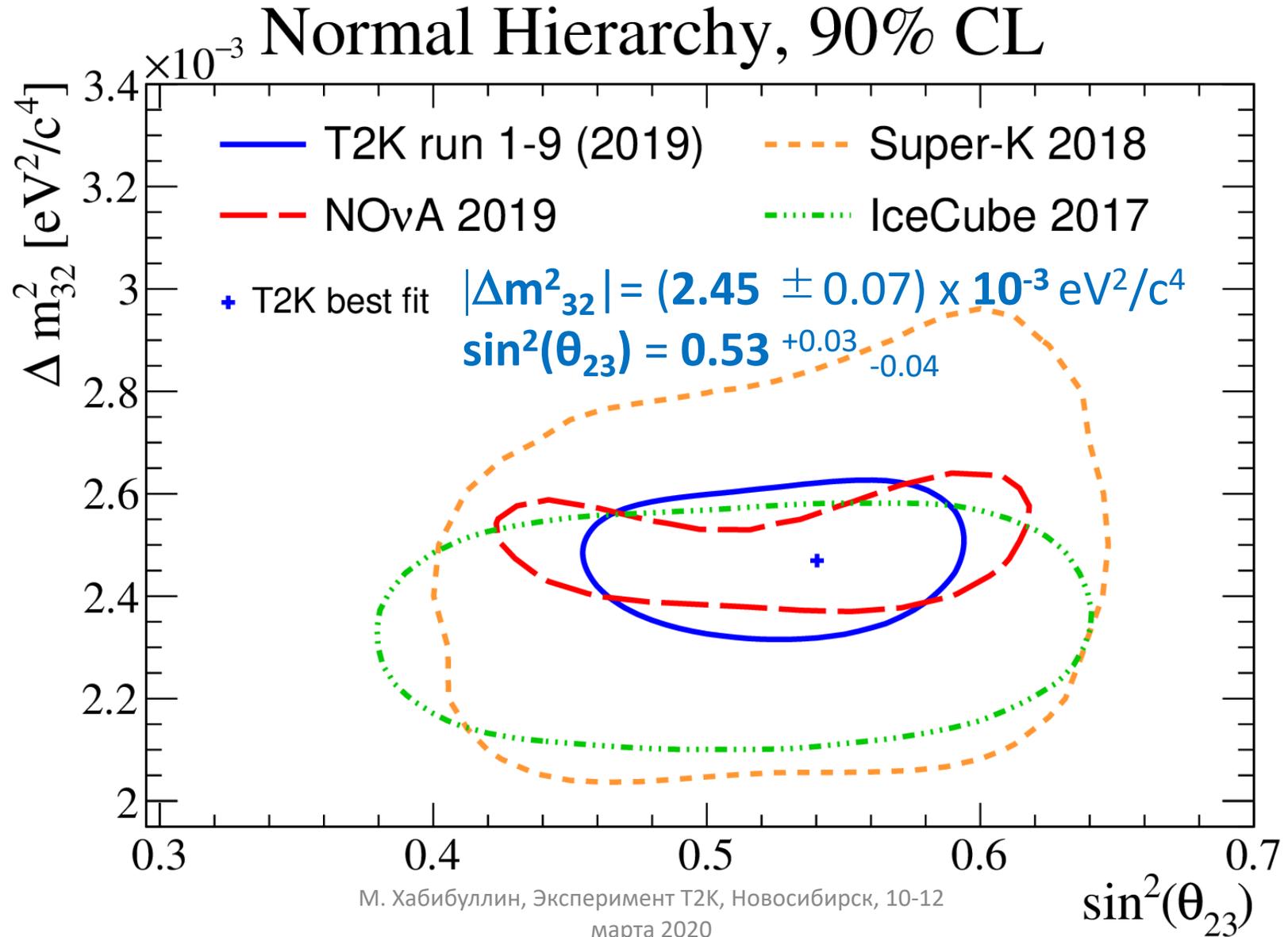
Mode	Expected events (MC)				Data *)	Systematic uncertainties **) (%)
	$\delta_{CP} = -\pi/2$	$\delta_{CP} = 0$	$\delta_{CP} = \pi/2$	$\delta_{CP} = \pi$		
ν_{μ}	272.34	271.97	272.30	272.74	243	5.12
$\bar{\nu}_{\mu}$	139.47	139.12	139.47	139.82	140	4.45
ν_e	74.46	62.26	50.59	62.78	75	8.81
$\nu_e 1\pi^+$	7.02	6.10	4.94	5.87	15	18.38
$\bar{\nu}_e$	17.15	19.57	21.75	19.33	15	7.13

*) 1.49×10^{21} (ν) + 1.64×10^{21} ($\bar{\nu}$) POT

***) Систематические ошибки подавлены благодаря ограничениям ближнего детектора ND280, например, для ν_{μ} 14.66% -> 5.12%; $\bar{\nu}_{\mu}$: 12.52% -> 4.45%; ν_e : 16.85% -> 8.81%; $\bar{\nu}_e$: 14.4% -> 7.13%



Осцилляционные параметры (Δm^2_{32} , θ_{23})





Поиск CP нарушения



Для данных $1.49 \times 10^{21} (\nu) + 1.64 \times 10^{21} (\bar{\nu})$ POT получена оценка δ_{CP} (1σ):

- для **нормальной** иерархии масс (NO)
 $\delta_{CP} = -1.89^{+0.70}_{-0.58}$ (~максимальное CPV)
- для обратной иерархии масс (IO)
 $\delta_{CP} = -1.38^{+0.48}_{-0.54}$

Также получены **99.73%-ные (3σ)** доверительные интервалы для δ_{CP} :

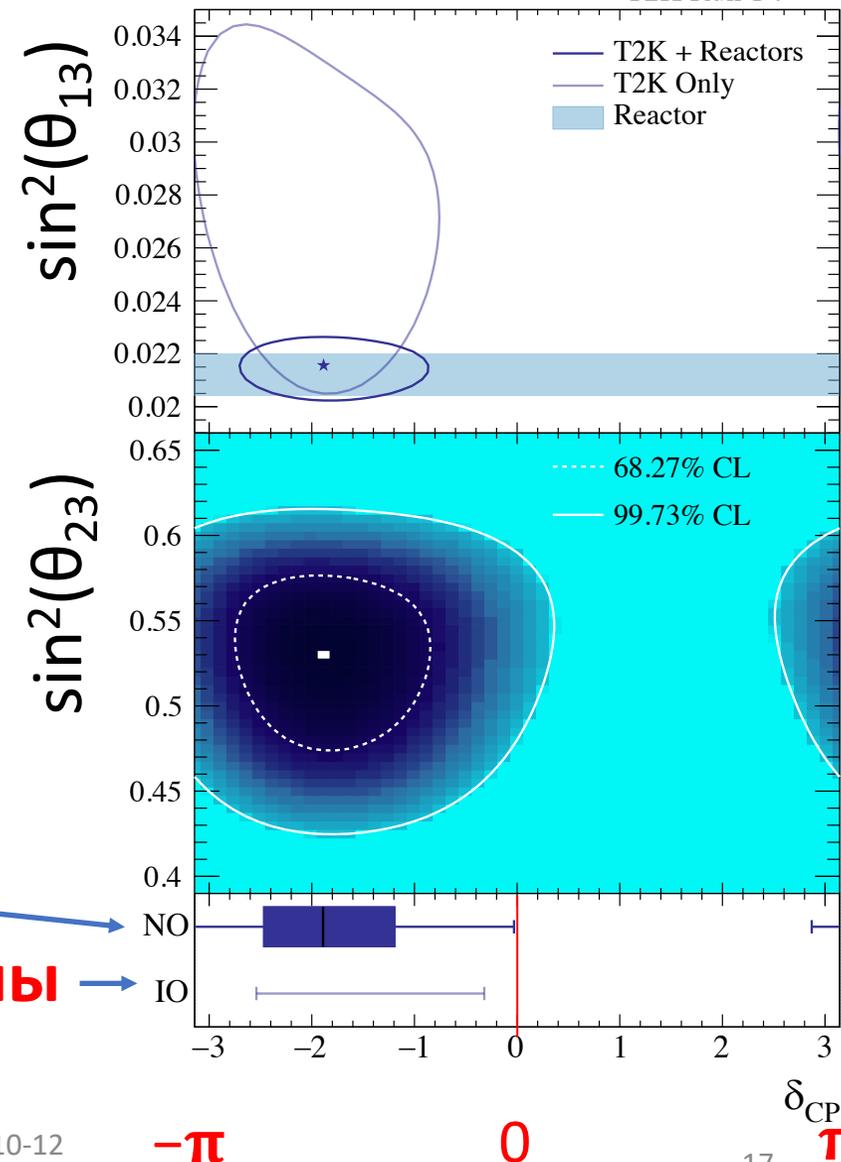
NO: $[-3.41; -0.03]$ \rightarrow $\{\delta_{CP} = 0\}$ **исключено**

IO: $[-2.54; -0.32]$ \rightarrow $\{\delta_{CP} = 0$ и $\delta_{CP} = \pm\pi\}$ **исключены**

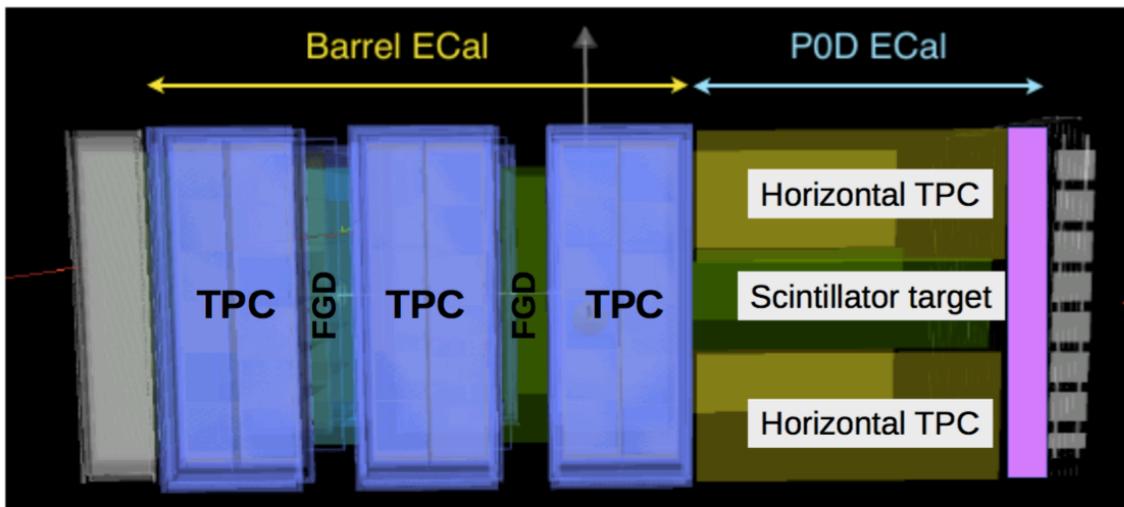
[NO = normal ordering ($m_3 > m_2$)
IO = inverted ordering ($m_3 < m_2$)]

arxiv:1910.03887

T2K Run 1-9



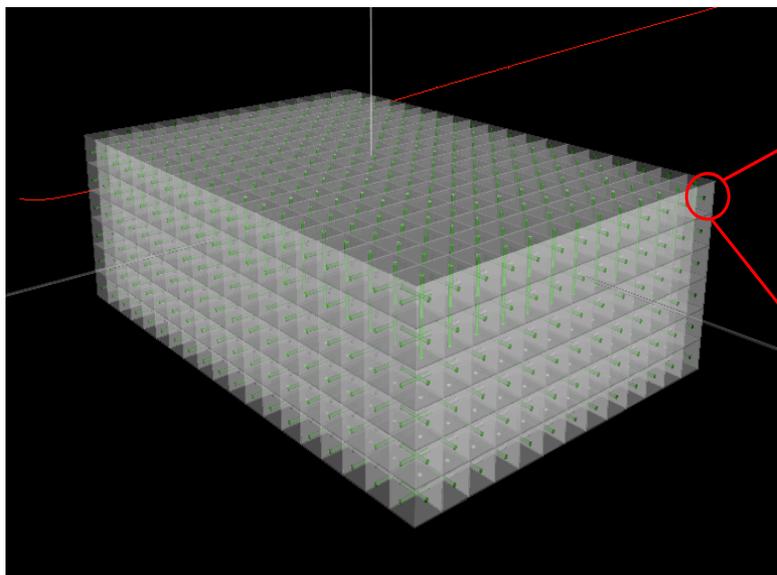
Модернизация ближнего детектора



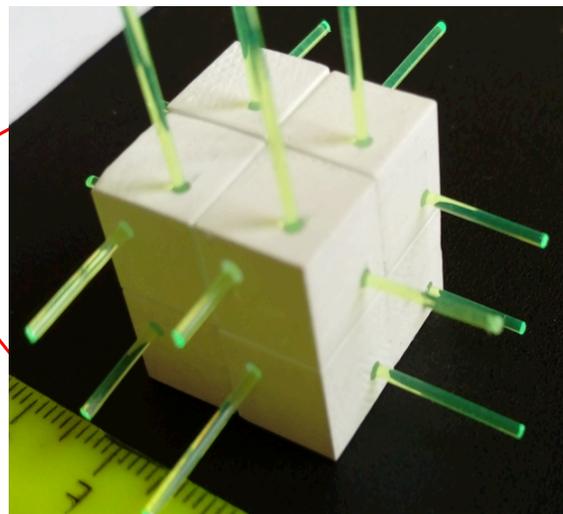
2021 (план):

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

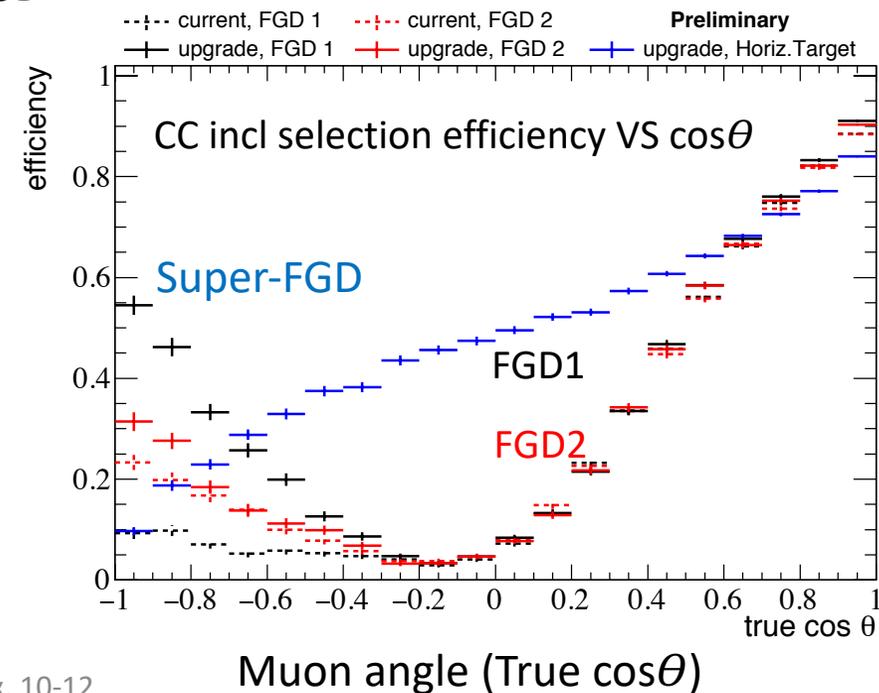
- Цели: а) уменьшение систематики до 3-4%;
 б) 4 π -акцептанс для мюонов; в) снижение порога регистрации протонов (>300 МэВ/с); д) детектирование нейтронов



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



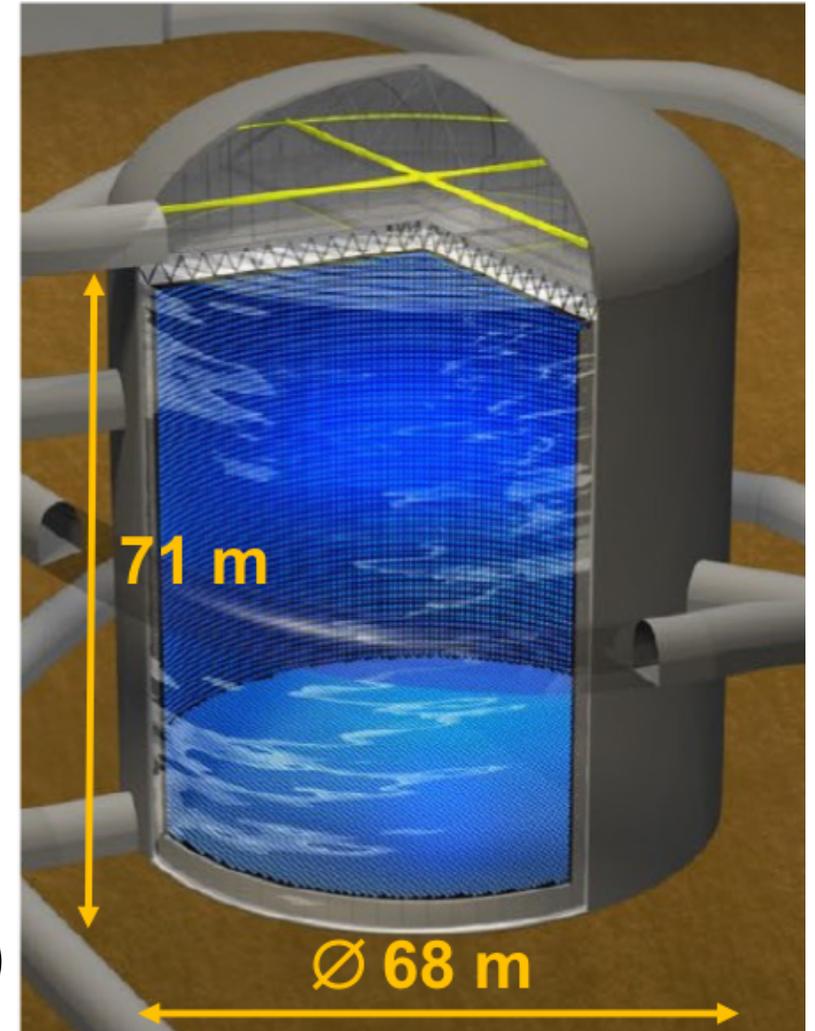
1 cm³ cubes
3 fibers per cube



2027 (план): старт **НК/Т2НК**

- Усиленная мощность пучка J-PARC MR: **~1.3 МВт**
 - 2.7×10^{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°
 - 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 σ of CPV discovery)
- Богатая (астро)физическая программа

* IWCD = Intermediate Water Cherenkov Detector





Заключение

- За 10 лет сеансов (23.01.2010 – 12.02.2020) накоплено 3.64×10^{21} POT (ν : 1.99×10^{21} ; $\bar{\nu}$: 1.65×10^{21} POT); достигнута мощность 515 кВт
- Результаты для дефицита $\nu_{\mu}/\bar{\nu}_{\mu}$ согласуются с другими данными: $\sin^2(\theta_{23}) = 0.53$; $|\Delta m^2_{32}| = (2.45 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2/\text{c}^4$
- Результаты для **CP нарушающей фазы** указывают на значение, близкое к максимальному $\delta_{\text{CP}} = -1.89^{+0.70}_{-0.58}$ (для нормальной иерархии масс)
- Значения **CP сохраняющей фазы** $\{\delta_{\text{CP}} = 0 \text{ и } \delta_{\text{CP}} = \pm\pi\}$ **исключены** на уровне **выше 2σ** для обоих вариантов иерархии масс, причём, для нормальной иерархии $\delta_{\text{CP}} = 0$ исключено на уровне **3σ** (99.73% c.l.)
- В 2021 г. планируется модернизация ближнего детектора ND280



T2K Collaboration



Italy ~500 members, 64 Institutes, 12 countries

Canada

TRIUMF
U. B. Columbia
U. Regina
U. Toronto
U. Victoria
U. Winnipeg
York U.

France

CEA Saclay
LLR E. Poly.
LPNHE Paris

Germany

Aachen U.

INFN, U. Bari
INFN, U. Napoli
INFN, U. Padova
INFN, U. Roma

Japan

ICRR Kamioka
ICRR RCCN
Kavli IPMU
KEK
Kobe U.
Kyoto U.
Miyagi U. Edu.
Okayama U.
Osaka City U.
Tokyo Institute Tech
Tokyo Metropolitan U.
U. Tokyo
Tokyo U of Science
Yokohama National U.

Poland

IFJ PAN, Cracow
NCBJ, Warsaw
U. Silesia, Katowice
U. Warsaw
Warsaw U. T.
Wroclaw U.

Russia

INR

Spain

IFAE, Barcelona
IFIC, Valencia
U. Autonoma Madrid

Switzerland

ETH Zurich
U. Bern
U. Geneva

United Kingdom

Imperial C. London
Lancaster U.
Oxford U.
Queen Mary U. L.
Royal Holloway U.L.
STFC/Daresbury
STFC/RAL
U. Liverpool
U. Sheffield
U. Warwick

USA

Boston U.
Colorado S. U.
Duke U.
Louisiana State U.
Michigan S.U.
Stony Brook U.
U. C. Irvine
U. Colorado
U. Pittsburgh
U. Rochester
U. Washington

Vietnam

IFIRSE
IOP, VAST

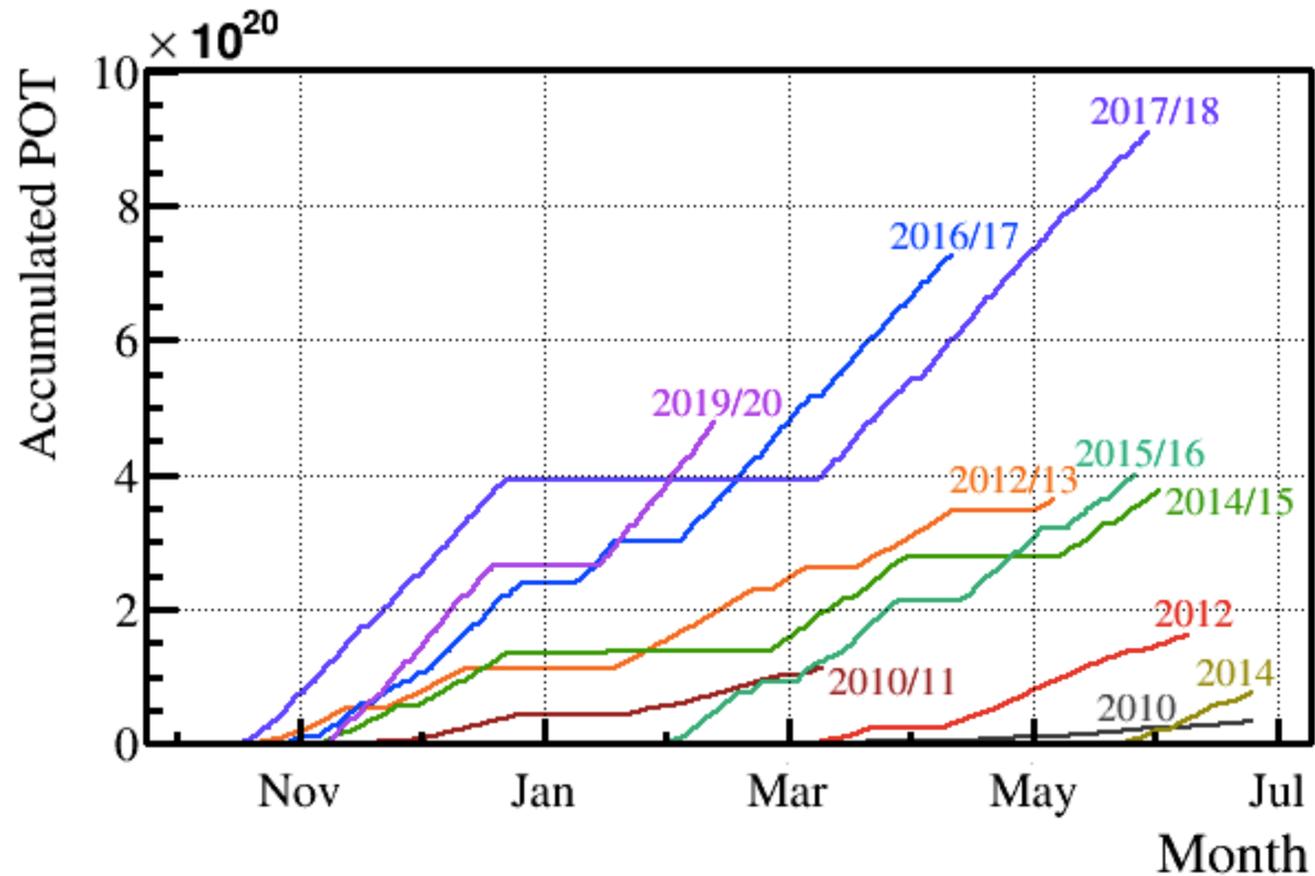


Дополнительные слайды



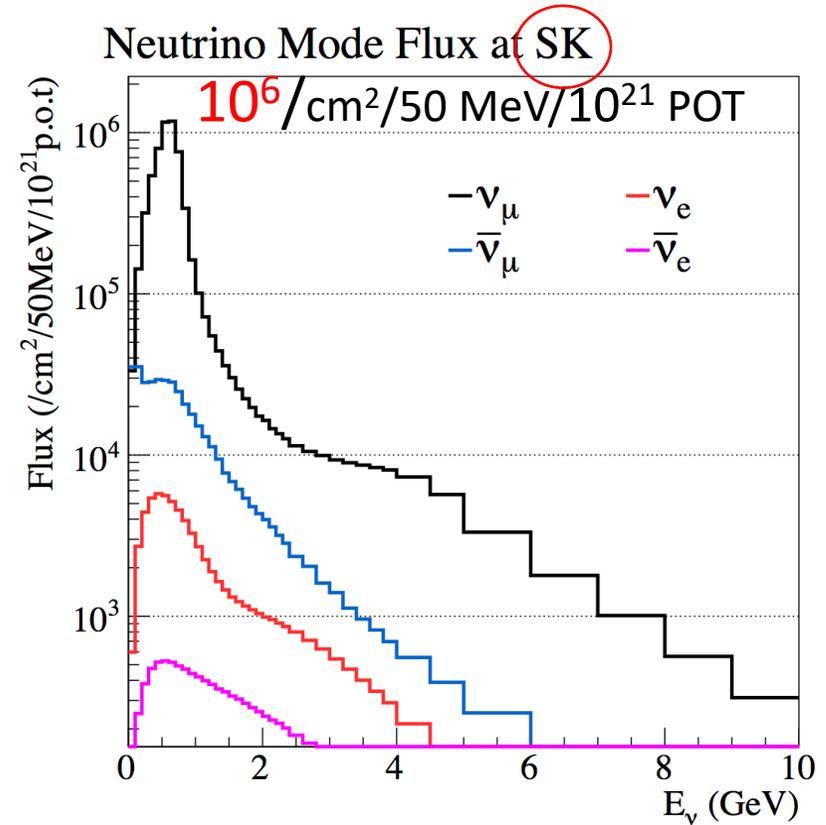
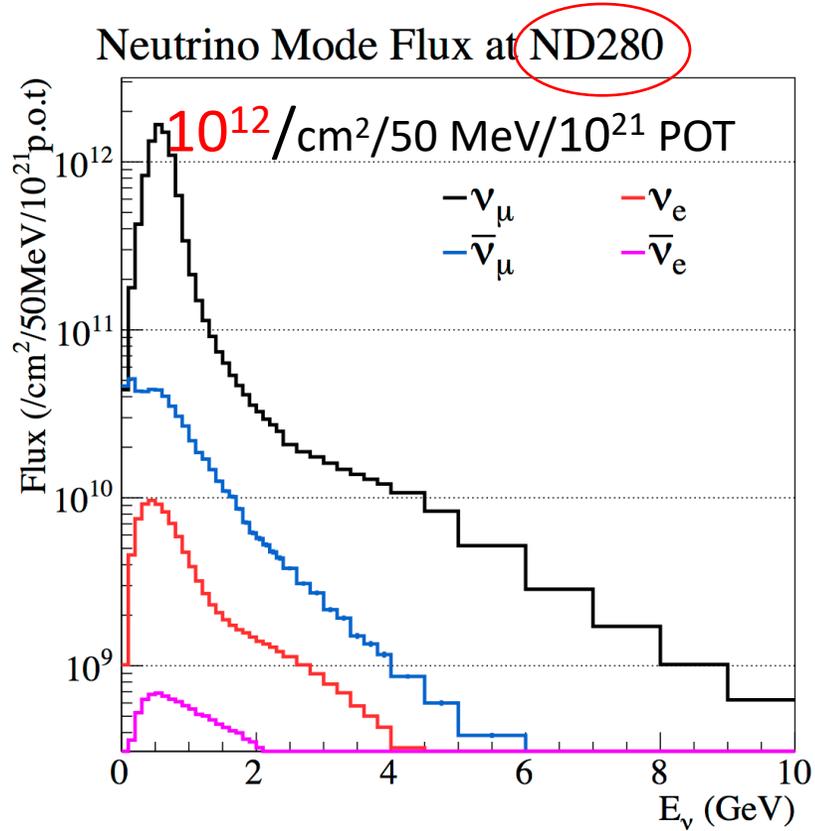
Экспериментальные данные T2K

Yearly Delivered POT - up to T2K Run 10





Нейтринный поток (без осцилляций)



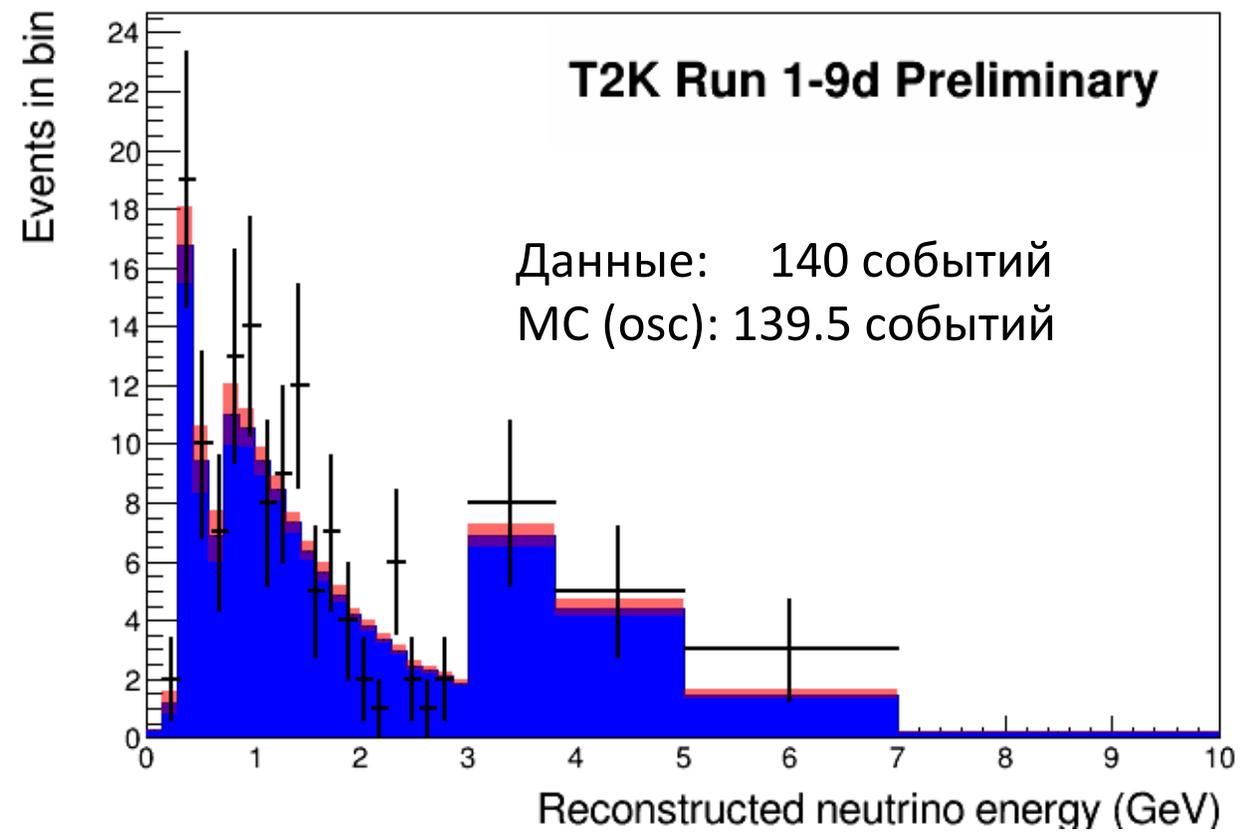
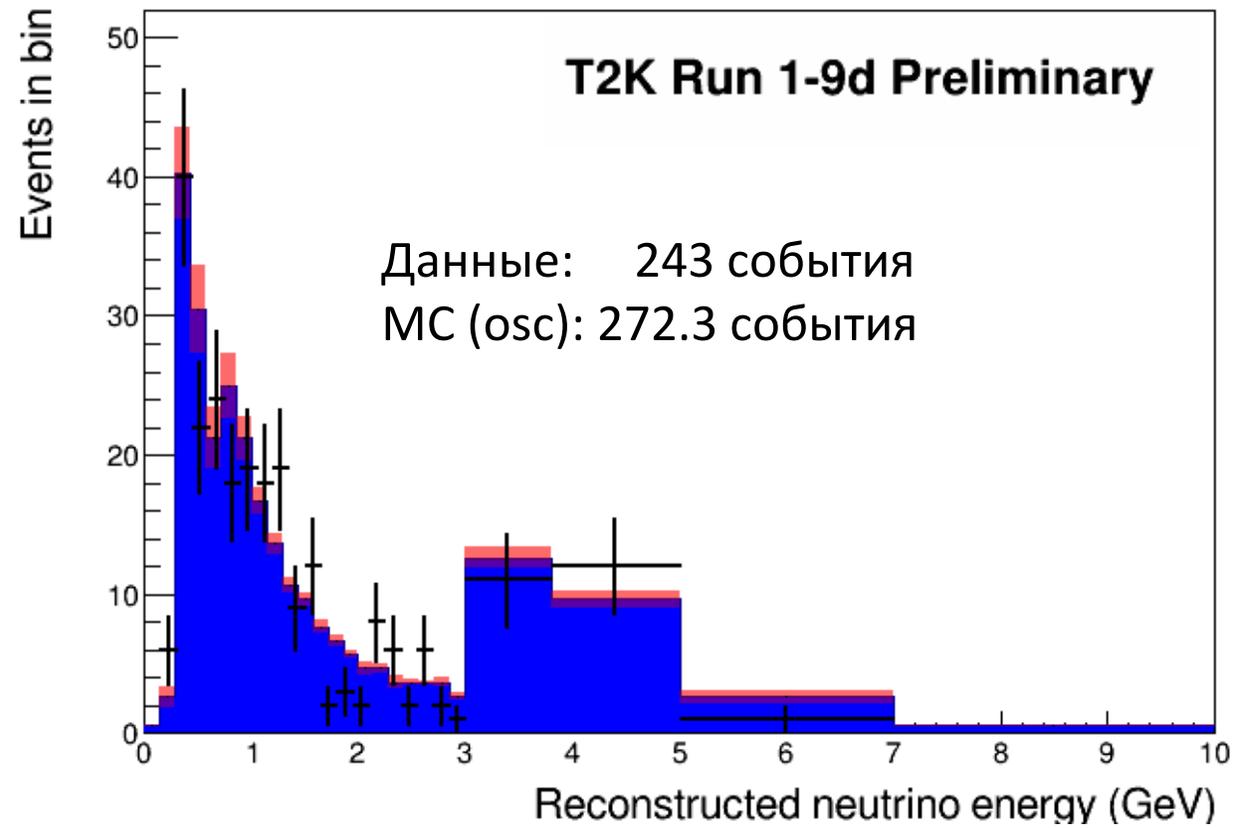


Дефицит мюонных (анти)нейтрино

$1.49 \times 10^{21} (\nu) + 1.64 \times 10^{21} (\bar{\nu})$ POT

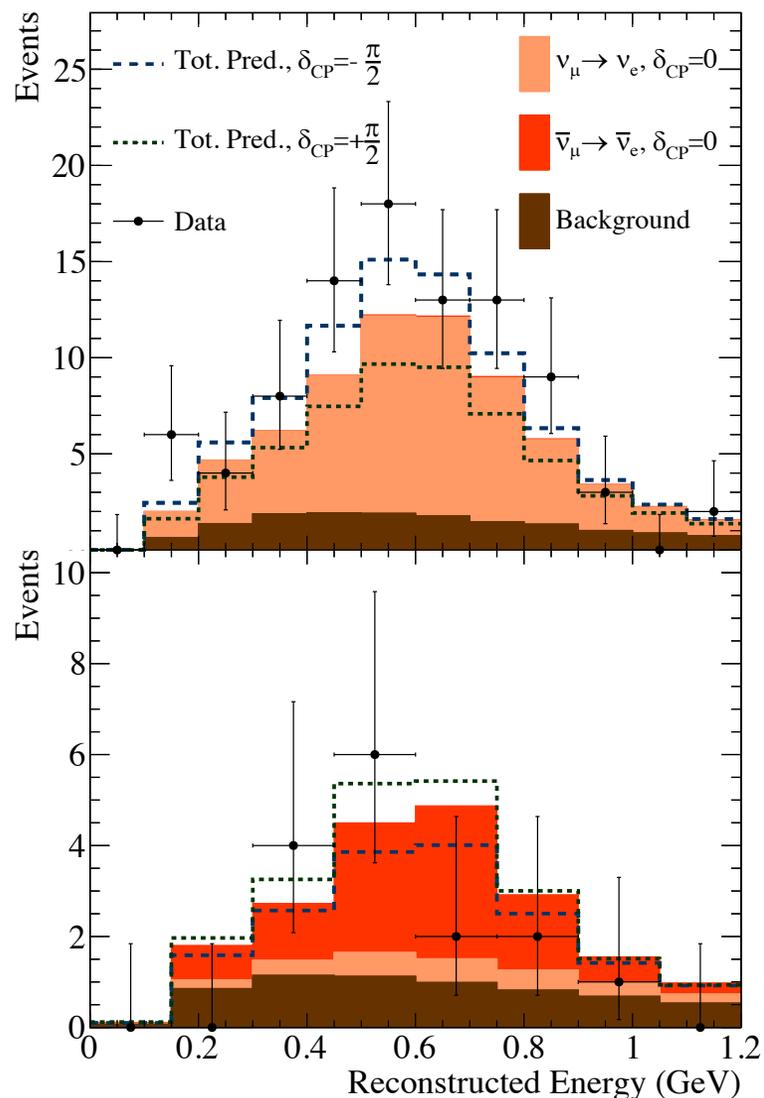
$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$

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





Избыток электронных (анти)нейтрино



1.49×10^{21} (ν) + 1.64×10^{21} ($\bar{\nu}$) POT

$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$

Данные: 90 событий

MC (osc): 81.5 событий

MC (no osc.): 15.3 событий

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

Данные: 15 событий

MC (osc): 17.1 событий

MC (no osc.): 6.4 событий



Систематические ошибки

(после ограничения ближним детектором ND280)

Error source	1-Ring μ -like		1-Ring e -like			
	ν -mode	$\bar{\nu}$ -mode	ν -mode	$\bar{\nu}$ -mode	ν -mode CC1 π	$\nu/\bar{\nu}$ -modes
SK Detector	2.40	2.01	2.83	3.80	13.15	1.47
SK FSI + SI + PN	2.21	1.98	3.00	2.31	11.43	1.57
Flux+Cross sect. constrained	3.27	2.94	3.24	3.10	4.09	2.67
E_b	2.38	1.72	7.13	3.66	2.95	3.62
$\sigma(\nu_e)/\sigma(\bar{\nu}_e)$	0.00	0.00	2.63	1.46	2.61	3.03
NC1 γ	0.00	0.00	1.09	2.60	0.33	1.50
NC Other	0.25	0.25	0.15	0.33	0.99	0.18
Osc	0.03	0.03	2.69	2.49	2.63	0.77
Total Systematic error	5.12	4.45	8.81	7.13	18.38	5.96

FSI = Final State Interaction
SI = Secondary interactions
PN = Photo-nuclear interactions
 E_b = binding energy; NC = Neutral Current

М. Хабибуллин, Эксперимент T2K, Новосибирск, 10-12
марта 2020

Важно для δ_{CP}



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)

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

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

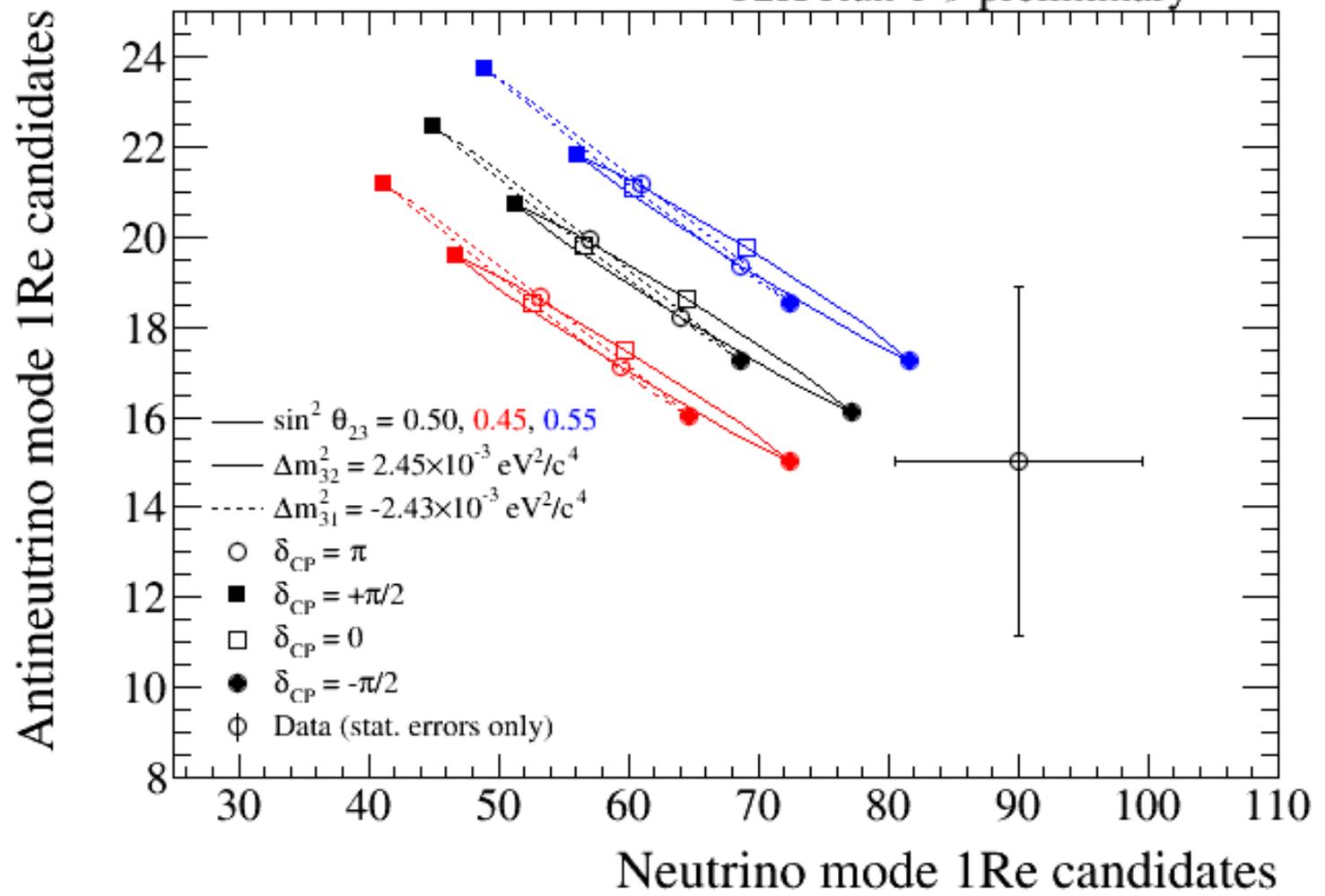
$$a \equiv 2\sqrt{2}G_F n_e E = 7.56 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \frac{\rho}{\text{gcm}^{-3}} \frac{E}{\text{GeV}}$$

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



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

T2K Run 1-9 preliminary





CP violation

Jarlskog invariant:

$$J_{CP, lepton} = (1/8) \cos\theta_{13} \sin(2\theta_{12}) \sin(2\theta_{23}) \sin(2\theta_{13}) \sin(\delta_{CP})$$
$$\simeq \mathbf{3.3 \times 10^{-2} \sin(\delta_{CP})}$$

$$J_{CP, quark} = \mathbf{3.3 \times 10^{-5}}.$$



Функция правдоподобия

$$-2 \ln \lambda(\overline{\delta_{CP}}; \mathbf{a}) = 2 \sum_{i=1}^N \left[n_i^{obs} \ln \left(\frac{n_i^{obs}}{n_i^{exp}} \right) + n_i^{exp} - n_i^{obs} \right] + (\mathbf{a} - \mathbf{a}_0)^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{a} - \mathbf{a}_0)$$

where $\overline{\delta_{CP}}$ is the estimated value of δ_{CP} , \mathbf{a} is the vector of systematic parameter values (including the remaining oscillation parameters), \mathbf{a}_0 is the vector of default values of the systematic parameters, \mathbf{C} is the systematic parameter covariance matrix, N is the number of reconstructed energy and lepton angle bins, n_i^{obs} is the number of events observed in bin i and $n_i^{exp} = n_i^{exp}(\overline{\delta_{CP}}; \mathbf{a})$ is the corresponding expected number of events. Systematic parameters are marginalized according to their prior constraints from the fit to ND280 data.