## "Исследование осцилляций нейтрино на ускорителях: основные результаты"

### А. В. Буткевич

### Институт ядерных исследований РАН, Москва

### 01.04.2022

(\*) Осцилляции нейтрино. Гипотеза о возможном смешивании нейтрино Понтекорво (1957), Маки, Накагава, Саката (1962). Нейтрино с определенным ароматом  $\nu_{\alpha}$ , где  $\alpha = e, \mu, \tau$  является суперпозицией  $\nu_i$ , i=1,2,3,... собственных состояний с массами  $m_i \neq m_j$ 

$$u_{lpha} = \sum U_{lpha i} 
u_i$$

В случае 3-х дираковских состояний  $\nu_i$  матрица смешивания лептонов  $U_{\alpha i}$  зависит от 3-х углов смешивания  $\theta_i$  и дираковской фазы нарушения СР-инвариантности в лептонном секторе  $\delta$ . СР-инвариантность сохраняется, если  $U = U^*$  - реальнная матрица, т.е.  $\delta = 0, \pi$ 

### Актуальность

### 3-х флейворная парадигма нейтринных осцилляций

Матрица смешивания дираковских массивных нейтрино Понтекорво-Маки-Накагава-Саката (аналогично смешиванию кварков)  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}, \quad s_{ij} = \sin \theta_{ij}, \quad \delta$ -фаза нарушения СР-инвариантности

$$U=\left(egin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 \ 0 & c_{23} & s_{23} \ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{array}
ight) \left(egin{array}{cccc} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-\imath\delta} \ 0 & 1 & 0 \ -s_{13}e^{\imath\delta} & 0 & c_{13} \end{array}
ight) \left(egin{array}{cccc} c_{12} & s_{12} & 0 \ -s_{12} & c_{12} & 0 \ 0 & 0 & 1 \end{array}
ight)$$

атмосферные, ускоритель ускоритель, реактор солнечные, реактор

В случае майорановских массивных нейтрино матрица смешивания  $U_M$  содержит две дополнительных фазы нарушения СР-инвариантности  $(\xi_1, \xi_2)$  и имеет вид

$$U_M = U imes diag(1, \exp(i m{\xi}_1), \exp(i m{\xi}_2))$$

Эффекты осцилляций - после прохождения расстояния  $L: \nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}$ , где  $\alpha, \beta = e, \mu, \tau, \dots$  Вероятности осцилляций зависят от энергии нейтрино E и пройденного расстояния L, а также от разностей квадратов масс нейтрино  $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ , углов смешивания  $\theta_{ij} = [0, \pi/2]$ , фазы  $\delta = [0, 2\pi]$  и иерархии масс нейтрино. Фазы ( $\xi_1, \xi_2$ ) не влияют на эффекты осцилляций нейтрино.

А. Буткевич (ИЯИ РАН)

ИЯИ РАН-01.04.2022 3 / 40

### Актуальность

Измеренные значения параметров 3-х нейтринных осцилляций.

 $\Delta m^2 = m_3^2 - (m_2^2 + m_1^2)/2$ иерархия масс: нормальная (NH)  $m_1 \ll m_2 \ll m_3$  и  $\Delta m_{23}^2 > 0$  или обратная (IH)  $m_3 \ll m_1 \ll m_2$  и  $\Delta m_{23}^2 < 0$ ?

Солнечные и реакторные (анти)нейтрино ("солнечные" параметры)  $\Delta m^2_{21} = (7.39^{+0.021}_{-0.020}) \cdot 10^{-5} \ \Im B^2 \ \sigma \approx 2.8\%$  $\sin^2 \theta_{21} = 0.310 \pm 0.013 \ \sigma \approx 4.2\%$ 

Реакторные, ускорительные (анти)нейтрино  $\sin^2 \theta_{13} = 0.0226 \pm 0.00065$  (IH) и  $\sin^2 \theta_{13} = 0.0224 \pm 0.00065$  (NH)  $\sigma \approx 2.8\%$ 

Атмосферные и ускорительные (анти)нейтрино ("атмосферные" параметры)  $|\Delta m_{23}^2| = (2.510 \pm 0.03) \cdot 10^{-3} \ \text{sB}^2$  (IH)  $|\Delta m_{23}^2| = (2.454 \pm 0.03) \cdot 10^{-3} \ \text{sB}^2$  (NH)  $\sigma \approx 1.2\%$  $\sin^2 \theta_{23} = 0.565^{+0.017}_{-0.022}$  (IH) и  $\sin^2 \theta_{23} = 0.563^{+0.018}_{-0.024}$  (NH)  $\sigma \approx 4.2\%$ 

Фаза нарушения СР-инвариантности  $\delta/^{\circ} = 282^{+23}_{-25}$ ,  $3\sigma$  интервал (205 - 348) (IH) и  $\delta/^{\circ} = 221^{+39}_{-28}$ ,  $3\sigma$  интервал (154 - 357) (NH)

PDG 2020.

Что еще необходимо сделать в осцилляционных экспериментах

Измерить вероятности  $\nu_\mu \to \nu_e, \, \bar{\nu}_\mu \to \bar{\nu}_e$  переходов, вероятность выживания  $\nu_\mu \to \nu_\mu$  и  $\bar{\nu}_\mu \to \bar{\nu}_\mu$  и определить

- (\*) иерархию масс: нормальная (NH)  $m_1 \ll m_2 \ll m_3$ , или обратная (IH)  $m_3 \ll m_1 \ll m_2$ ?
- ( $\star$ ) фазу нарушения СР инвариантности  $\delta$  в лептонном секторе  $\delta 
  eq [0,\pi]$
- (\*) уточнить значения  $\Delta m^2_{23}$  и  $\theta_{23}$ . Если  $\sin^2 2\theta_{23} < 1(0.97)$ , то определить в какой четверти находится угол  $\theta_{23}$ . Если  $\theta_{23} < 45^\circ$ , то (в массивном состоянии  $\nu_3$  примесь  $\nu_{\tau}$  больше, чем  $\nu_{\mu}$ ) или наоборот. если  $\theta_{23} > 45^\circ$

3-х флейворная парадигма хорошо описывает подавляющее большинство данных.

#### Аномальные эффекты : MiniBooNe PRD 103, 052002 (2020)



Ускорительные осцилляционные эксперименты на коротких расстояниях наблюдают аномальные эффекты для  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ ,  $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e}$  переходов, а именно, большие вероятности появления  $\nu_{e}$  в пучке  $\nu_{\mu}$ . 3+1 схема смешивания нейтрино  $\nu_{e}$ ,  $\nu_{\mu}$ ,  $\nu_{\tau}$ ,  $\nu_{s}$  - стерильное нейтрино с  $\Delta m^{2} = 0.043$  эВ<sup>2</sup> и sin<sup>2</sup> 2 $\theta = 0.807$  (best fit) ("Призрак" стерильных нейтрино). В экспериментах на исчезновение (  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$ ,  $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu}$  каналы) анамалий не наблюдается.

А. Буткевич (ИЯИ РАН) "Исследование осцилляций нейтрино ..

### ФОРМАЛИЗМ НЕЙТРИННЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ

А. Буткевич (ИЯИ РАН)

"Исследование осцилляций нейтрино .. ИЯИ

ИЯИ РАН-01.04.2022

7 / 40

### 3-х флейворная парадигма - осцилляции в веществе

### Эксперименты с большими расстояниями между источником и детектором нейтрино

- (\*) Нейтрино проходит большие расстояния в среде с постоянной плотностью.
- (\*) Влияние среды из-за различия в амплитудах упругого рассеяния вперед, например,  $\nu_{\mu}$  только из-за взаимодействия нейтральным током, а  $\nu_e$  рассеяние заряженным и нейтральным токами на электронах. Эффект вещества (Михеев-Смирнов-Волфенстайн)
- (\*) Среда может приводить как к подавлению осцилляций, так и к усилению их глубины
- (\*) Расчеты вероятностей осцилляций по точным формулам трудоемки, поэтому используются разложение в ряд по малому параметру  $lpha=\Delta m^2_{21}/\Delta m^2_{31}pprox 0.034$

Вероятность выживания  $u_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$  на расстоянии L.

Эффект вещества отсутствует, осцилляции как в вакууме

 $P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}) \approx 1 - (\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{23} + \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23}) \sin^2 \Delta,$ 

где  $\Delta = \Delta m_{31}^2 L/4E$ , E-энергия нейтрино. Лидирующий член  $\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \Delta$  позволяет определить значения  $\sin 2\theta_{23}$  и  $\Delta m_{31}^2$ . Вероятность появления  $\nu_e$  в пучках  $\nu_\mu$  в веществе. Приближенные решения уравнения эволюции  $\Rightarrow$  разложение по малым параметрам  $\alpha$ , A,  $s_{13}$  и их комбинациям.

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}) \approx \sin^{2} 2\theta_{13} \sin^{2} \theta_{23} \frac{\sin^{2}(A-1)\Delta}{(A-1)^{2}} + \alpha^{2} \sin^{2} 2\theta_{12} \cos^{2} \theta_{23} \frac{\sin^{2} A\Delta}{A^{2}} + \alpha \sin 2\theta_{13} \cos(\Delta + \delta) \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \frac{\sin A\Delta}{A} \frac{\sin(A-1)\Delta}{A-1},$$

где  $A=VL/2\Delta$  зависит от упорядочивания масс и  $\delta o -\delta$  для  $ar
u_\mu oar
u_\mu$  и A o -A для  $\Delta<0.$ 

$$V = \sqrt{2}G_F \rho m_N^{-1} Y_e \simeq 7.56^{-14} \rho Y_e, \tag{1}$$

где  $Y_e\simeq 0.5$  - число электронов, приходящихся на один нуклон среды,  $ho(r/cm^2)$  - плотность вещества вдоль траектории нейтрино.

Вероятности  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$  и  $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e}$  осцилляций зависят от знака  $\Delta$  - иерархии масс нейтрино, угла  $\theta_{23}$  ( $\theta_{23} < \pi/4$  или  $\theta_{23} > \pi/4$ ) и фазы СР-нарушения. При этом амплитуда  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$  ( $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e}$ ) осцилляций будет максимальной (минимальной) при NO и  $\delta_{CP} \simeq -\pi/2$  и минимальной (максимальной) при IO и  $\delta_{CP} \simeq \pi/2$ . На пути  $l_0 = \sqrt{2\pi m_N}/(G_F \rho Y_e)$  в результате рассеяния приобретается дополнительная разность фаз у  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ :  $\Delta \phi = 2\pi$ . Эффект вещества заметен на толщи  $d_0 = \rho l_0 \approx 3.5 \times 10^9$  (г/см<sup>3</sup>). Длина осцилляций в вакууме  $l_\nu = 4\pi E/\Delta m_{31}^2$ . Если  $l_\nu \ll l_0$  - изменение свойств осцилляци незначительно. Оценка эффекта вещества в области энергий нейтрино, где эффект  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  осцилляций максимальный, т.е.  $\sin^2 \Delta_{31} \approx 1$ .  $P_{\mu e}^m \approx P_{\nu e}^\nu (1 + 2E/E_r)$ где  $P^m(P^v)$  - вероятность осцилляций в веществе (вакууме) и  $E_r = \Delta m_{31}^2/2V \approx 10$ ГэВ при  $\Delta m_{31}^2 \simeq 2.5 \times 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup> и  $\rho = 3$  г/см<sup>3</sup>. Нейтрино-антинейтрино асимметрия, определенная как

 $A_{CP} = [P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e})]/[P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e})].$ 

Для оценки  $A_{CP}$  при  $\Delta \sim \pi/2$  можно использовать выражение

$$\begin{split} A_{cp} &= A_{CP}^{\delta} + A_{CP}^{mat} \\ A_{CP}^{\delta} &\simeq \frac{\cos \theta_{23} \sin \theta_{21}}{\sin \theta_{23} \sin \theta_{31}} \left( \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \right) \sin \delta_{CP}, \end{split}$$

и  $A_{CP}^{mat} \propto L \times E$ . Таким образом, измеряемая в веществе асимметрия обусловлена асимметрией  $A_{CP}^{\delta}$ , вызванной нарушением СР-инвариантности и асимметрией  $A_{CP}^{mat}$ , возникающей из-за эффекта вещества. Знак  $A_{CP}^{mat}$  определяется иерархией масс, т.е.  $A_{CP}^{mat} > 0$  ( $A_{CP}^{mat} < 0$ ) при  $\Delta > 0$  ( $\Delta < 0$ ).

А. Буткевич (ИЯИ РАН) "Исследование осцилляций нейтрино .. ИЯИ РАН-01.04.2022

10/40

Аномальные результаты в нейтринных экспериментах на коротких расстояниях, которые не находят своего объяснения в рамках 3-х флейворной парадигмы

- $(\star)$  избытки  $u_e$  и  $ar{
  u}_e$ , наблюдаемые в ускорительных экспериментах
- $(\star)$  дефицит  $ar{
  u}_e$  событий, наблюдаемый в экспериментах с реакторными нейтрино
- (\*) дефицит  $\nu_e$  событий, наблюдаемый в экспериментах с радиоактивными источниками нейтрино

Простое объяснение этих анамалий дает 3+1 модель, где стандартный нейтринный сектор  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  расширяется дополнительным ароматом  $\nu_s$  - стерильным нейтрино, которое не участвует во взаимодействиях Стандартной Модели. Три легких активных нейтрино  $\nu_\alpha$  и стерильных нейтрино  $\nu_s$  представдляют смесь массивных состояний  $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4$ , где  $m_4 \approx O(1 \text{ >B})$ , что следует из наблюдаемых аномалий.

Параметрически можно расширить матрицу U(3 imes 3) до матрицы U(4 imes 4) с

 $lpha=e,\mu, au,s$  и i=1,2,3,4.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & U_{e4} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} & U_{\mu4} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} & U_{\tau4} \\ U_{s1} & U_{s2} & U_{s3} & U_{s4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \end{pmatrix},$$

Матрица U параметризуют 3-я углами  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$  и CP-фазой  $\delta$  плюс 3 дополнительных угла  $\theta_{14}, \theta_{24}, \theta_{34}$  и две CP-фазы  $\delta_{24}, \delta_{14}$ . Полагают, что  $\Delta_{14}^2 \approx \Delta_{43}^2 \approx \Delta_{41}^2 \approx 1$  эВ<sup>2</sup>. Кроме того,  $\Delta m_{41}^2 >> |\Delta m_{31}^2|, \Delta m_{21}^2$ .

Тогда вероятность осцилляций на коротких расстояниях можно записать как \* Нейтрино от реактора и источника  $P(u = v = u) \approx 1 - 4|U| |^2(1 = |U| |^2) \sin^2 \Lambda = 1 - \sin^2(20) \sin^2 \Lambda$ 

$$\begin{split} P(\nu_e \to \nu_e) &\approx 1 - 4|U_{e4}|^2 (1 - |U_{e4}|^2) \sin^2 \Delta \equiv 1 - \sin^2(2\theta_{ee}) \sin^2 \Delta \\ \star \text{ Нейтрино от ускорителя (убывание из пучка)} \\ P(\nu_\mu \to \nu_\mu) &\approx 1 - 4|U_{\mu4}|^2 (1 - |U_{\mu4}|^2) \sin^2 \Delta \equiv 1 - \sin^2(2\theta_{\mu\mu}) \sin^2 \Delta \\ \star \text{ Нейтрино от ускорителя (появление в пучке)} \\ P(\nu_\mu \to \nu_e) &\approx 4|U_{\mu4}|^2 |U_{e4}|^2 \sin^2 \Delta \equiv \sin^2(2\theta_{\mu e}) \sin^2 \Delta \\ \star \text{ Нейтрино от ускорителя (убывание из пучка нейтральный ток)} \\ P^{NC}(\nu_\mu \to \nu_s) &\approx 1 - 4|U_{\mu4}|^2 |U_{s4}|^2 \sin^2 \Delta \equiv 1 - \sin^2(2\theta_{\mu\mu}) \sin^2 \Delta, \\ \text{где } \Delta = \Delta m_{14}^2 L/4E \end{split}$$

Из этих экспериментов можно определить матричные элементы  $U_{e4}, U_{\mu4}, U_{s4}$  и использовать условие унитарности (для модели 3+1)

 $|U_{e4}|^2 + |U_{\mu4}|^2 + |U_{\tau4}|^2 + |U_{s4}|^2 = 1$  и связь амплитуд для появления и исчезновения  $\sin^2 2 heta_{\mu e} \leq \sin^2 2 heta_{\mu \mu} \sin^2 2 heta_{ee}/4$ 

## Ускорительные нейтринные осцилляционные эксперименты

## Long baseline neutrino experiment: NOvA



Off-axis (14 mrad) пучок нейтрино большой интенсивности мощность протонного пучка составляет 0.7 MBт.

Используются два детектора: NDближний детектор (эффекты осцилляций малы) и FD- дальний детектор на расстоянии L=810км (NOvA) для регистрации эффектов осцилляций в потоках нейтрино.

Эффект осцилляций максимальный при  $E_{min}\sim \Delta m^2_{23}L$ , т.е. при  $E\sim 1\div 3$  ГэВ.



• Thist antimentino data. 0.9 x 10 TOT, taken red 2017 - April 2018

Спектры (анти)нейтрино на ND и FD: при  $heta_
u = 14mrad$  узкий пик в области  $E_
u = 2$  ГэВ.

## Нейтринные детекторы (SiPM MPPC Hamamatsu



Extruded PVC cells are filled with scintillating mineral oil. Scintillator light is collected by WLS to 32-pixel APD.

## Ближний детектор в Фермилабе на глубине 100м



# Дальний детектор в Миннессоте (Аш-Ривер) на поверхности



"Исследование осцилляций нейтрино ..

18 / 40

### Экспозиция $13.6 imes 10^{20}POT$ - $u_{\mu}$ пучок и $12.5 imes 10^{21}POT$ - $ar{ u}_{\mu}$ пучок



M.A.Acero et al., arXiv:2108.08219 (2021)

 $\bar{\nu}_e$ CC: зарегистрировано - 33, фон - 14, best fit - 33

## Long baseline neutrino experiment: T2K



**T2K Experiment** 

Off-axis  $(2.5^{\circ})$  пучок нейтрино большой интенсивности. Мощ-



- Accelerator-based  $\nu$  beam
- $\nu$  energy is narrow with off-axis method L = 295km  $\rightarrow$  oscillation peak at 0.6GeV
- +  $\nu$  /  $\overline{\nu}$  can be switched by flipping horn polarity
  - <1% of intrinsic  $\nu_e$  at peak energy
  - ~5% of wrong sign component in  $\overline{\nu}$  beam mode

Спектры на FD: узкий пик в области  $E_{\nu} = 0.6$  ГэВ.



## СуперКамиоканда



# FD observed event



 $\nu$ -mode :14.9x10<sup>20</sup> POT ,  $\overline{\nu}$ -mode : 16.3x10<sup>20</sup> POT

K.Abe et al., PRD 103, 112008 (2021)



Схема Short-Baseline Neutrino (SBN) эксперимента в Фермилабе (США).

Используются Liquid Argon Time Projection Chambers (LArTPC) три детектора:

а) ближний детектор с активной массой 112 т на растоянии 110 м с объемом 5м (Д)  $\times$  4м (Ш)  $\times$  4м (В),

б) дальний детектор ICARUS - T600 с массой 470 т на расстоянии 600 м с объемом 18м(Д)  $\times$  3.2м (Ш)  $\times$  3м (В),

в) Средний детектор MicroBooNE с массой 85 т в активном объеме на расстоянии 469 м с объемом 10.4м(Д) × 2.6м(Ш) × 2.3м(В).

## Spectr at MicroBooNE detector



Спектры нейтрино в нейтринном пучке Boster Neutrino Beam (BNB). Широкий максимум при энергии нейтрино  $\sim 0.7$  ГэВ, как и в эксперименте T2K. Состав пучка:  $\nu_{\mu}$ : 93.65%,  $\bar{\nu}_{\mu}$ : 5.79%,  $\nu_{e}$ : 0.51%,  $\bar{\nu}_{e}$ : 0.06%.



MicroBooNE детеутор. Криостат и внутренняя часть детектора.

Расстояние дрейфа - 2.56 м при электрическом дрейфовом поле 273 В/см. Электроны дрейфуют со скоростью 1.1 mm/ $\mu$ s. Система светосбора, состоящая из 32 ФЭУ, расположена за тремя плоскостями анодной проволки (вертикальные и под углом  $\pm 60^{\circ}$ ), которые регистрирует ионизационный заряд. Расстояние между плоскостями 3 mm и расстояние между проволаками 3 мм.

### Результаты экспериментов NOvA и T2K

### Параметры осцилляций (best-fit points of T2K and NOvA data) NOvA - arXiv [2108.08219(hep-ph)] T2K - Phys. Rev> D103, 112008, (2021)

Получены при			PDG 2018
$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0857 \pm$	$= 0.0046, \ \sin^2$	$\theta_{12} = 0.307^{+0.13}_{-0.12},$	$\Delta_{12} = (7.53 \pm 0.18) 10^{-5} eV^2$
Параметры	NOvA	T2K	
$\Delta_{32}/10^{-3} eV^2$ (NH)	$2.41\substack{+0.07 \\ -0.07}$	$-\ 2.45 \pm 0.07$	
$\Delta_{32}/10^{-3} eV^2~( ext{IH})$	$2.45\substack{+0.07 \\ -0.07}$	$ 2.43\pm0.07$	
$\sin^2 heta_{23}$ (NH)	$0.57\substack{+0.03 \\ -0.04}$	$0.53\substack{+0.029\\-0.035}$	
$\sin^2 heta_{23}$ (IH)	$0.56\substack{+0.03\\-0.04}$	$0.53\substack{+0.029\\-0.035}$	
$\delta_{CP}/\pi$ (NH)	$0.82\substack{+0.27\\-0.87}$	$1.389\substack{+0.223\\-0.185}$	
$\delta_{CP}/\pi$ (IH)	$1.52^{+0.27}_{-0.87}$	$1.56\substack{+0.149\\-0.179}$	
POWELTATLI AKCEODIAMOL			DY MO MACC HA 68%

Результаты экспериментов предпочитают нормальную иерархию масс на 68% доверительном уровне.



"T2K best fit point" -  $\delta_{CP}=1.56$  исключается результатом NOvA с достоверностью  $2\sigma$ 

"NOvA best fit point" -  $\delta_{CP}=0.82$  отвергается результатом T2K на уровне  $2\sigma$ .

★ Обратная иерархия масс.

Разрешенная область T2K с доверительным интервалом 90% содержится в разрешенной области NOvA.

⋆ Возможный компромисс.

Обратная иерархия масс и  $\delta_{CP} pprox 3\pi/2$ .

## MiniBooNE и MicroBooNE спектры событий



Инклюзивные спектры электронных событий  $\nu_e + C \rightarrow e + X$  в экспериментах MiniBooNE (левый рисунок) и событий  $\nu_e + Ar \rightarrow e + X$  в MicroBooNE (правый рисунок arXiv:2110.14054).

Для описания спектра событий, измеренного в эксперименте MicroBooNE нет необходимости привлекать вклады стерильных нейтрино. Измеренный и ожидаемый инклюзивные спектры согласуются в пределах ошибок.

### Результаты эксперимента MicroBooNE



Отношение числа событий DATA/MC с разными топологиями (правый рисунок): (1e1p) - регистрируется  $e^- + p$ ;  $(1eNp0\pi)$  - регистрируется  $e^- + Np$ ;  $(1e0p0\pi)$  - регистрируется только  $e^-$ , (1eX) - инклюзивный спектр  $e^- + X$ Спектры 1e1p событий (правый рисунок) arXiv:2110.14054

Согласие с данными в пределах ошибок.

Ошибки в сечениях и потоках нейтрино доминирует в полной систематической ошибке эксперимента. Ошибки в сечениях обусловлены ядерными эффектами: структура ядра, распределение нуклонов в ядре по энергии и импульсу, взаимодействие нуклонов в начальном (нуклон-нуклонные корреляции) и конечном состояниях, вклад токов обменных мезонов.

\* Слабое взаимодействие нейтрино исследует структуру ядра, также как и электромагнитное взаимодействие электронов.

\* Векторную часть электромагнитного взаимодействия можно определить из рассеяния электронов, а влияние ядерной среды, такое же как и при нейтрино-ядерном рассеянии. \* Если модель не способна воспроизвести точные данные по рассеянию электронов, то нельзя ожидать, что она сможет правильно предсказать нейтринные сечения.

- ★ В области энергий нейтринных экспериментов 0.5 5 ГэВ доминируют:
- QE квазиупругий процесс e + A 
  ightarrow e + N + X
- $\mathsf{MEC}$  рассеяние на обменных мезонах e + A o 2N + X (двух-частичные токи)
- RES рассеяние с рождением барионных резонансов  $e + A 
  ightarrow e + \pi + N + X$

★ Модели, используемые в расчете A. Butkevich et al., Phys. Rev. C102, 024602 (2020) QE - RDWIA модель Phys. Rev. C59,3256 (1999)

MEC - 2p-2h MEC модель Phys. Rev. D91, 073004 (2015)

**RES** - параметризация неупругих структурных функций Phys. Rev. C77, 065206 (2008)

\* Инклюзивные дифференциальные сечения рассеяния электронов на  ${}^{12}C, {}^{40}Ca, {}^{40}Ar$ , вычисленные в QE+MEC+RES подходе.



 $^{12}C(e,e')$  дифференциальные сечения как функции переданной энергии  $\omega$  в сравнении с

результатами RDWIA+MEC+RES модели.

А. Буткевич (ИЯИ РАН)

"Исследование осцилляций нейтрино ..

ИЯИ РАН-01.04.2022 33 / 40



 ${}^{40}Ca(e,e')$  дифференциальные сечения как функции переданной энергии  $\omega$  в сравнении с результатами RDWIA+MEC+RES модели.

А. Буткевич (ИЯИ РАН)

"Исследование осцилляций нейтрино ..

ИЯИ РАН-01.04.2022 34 / 40



 $^{12}(e,e')$  и  $^{40}Ar(e,e')$  дифференциальные сечения как функции переданной энергии  $\omega$  в сравнении с результатами RDWIA+MEC+RES модели. При  $|\bar{q}|_{dip} < 250$  МэВ расчет на  $\sim 30\%$  переоценивает сечение в области минимума и согласуется с данными в пределах ошибок при  $|\bar{q}|_{dip} > 500$ . Эта оценка слабо зависит от начальной энергии электрона.

А. Буткевич (ИЯИ РАН)

35 / 40

## MicroBooNE CCQE сечения

\* Квази-упругий полуэксклюзивный процесс.

$$u_{\mu} + {}^{40}Ar \rightarrow \mu + p + B,$$

т.е.  $CC1p0\pi$  события, где регистрируются мюон с  $p_{\mu} > 100$  МэВ/с и только один протон с  $p_p > 300$  МэВ/с. Фон - нейтроны и пионы с импульсом  $p_{\pi} < 70$  МэВ оценивается из Монте Карло MicroBooNE Phys. Rev. Lett. 125, 201803 (2020).

- ★ Статистика 410 событий и систематическая ошибка 26%
- ★ Слабое взаимодействие ⇒ вклад аксиального тока.

Вклад аксиального тока отпереляется вектор-аксиальным форм-фактором

$$F_A(Q^2) = F_A(0)/(1+Q^2/M_A^2),$$

где аксиальная масса нуклона  $1 < M_A < 1.2$ ГэВ определяется из анализа данных MicroBooNE: arXiv:2110.14028, T2K: Phys. Rev. D103, 112008 (2021) \* Определение энергии нейтрино в  $CC1p0\pi$  событиях.

Калориметрический метод

$$E_{\nu}^{rec} = E_{\mu} + T_p + E_b,$$

где  $E_\mu, T_p$  энергия мюона и кинетическая энергия протона, а  $E_b = 40~{
m M}
m sB$  - энергия связи нуклона в ядре аргона.

Кинематический метод

$$E^{QE-\mu}_{
u}=f(E_{\mu},\cos heta_{\mu},E_b)$$
 и  $E^{QE-p}_{
u}=f(T_p,\cos heta_p,E_b)$ 

Условие отбора  $CC1p0\pi$  событий  $\Rightarrow E_{
u}^{rec} pprox E_{
u}^{QE-p} pprox E_{
u}^{QE-\mu}$ 



Интегрированные по спектру нейтрино  ${}^{40}Ar(\nu_{\mu},\mu p)$  сечения как функции угла рассеяния мюона (левый рисунок) и импульса мюона (правый рисунок) в сравнении с результатами RDWIA модели A.Butkevich, PRC 105, 025501 (2022), вычисленными для значений  $M_A = 1$  и 1.2 ГэВ. Представлены, также, инклюзиные сечения квазиупругого рассеяния нейтрино на аргоне.

А. Буткевич (ИЯИ РАН)



Интегрированные по спектру нейтрино  ${}^{40}Ar(\nu_{\mu},\mu p)$  сечение как функция импульса протона в сравнении с результатами RDWIA модели A.Butkevich, PRC 105, 025501 (2022), вычисленными для значений  $M_A = 1$  и 1.2 ГэВ.

А. Буткевич (ИЯИ РАН)

"Исследование осцилляций нейтрино ..

ИЯИ РАН-01.04.2022

38 / 40

\* Квази-упругий полуэксклюзивный процесс рассеяния нейтральным током NCE.

$$u_{\mu}+{}^{40}Ar 
ightarrow 
u_{\mu}+p+B$$
 ,

т.е.  $NCE1p0\pi$  взаимодействие, где регистрируется только один протон с  $p_p>300$  MэB/c.

 $\star$  Усредненное по спектру нейтрино NCE сечение  $d\sigma^{NCE}(p_p)/dp_p$  чувствительно к матричному элементу  $|U_{s4}|$ , т. к.

 $P^{NC}(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{s}) \approx 1 - 4|U_{\mu4}|^{2}|U_{s4}|^{2}\sin^{2}\Delta \equiv 1 - \sin^{2}(2\theta_{\mu\mu})\sin^{2}\Delta$ 

## Заключение

- иерархия масс нормальная (NH) ( $1\sigma$  NOvA) и T2K
- угол  $heta_{23} > \pi/4$  (1.6 $\sigma$  NOvA) и T2K.
- Фаза нарушения СР-инвариантности  $\delta_{CP} \neq [0,\pi]$  (2 $\sigma$  T2K).
- Возможное компромиссное решение IH и  $\delta_{CP}pprox 3\pi/2.$
- Вопрос об иерархии масс и о нарушении СР-инвариантности остается открытым.

### Complementarity

	DUNE	Hyper-K
Baseline	1300km → Large matter effect (Good for Mass Ordering determination)	295km $\Rightarrow$ Small matter effect (Smaller effect of matter density uncertainty in $\delta_{CP}$ )
Beam energy	~ Multi-GeV	~ Sub-GeV
Detector technology	Liq. Ar TPC	Water Cherenkov

- ✓ We would like to be convinced the CP violation by the consistent results from these 2 experiments with very different systematics.
- We hope that these 2 experiments will carry out the experiments in a similar timeline.
- r) В эксперименте MicroBooNE не наблюдается избытка  $u_e$  событий с  $E_e < 500$  МэВ.

40 / 40