

Оценка чувствительности эксперимента JUNO к параметрам нейтринных осцилляций с помощью атмосферных нейтрино

Выступающий: Н.С. Бессонов

Научный руководитель: д.ф.-м.н. А.Г. Ольшевский

Научный консультант: к.ф.-м.н. М.О. Гончар

Физический Факультет
МГУ им. М.В. Ломоносова

Москва, 2024

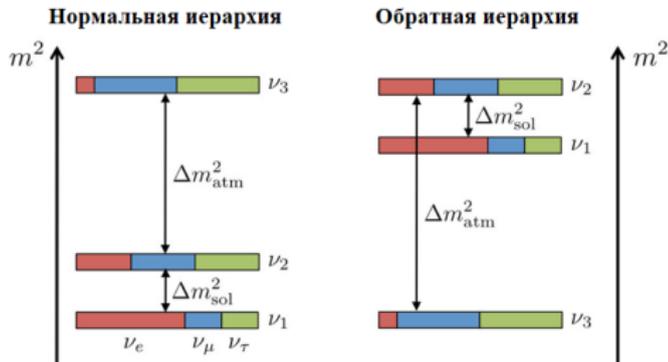
Нейтринные осцилляции

PMNS-матрица:

$$\begin{pmatrix} V_{e1}^* & V_{e2}^* & V_{e3}^* \\ V_{\mu 1}^* & V_{\mu 2}^* & V_{\mu 3}^* \\ V_{\tau 1}^* & V_{\tau 2}^* & V_{\tau 3}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Параметры, от которых зависят осцилляции:

- Разности квадратов масс: Δm_{21}^2 , Δm_{32}^2 (знак Δm_{32}^2 — иерархия масс).
- Углы смешивания: θ_{12} , θ_{13} , θ_{23} , δ_{CP} .



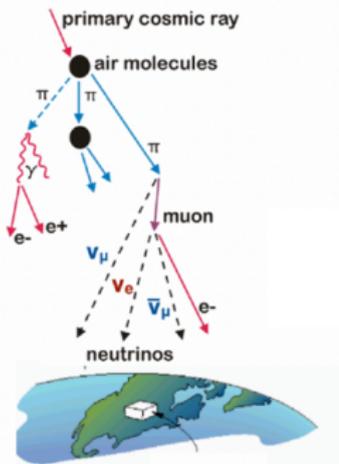
Цель работы: провести оценку чувствительности эксперимента JUNO к иерархии масс, октанту угла θ_{23} и параметрам осцилляций $|\Delta m_{32}^2|$, $\sin^2 \theta_{23}$ и δ_{CP} с помощью атмосферных нейтрино.

Задачи исследования:

- Ознакомиться с литературой и публикациями по теме.
- Написать программу расчёта ожидаемого числа событий нейтрино в GNA.
- Провести статистический анализ для определения чувствительности к параметрам осцилляций.
- Интерпретация полученных результатов.

Атмосферные нейтрино

- Рождаются при взаимодействии космических лучей с веществом атмосферы Земли.
- При интересующих нас энергиях доминируют π/K -нейтрино (реакции записаны в таблице).



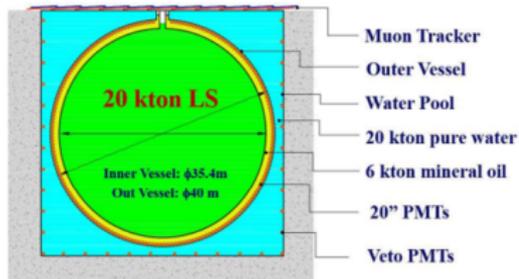
π/K -нейтрино	
Мода распада	Вероятность
μ^\pm	$e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$ $\approx 100\%$
π^\pm	$\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ $\approx 100\%$
K^\pm	$\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ 63.44 % $\pi^0 + \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ 3.353 % $\pi^0 + e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e)$ 5.07 % $\pi^\pm + \pi^0$ 20.66 %
K_L^0	$\pi^\pm + \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$ 27.04 % $\pi^\pm + e^\mp + \bar{\nu}_e(\nu_e)$ 40.55 %
K_S^0	$\pi^+ + \pi^-$ 69.20 % $\pi^\pm + \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$ $4.66 \cdot 10^{-4}$

D/Λ_c -нейтрино		
	Мода распада	Вероятность
D^\pm	$\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + X$	17.6 %
D^0, \bar{D}^0	$\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + X$	6.7 %
D_s^\pm	$e^\pm + X$	6.5 %
Λ_c^+	$\Lambda + \mu^+ + \nu_\mu$ $\Lambda + e^+ + \nu_e$	$2.0 \pm 0.7\%$ $2.1 \pm 0.6\%$

Эксперимент JUNO

- Основная цель эксперимента — определение иерархии масс нейтрино.
- 20 килотонн жидкого сцинтиллятора.
- Радиус 17 метров, расположен в 700 метрах под землёй.

Схема эксперимента



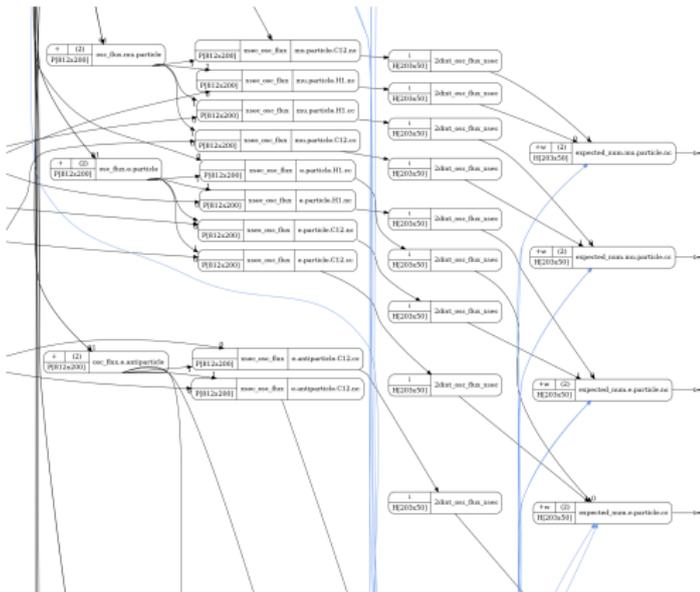
Местоположение детектора



Global Neutrino Analysis (GNA)

Global Neutrino Analysis — программный комплекс для проведения анализа данных нейтринных экспериментов.

- Функции-трансформации для всех расчётов, реализованные с помощью C++ и CERN ROOT.
- Графовая структура. Объединение трансформаций в граф производится с помощью языка Python.
- Функции для проведения статистического анализа.

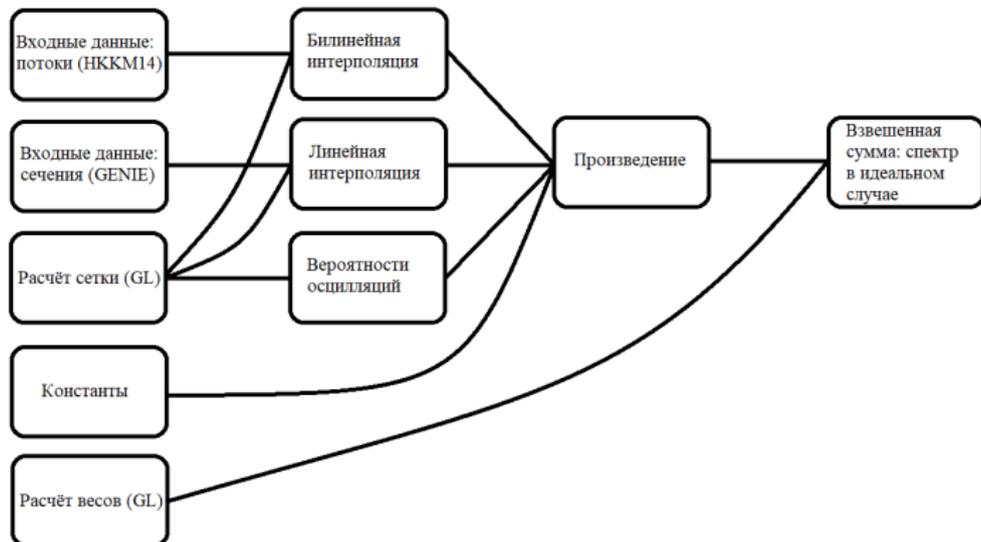


Модель эксперимента JUNO в GNA

$$N_{ftc} = 2\pi MT \sum_{l=e,\mu} \int_{E_i}^{E_{i+1}} dE \int_{\cos\theta_j}^{\cos\theta_{j+1}} d\cos(\theta) \sigma_{ftc}(E) \times \\ \times \Phi_{lt}^0(E, \cos\theta) P_{lft}(E, \cos\theta)$$

- Интервал энергий [200 МэВ, 20 ГэВ] разбивается на 399 интервалов $[E_i, E_{i+1}]$, интервал косинусов зенитного угла $[-1, 1]$ разбивается на 100 интервалов $[\cos\theta_j, \cos\theta_{j+1}]$.
- Индексы: l — флейвор в начальном состоянии, f — в конечном, t — тип частицы, c — ток.
- M — масса жидкого сцинтиллятора, T — время экспозиции, σ — сечение взаимодействия, Φ^0 — поток до осцилляций, P — вероятности осцилляций.

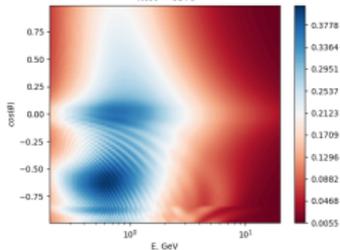
Расчёт спектра в идеальном случае



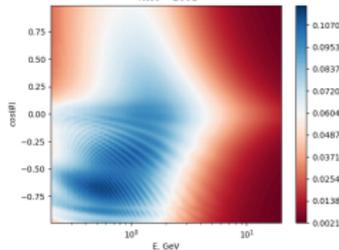
$$\text{GL} : \int_{E_i}^{E_{i+1}} dE \int_{\cos \theta_j}^{\cos \theta_{j+1}} d \cos(\theta) f(E, \cos \theta) = \sum_{w=1}^n \sum_{v=1}^m \omega_w \omega_v f(E_w, \cos \theta_v)$$

Гистограммы ожидаемого числа событий (NO)

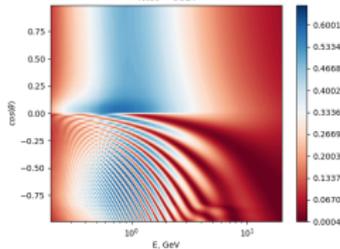
Expected numbers of ν_e events, CC, fine binning, NO
Ntot = 6379



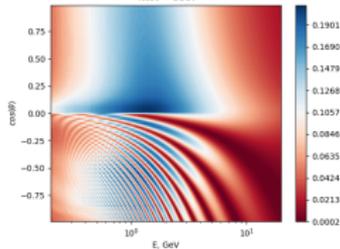
Expected numbers of $\bar{\nu}_e$ events, CC, fine binning, NO
Ntot = 2061



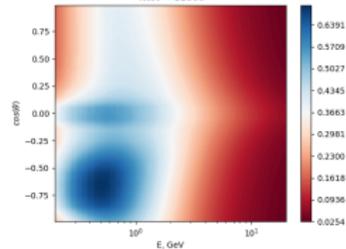
Expected numbers of ν_e events, CC, fine binning, NO
Ntot = 9327



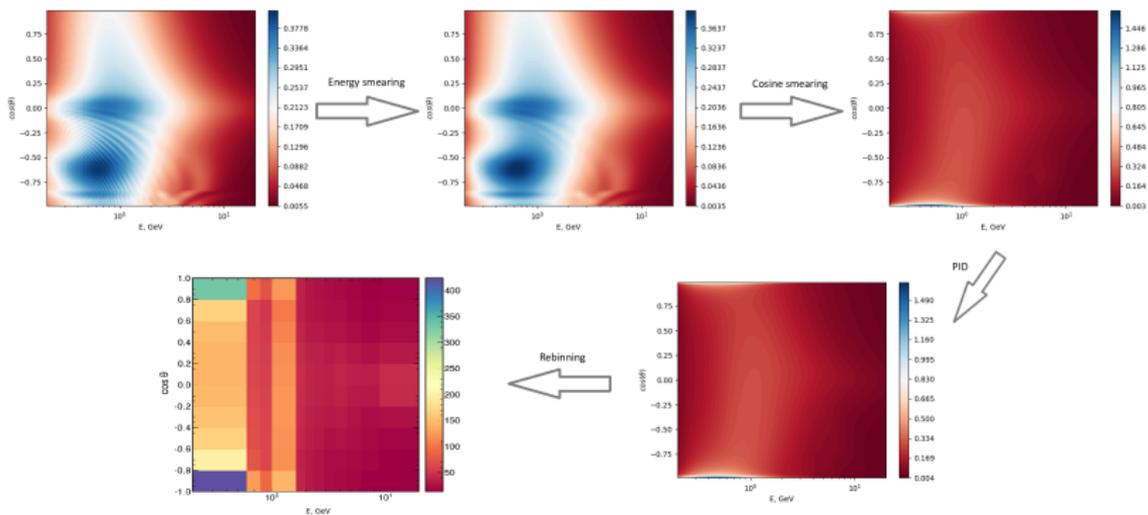
Expected numbers of $\bar{\nu}_e$ events, CC, fine binning, NO
Ntot = 3367



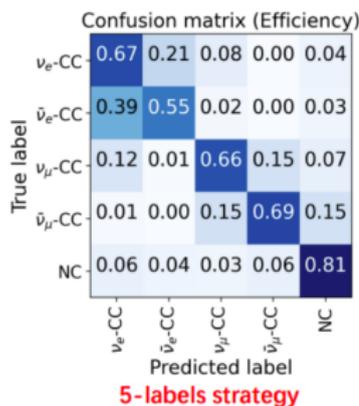
Expected NC events, fine binning
Ntot = 11560



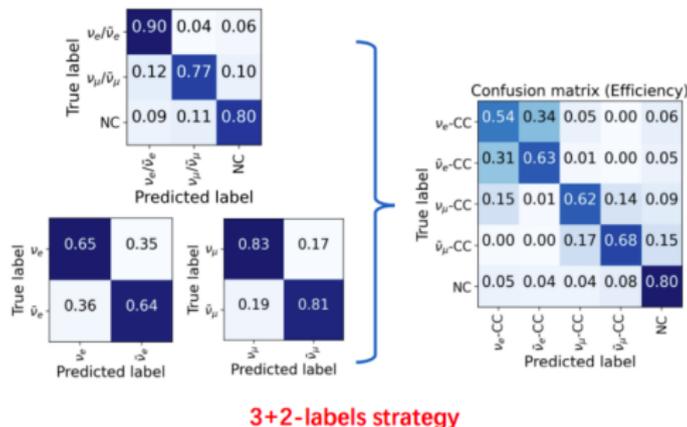
Расчёт итогового спектра (на примере электронных нейтрино)



Пусть $M_{\alpha\beta}$ — матрица запутывания, N^β — спектр без учёта PID.
 Тогда спектр с учётом PID: $\tilde{N}^\alpha = \sum_\beta N^\beta M_{\beta\alpha}$.



JUNO-docDB-10954



Для всех биннингов кроме fine,

$\cos \theta$: $[-1, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0]$. Энергия в единицах ГэВ.

- fine. E: `logspace(0.2, 20, 400)`; $\cos \theta$: `linspace(-1, 1, 101)`
- B1. E:
 ν_e : $[0.2, 1.65, 2.0, 2.4, 2.95, 3.6, 4.7, 6.3, 9.0, 20.0]$
 $\bar{\nu}_e$: $[0.2, 1.15, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.95, 2.1, 2.3, 2.5, 2.7, 3.0, 3.4, 3.9, 4.6, 5.7, 7.7, 20.0]$
 ν_μ : $[0.2, 1.05, 1.25, 1.4, 1.55, 1.7, 1.9, 2.1, 2.3, 2.6, 3.0, 3.5, 4.2, 5.2, 20.0]$
 $\bar{\nu}_\mu$: $[0.2, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.7, 1.9, 2.1, 2.3, 2.6, 3.0, 3.5, 20.0]$
- B2. E: $[0.2, 0.6, 0.8, 1.0, 1.35, 1.75, 2.2, 3.0, 4.6, 20.0]$
- B3. E:
 ν_e : $[0.2, 0.6, 0.8, 1.0, 1.65, 2.0, 2.4, 2.95, 3.6, 4.7, 6.3, 9.0, 20.0]$
 $\bar{\nu}_e$: $[0.2, 0.6, 0.8, 1.15, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.95, 2.1, 2.3, 2.5, 2.7, 3.0, 3.4, 3.9, 4.6, 5.7, 7.7, 20.0]$
 ν_μ : $[0.2, 0.6, 0.8, 1.05, 1.25, 1.4, 1.55, 1.7, 1.9, 2.1, 2.3, 2.6, 3.0, 3.5, 4.2, 5.2, 20.0]$
 $\bar{\nu}_\mu$: $[0.2, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.7, 1.9, 2.1, 2.3, 2.6, 3.0, 3.5, 4.6, 20.0]$

Метод максимального правдоподобия

Функция правдоподобия:

$$P(\theta, \eta) = \frac{P(x|\mu(\theta, \eta))}{P(x|x)} N(\eta|\eta_0) = \prod_{i=1}^N \left[\left(\frac{\mu_i}{x_i} \right)^{x_i} e^{x_i - \mu_i} \right] \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma_j^2)^K}} \prod_{j=1}^K e^{-\frac{(\eta_j - \eta_{j,0})^2}{2\sigma_j^2}}$$

Максимизация функции правдоподобия равносильна минимизации функции $\chi^2 = -2 \ln P(\theta, \eta)$. Две используемые статистики (для случаев с учётом систематики и без учёта):

$$\chi_{\text{stat. only}}^2 = 2 \sum_{i=1}^{N_E} \sum_{j=1}^{N_{\cos \theta}} \left[N_{ij} \ln \left(\frac{N_{ij}}{T_{ij}} \right) + T_{ij} - N_{ij} \right]$$

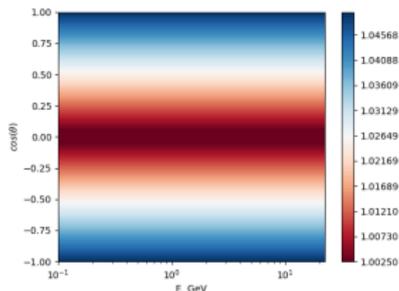
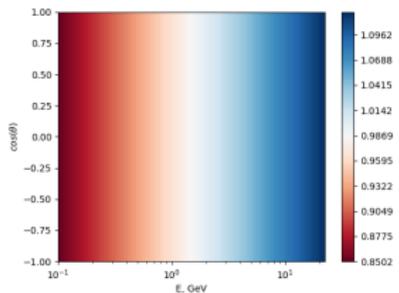
$$\chi_{\text{stat. + syst.}}^2 = 2 \sum_{i=1}^{N_E} \sum_{j=1}^{N_{\cos \theta}} \left[N_{ij} \ln \left(\frac{N_{ij}}{\tilde{T}_{ij}} \right) + \tilde{T}_{ij} - N_{ij} \right] + \sum_{k=1}^K \xi_k^2$$

$$\xi_k = \frac{\eta_k - \eta_{k,0}}{\sigma_k}, \quad \tilde{T}_{ij} = T_{ij} \left(1 + \sum_{k=1}^K \pi_{ij}^k \xi_k \right)$$

Таблица параметров, учитывающих систематические неопределённости потоков и сечений взаимодействия

Неопределённости потока	σ	π_{ij}
Общая нормировка	20%	20%
Зависимость от энергии	5%	$5\% \times \ln \frac{E_\nu}{E_0}$
Зависимость от зенитного угла	5%	$5\% \times \cos \theta $
$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu / \nu_e + \bar{\nu}_e$	2%	$\pm 1\%$
$\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$	5%	$\pm 2.5\%$
$\nu_e / \bar{\nu}_e$	5%	$\pm 2.5\%$
Неопределённости сечения	σ	π_{ij}
Общая нормировка	10%	10%

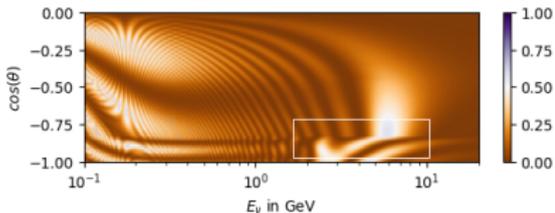
Отношение потоков при изменении параметров зависимости от энергии и зенитного угла на 1σ



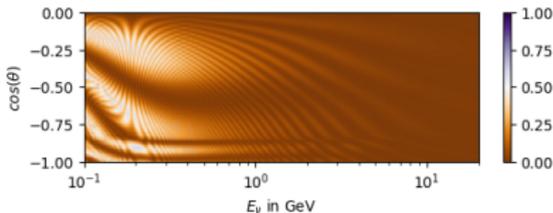
Чувствительность к иерархии масс

Зависимости вероятностей осцилляций от энергии нейтрино и зенитного угла при нормальной (слева) и обратной (справа) иерархии. Прямоугольником выделена область, ответственная за чувствительность JUNO к иерархии масс.

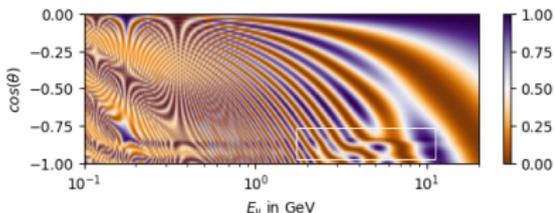
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu), \text{ NO}$$



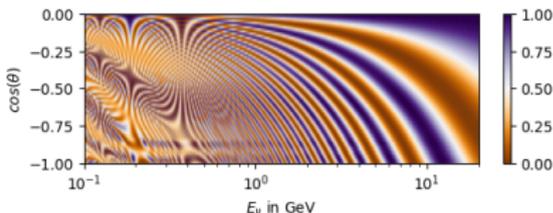
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu), \text{ IO}$$



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu), \text{ NO}$$

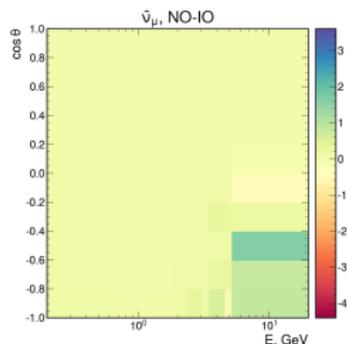
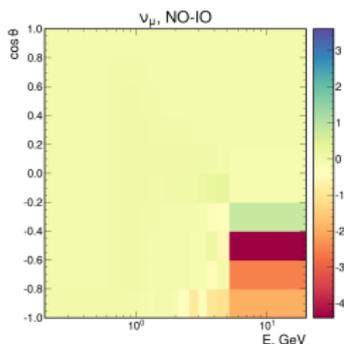
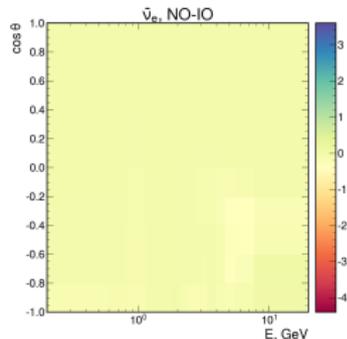
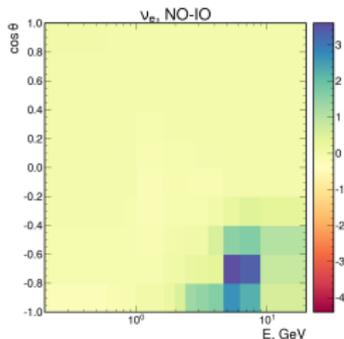


$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu), \text{ IO}$$



Чувствительность к иерархии масс

Разности чисел событий между нормальной и обратной иерархиями для 4-х каналов: $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$.

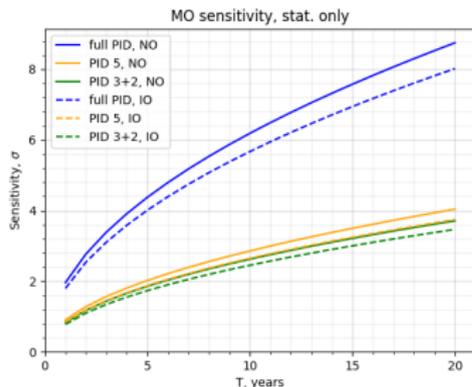


Чувствительность к иерархии масс: влияние PID

$$\text{NO: } N\sigma = \sqrt{\min \chi_{\text{IO}}^2 - \min \chi_{\text{NO}}^2}, \quad \text{IO: } N\sigma = \sqrt{\min \chi_{\text{NO}}^2 - \min \chi_{\text{IO}}^2}$$

Зависимость чувствительности JUNO к иерархии масс от времени работы эксперимента (применяются все эффекты детектора). Параметры осцилляций, использующиеся в подгонке: $(\sin^2\theta_{23}, \Delta m_{32}^2, \delta_{CP})$.

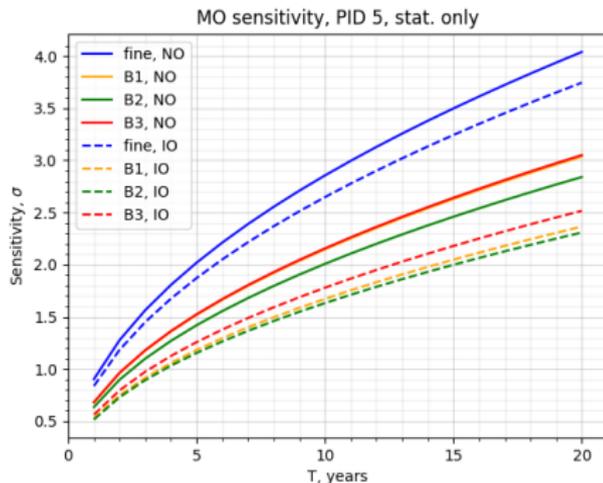
- Рассмотрены варианты NO и IO для случаев: точной идентификации частиц, стратегии PID 3+2 и PID 5.
- Для $T = 6$ лет чувствительность, оценённая без учёта и с учетом PID, уменьшается с $\sim 5\sigma$ до $\sim 2\sigma$.
- PID 5 лучше, чем PID 3+2.
- Алгоритмы PID существенно влияют на чувствительность.



Чувствительность к иерархии масс: влияние биннинга

Зависимость чувствительности JUNO к иерархии масс от времени работы эксперимента (применены все эффекты детектора и PID 5).

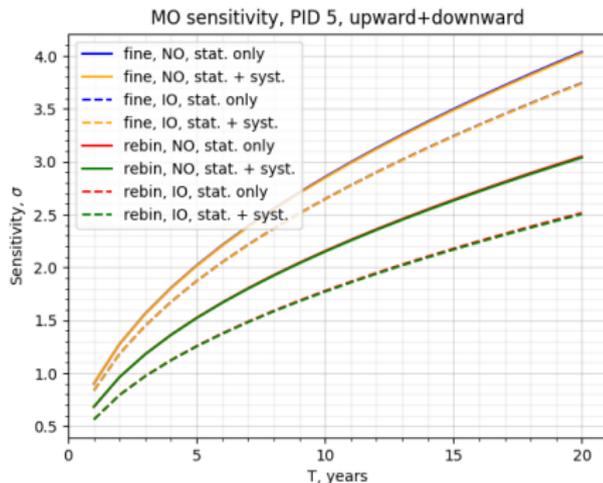
- Рассмотрены варианты NO и IO для случаев: "точный" (fine) биннинг, B1, B2 и B3.
- Ребиннинг значительно ухудшает чувствительность.
- Нужно использовать безбиновую функцию правдоподобия для обработки данных.



Чувствительность к иерархии масс: ВЛИЯНИЕ СИСТЕМАТИКИ

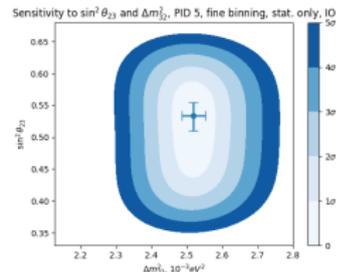
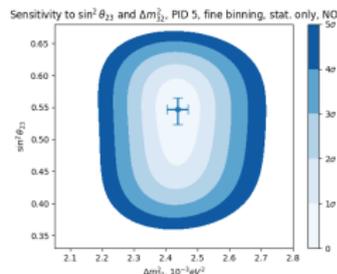
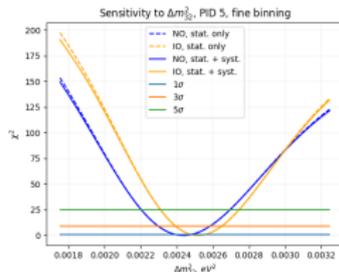
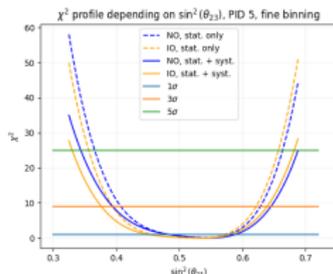
Зависимость чувствительности JUNO к иерархии масс от времени работы эксперимента (применены все эффекты детектора и PID 5).

- Рассмотрены варианты NO и IO для случаев: “точного” биннинга и ребиннинга ВЗ с учётом и без учёта систематических неопределённостей потоков и сечений.
- Используемые параметры систематики практически не влияют на чувствительность.
- **Итоговая чувствительность** — около 2σ за 6 лет.



Чувствительность к параметрам Δm_{32}^2 и $\sin^2 \theta_{23}$

- Время набора данных — 10 лет.
- Профили χ^2 и контуры показывают ограничения на параметры осцилляций.
- На графике с контурами также отмечены ошибки из PDG.
- JUNO не сможет определить параметры Δm_{32}^2 и $\sin^2 \theta_{23}$ с точностью большей, чем они уже известны.

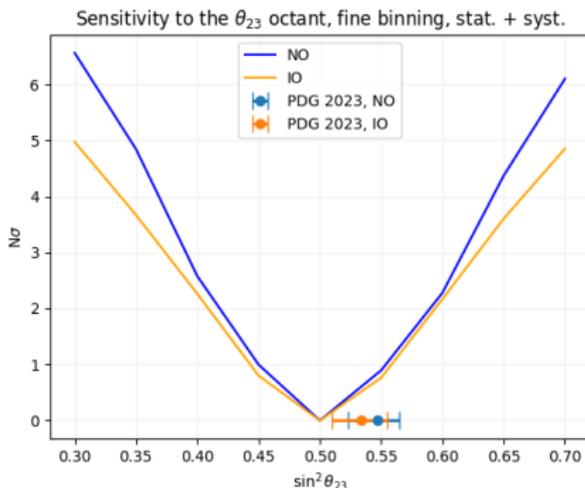


Чувствительность к октанту угла θ_{23}

$$N\sigma = \sqrt{\min_{\text{other octant}} \chi^2(\sin^2 \theta_{23}) - \min \chi^2(\sin^2 \theta_{23}^{\text{true}})}$$

Зависимость уровня достоверности, на котором можно исключить принадлежность угла θ_{23} другому октанту, от истинных значений $\sin^2 \theta_{23}$.

- Также на графике отмечены значения из PDG 2023 с ошибками на уровне 1σ .
- Время набора данных — 10 лет.
- При значениях параметра $\sin^2 \theta_{23}$ в интервале $\pm 1\sigma$ из PDG 2023, чувствительность к октанту угла θ_{23} составляет от $\sim 0.2\sigma$ до $\sim 1.2\sigma$.

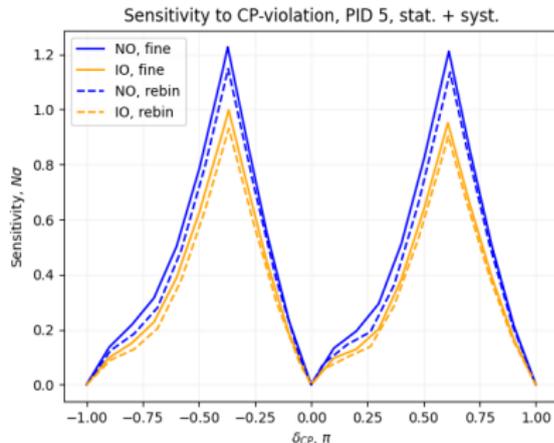


Чувствительность к CP-нарушению в лептонном секторе

$$N\sigma = \min \left(\sqrt{\min \chi^2(0) - \min \chi^2(\delta_{CP})}, \sqrt{\min \chi^2(\pi) - \min \chi^2(\delta_{CP})} \right)$$

Зависимость уровня достоверности, на котором можно исключить гипотезу нарушения CP-инвариантности, от истинных значений δ_{CP} .

- Отсутствию нарушения CP-инвариантности соответствуют два значения δ_{CP} : 0 и π .
- Время набора данных — 10 лет.
- Чувствительность к нарушению CP-инвариантности в лептонном секторе составит не более $\sim 1.2\sigma$ за 10 лет.



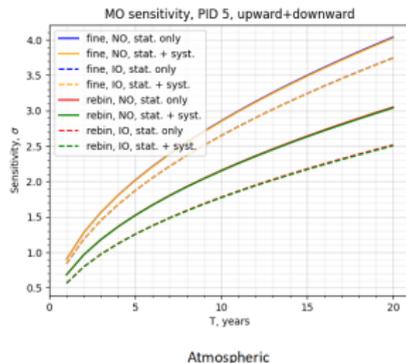
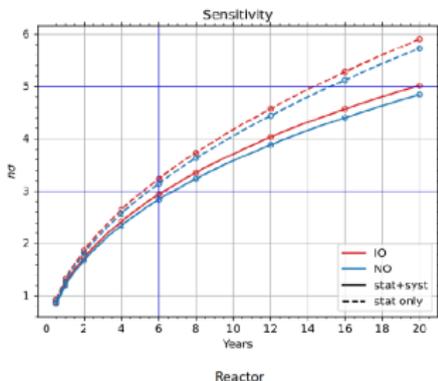
Выводы:

- Был написан модуль для анализа атмосферных нейтрино в JUNO в программном комплексе GNA.
- Была проведена оценка чувствительности эксперимента JUNO к параметрам осцилляций.
- JUNO обладает чувствительностью к параметрам осцилляций $\sin^2 \theta_{23}$ и Δm_{32}^2 , однако не сможет определить их с точностью большей, чем они уже известны.
- Чувствительность к нарушению CP-инвариантности в лептонном секторе составит не более $\sim 1.2\sigma$ за 10 лет.
- При значениях параметра $\sin^2 \theta_{23}$ в интервале $\pm 1\sigma$ из PDG 2023, чувствительность к октанту угла θ_{23} составляет от $\sim 0.2\sigma$ до $\sim 1.2\sigma$.
- С помощью одних только атмосферных нейтрино JUNO сможет определить иерархию масс с достоверностью $\sim 2\sigma$ за 6 лет.

Выводы и перспективы

Перспективы:

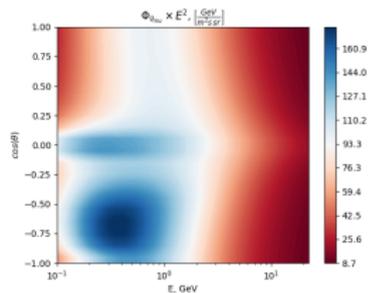
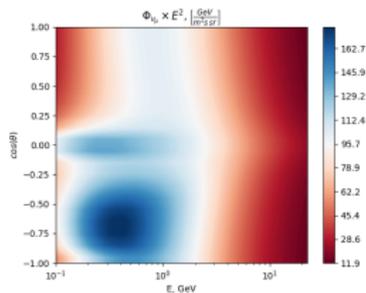
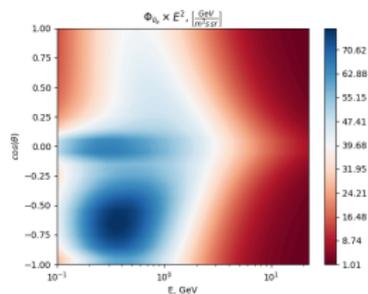
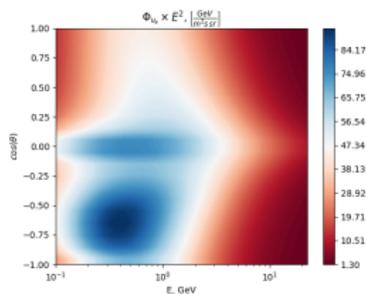
- В качестве задач на будущее, нужно добавить неучтённые эффекты (тау-нейтрино, неопределённость в разрешении, осцилляции в атмосфере).
- Также планируется проведение совместного (атмосферные + реакторные нейтрино) анализа чувствительности JUNO к иерархии масс, причём ожидается чувствительность $n_{\text{joint}} > \sqrt{n_{\text{atm}}^2 + n_{\text{react}}^2}$.



Спасибо за внимание!

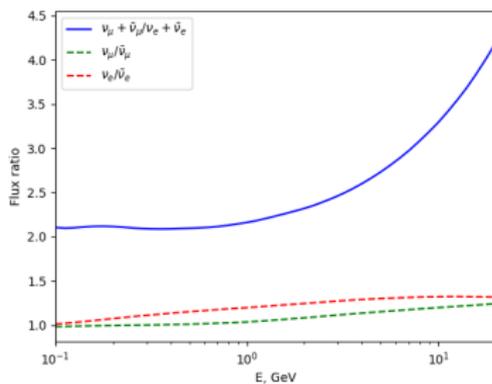
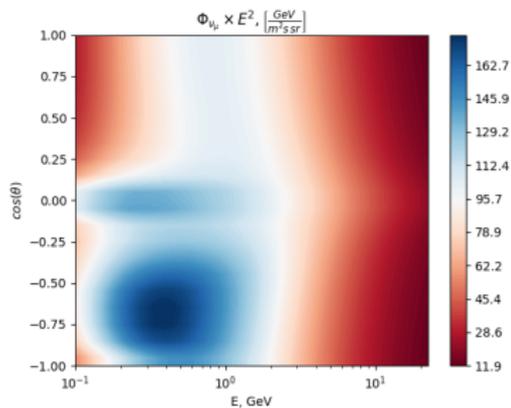
Приложение

Входные данные: потоки (HKKM14, JUNO solmin)



Атмосферные нейтрино

Поток мюонных нейтрино, умноженный на E^2 Отношение потоков нейтрино



Используемые параметры осцилляций (PDG 2023)

$$\sin^2(\theta_{12}) = 0.307 \pm 0.013$$

$$\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(\theta_{23}) = 0.534^{+0.021}_{-0.024} \quad (\text{Inverted order})$$

$$\sin^2(\theta_{23}) = 0.547^{+0.018}_{-0.024} \quad (\text{Normal order})$$

$$\Delta m_{32}^2 = (-2.519 \pm 0.033) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (\text{Inverted order})$$

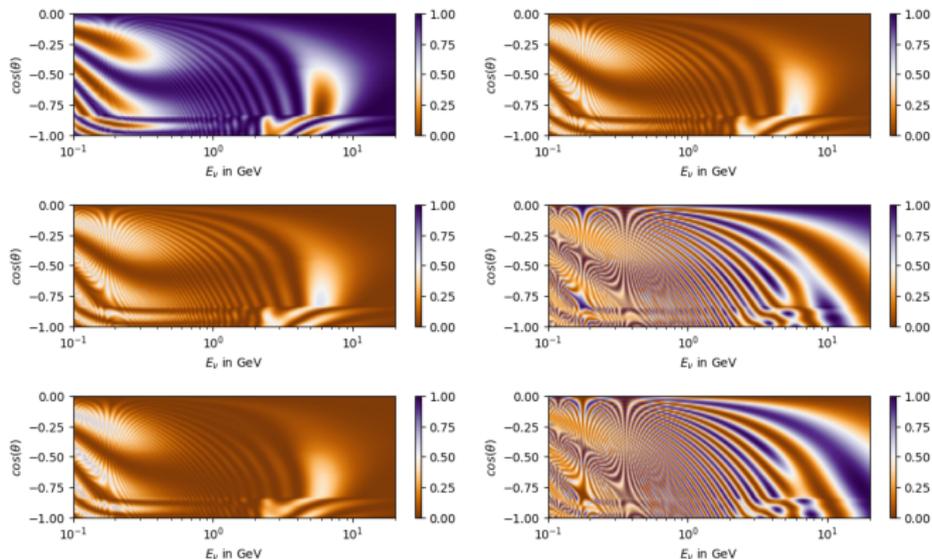
$$\Delta m_{32}^2 = (2.437 \pm 0.033) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (\text{Normal order})$$

$$\sin^2(\theta_{13}) = (2.20 \pm 0.07) \times 10^{-2}$$

$$\delta, \text{ CP violating phase} = 1.23 \pm 0.21 \pi \text{ rad} \quad (S = 1.3)$$

Осцилляции в веществе Земли (NO)

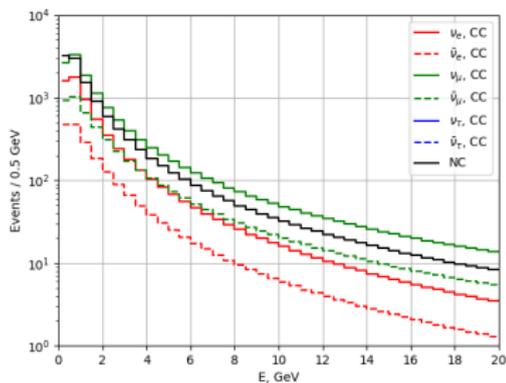
$$P(\nu_i \rightarrow \nu_f)$$



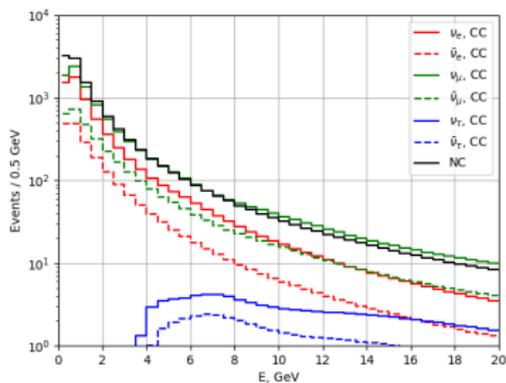
Слева $\nu_i = \nu_e$, справа $\nu_i = \nu_\mu$. ν_f сверху вниз - ν_e, ν_μ и ν_τ соответственно

Расчитанные гистограммы спектров

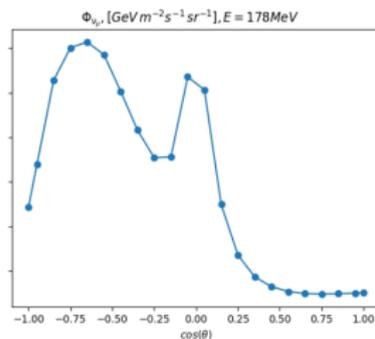
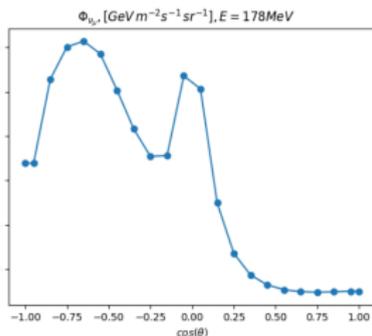
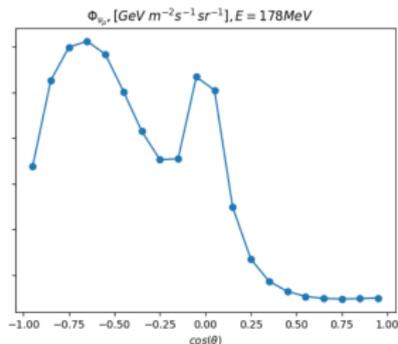
Без осцилляций



С осцилляциями



Тактики предварительной экстраполяции ПОТОКОВ



Тактики предварительной экстраполяции Потоков

2 тактики:

- Константная экстраполяция
- Линейная экстраполяция

Перенормировка потоков не проводилась, поскольку различие всего около 1% и нормировки потоков учтены как систематики

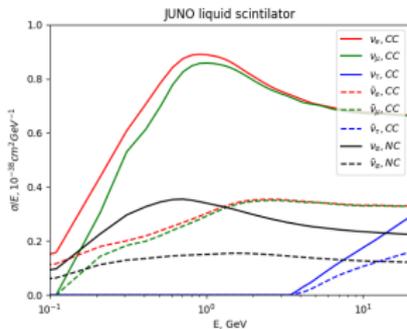
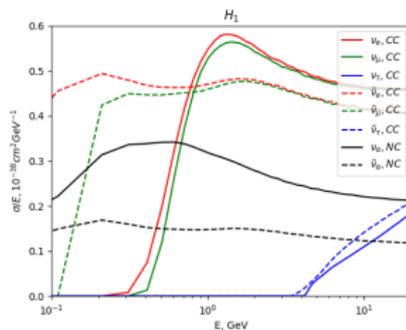
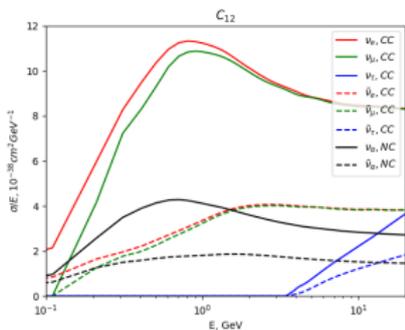
Линейная

	e	μ
particle	6493	12872
antiparticle	2008	4688

Константная

	e	μ
particle	6500	12880
antiparticle	2009	4691

Входные данные: сечения (Genie)



Сравнение OscProb и Magnus

- Различие в ожидаемом числе событий между OscProb и Magnus - менее 1%
- OscProb примерно в ~ 10 раз быстрее, поэтому далее используется этот алгоритм

OscProb

	e	μ
particle	6379	9327
antiparticle	2061	3367

Magnus

	e	μ
particle	6385	9371
antiparticle	2061	3387

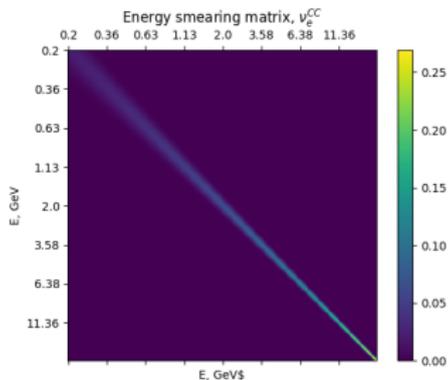
Формула для расчёта матрицы размытия

$$\begin{aligned} C_{kj} &= \frac{1}{\Delta_j^a} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j^2}} \int_{b_k}^{b_{k+1}} db \int_{a_j}^{a_{j+1}} da e^{-\frac{(a-b)^2}{2\sigma_j^2}} = \\ &= \frac{1}{2\Delta_j^a} \left[(b_{k+1} - a_j) \operatorname{erf} \left(\frac{b_{k+1} - a_j}{\sqrt{2\sigma_j^2}} \right) - (b_k - a_j) \operatorname{erf} \left(\frac{b_k - a_j}{\sqrt{2\sigma_j^2}} \right) - \right. \\ &\quad \left. - (b_{k+1} - a_{j+1}) \operatorname{erf} \left(\frac{b_{k+1} - a_{j+1}}{\sqrt{2\sigma_j^2}} \right) + (b_k - a_{j+1}) \operatorname{erf} \left(\frac{b_k - a_{j+1}}{\sqrt{2\sigma_j^2}} \right) \right] + \\ &\quad + \frac{\sigma_j}{\sqrt{2\pi}\Delta_j^a} \left[e^{-\frac{(b_{k+1}-a_j)^2}{2\sigma_j^2}} - e^{-\frac{(b_k-a_j)^2}{2\sigma_j^2}} - e^{-\frac{(b_{k+1}-a_{j+1})^2}{2\sigma_j^2}} + e^{-\frac{(b_k-a_{j+1})^2}{2\sigma_j^2}} \right] \end{aligned}$$

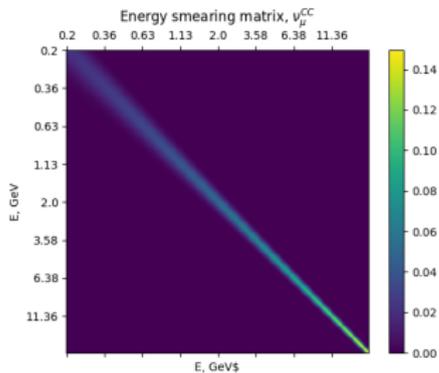
Матрицы размытия по энергии

$$\tilde{H} = C_E H$$

Матрица размытия
для электронного
флейвора



Матрица размытия
для мюонного
флейвора



Для фиксированной энергии: $\tilde{H} = HC_{\cos \theta}^T$

- Переход от биннинга по косинусу к биннингу по углу (\arccos)
- Зеркальное отражение гистограммы (чтобы границы бинов возрастали)
- Переход к расширенной гистограмме (чтобы не терялись события)
- Построение матрицы размытия для расширенной гистограммы
- Размытие
- Суммирование событий в бинах по углам, соответствующих одинаковым косинусам, и переход к гистограмме с бинами по косинусу
- Снова зеркальное отражение гистограммы

Всё это можно провести с помощью перемножения матриц:

$$\tilde{H} = HC_{\cos \theta}^T, C_{\cos \theta} = (MA\tilde{C}_{\cos \theta}^T LM)^T$$

$$\tilde{H} = HMA\tilde{C}_{\cos\theta}^T LM$$

Размерности матриц:

$$M(N \times N), A(N \times 3N), \tilde{C}_{\cos\theta}(3N \times 3N), L(3N \times N)$$

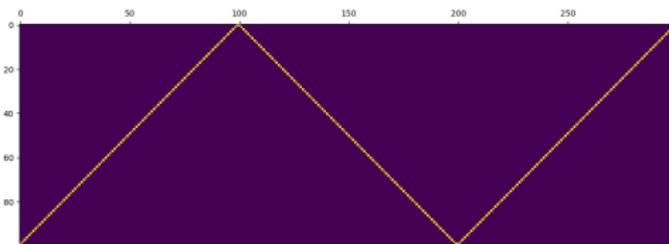
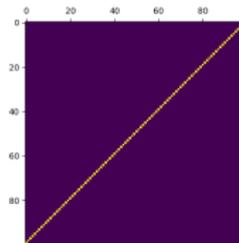
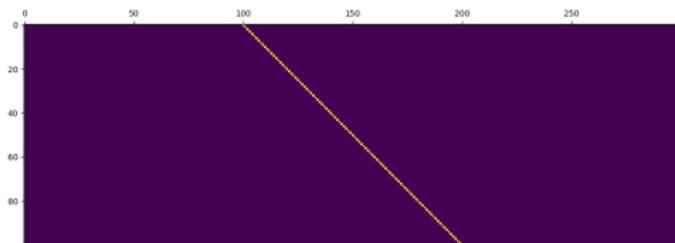
Формула для размытой по углу гистограммы:

$$\tilde{H} = HC_{\cos\theta}^T$$

Матрица размытия:

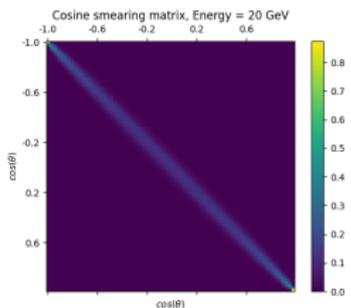
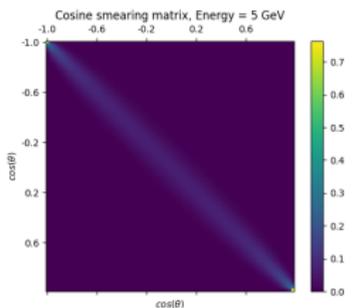
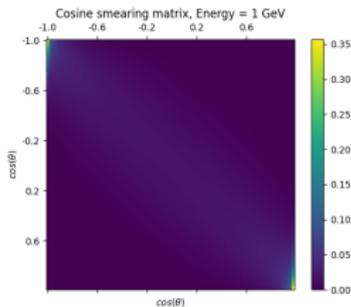
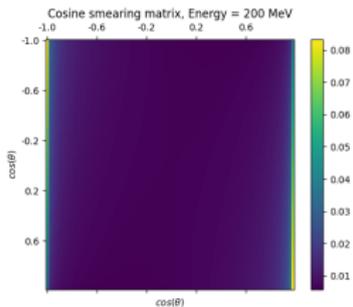
$$C_{\cos\theta} = (MA\tilde{C}_{\cos\theta}^T LM)^T$$

Матрицы A, L и M



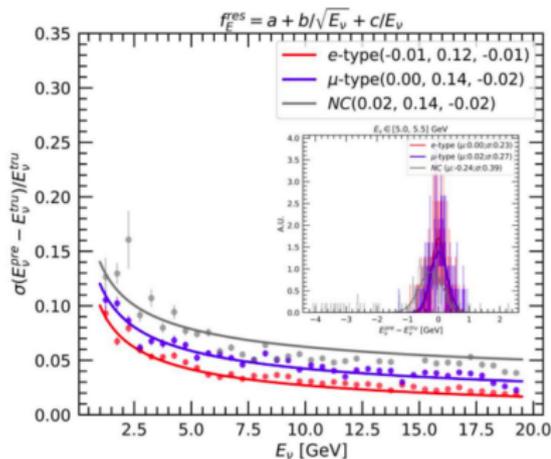
Сверху: слева - матрица A (расширение гистограммы), справа - матрица M (зеркальное отражение); снизу - транспонированная матрица L (суммирует события в соответствующих бинах и сворачивает гистограмму к исходному размеру)

Матрицы размытия по косинусу зенитного угла

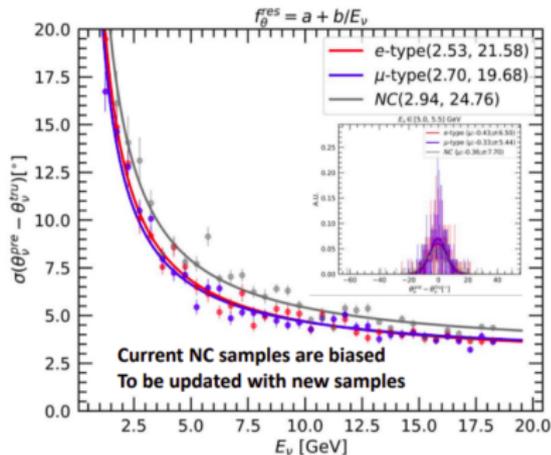


Учёт эффектов детектора: разрешение по энергии и по углу

Разрешение по энергии



Разрешение по углу



JUNO-docDB-11086

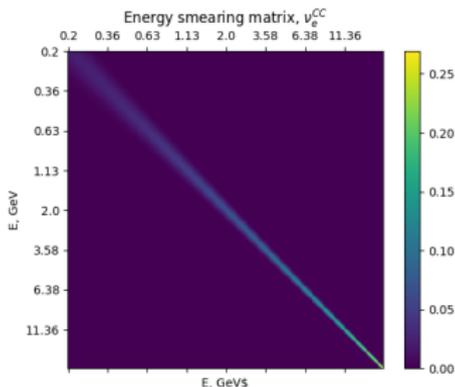
Эффекты детектора: размытие гистограмм

Размытие по энергии: $\tilde{H} = C_E H$.

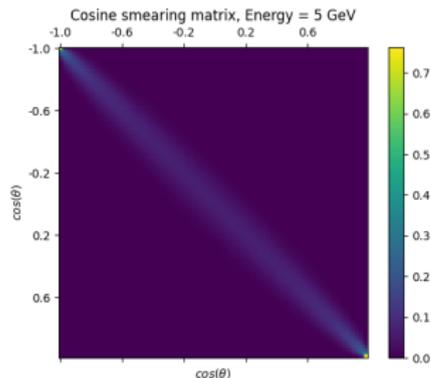
Размытие по косинусу зенитного угла при фиксированной энергии:

$\tilde{H} = H C_{\cos\theta}^T$, $C_{\cos\theta} = (M A \tilde{C}_{\cos\theta}^T L M)^T$ (подробнее — в приложении).

Матрица размытия по энергии
(для электронного флейвора,
 ν_e^{CC}).

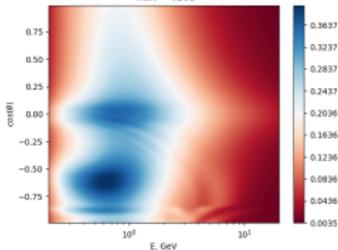


Матрица размытия по косинусу
зенитного угла ($E = 5$ ГэВ,
 ν_e^{CC}).

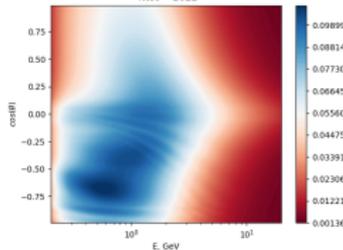


Гистограммы после применения размытия по энергии

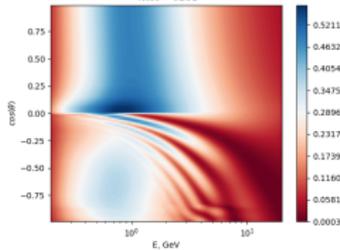
Expected numbers of ν_e events, CC, fine binning, NO
Ntot = 6281



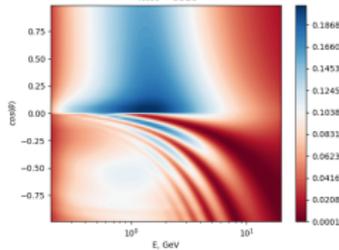
Expected numbers of $\bar{\nu}_e$ events, CC, fine binning, NO
Ntot = 2022



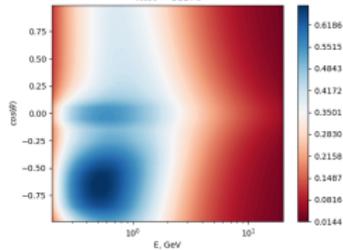
Expected numbers of ν_e events, CC, fine binning, NO
Ntot = 9201



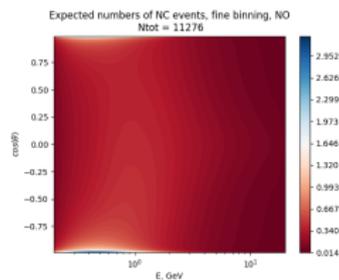
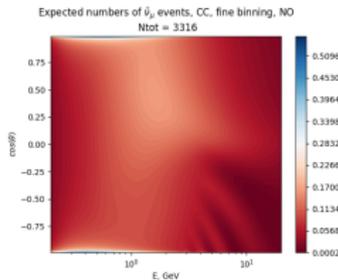
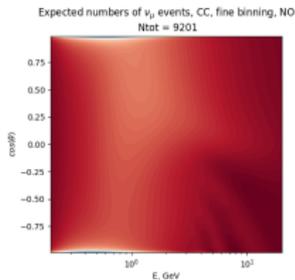
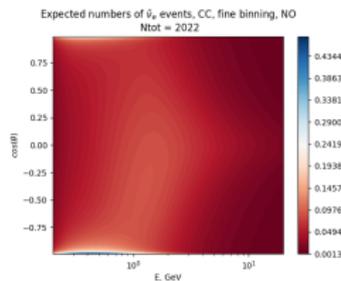
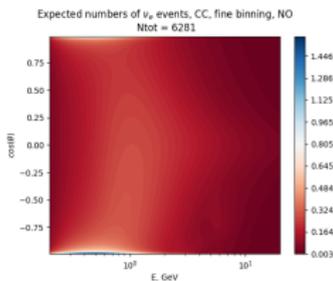
Expected numbers of $\bar{\nu}_e$ events, CC, fine binning, NO
Ntot = 3316



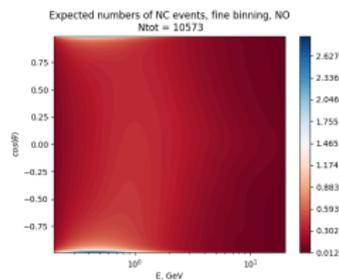
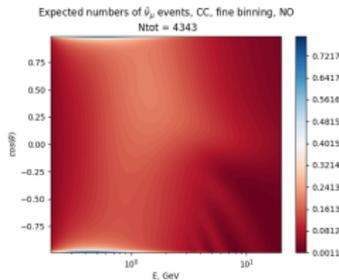
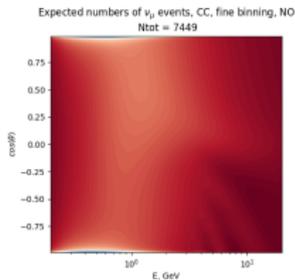
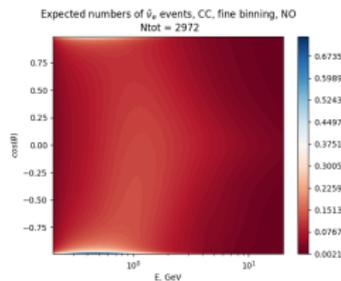
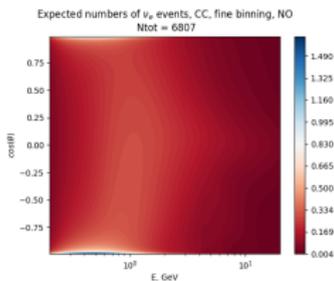
Expected numbers of NC events, fine binning
Ntot = 11276



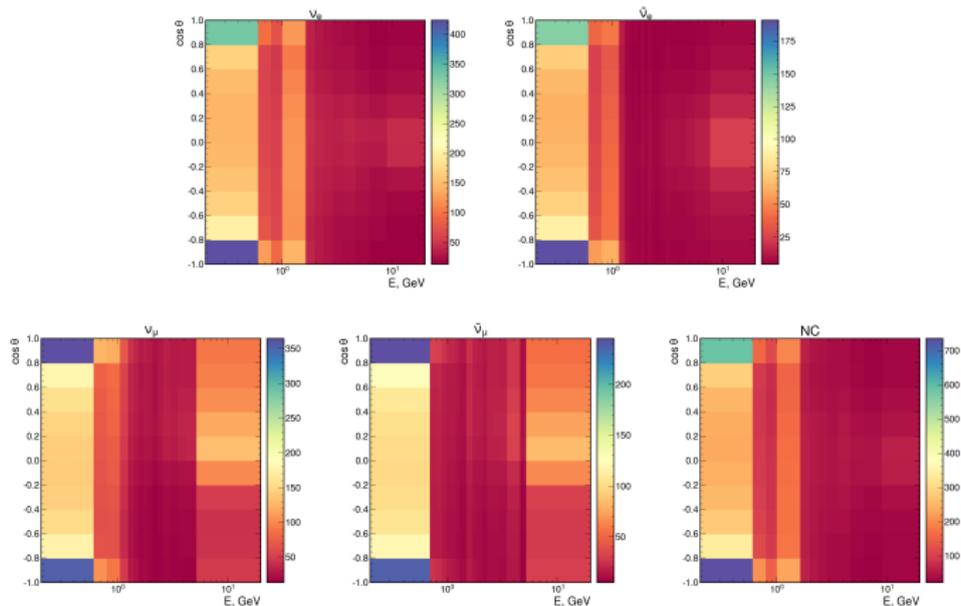
Гистограммы после применения размытия по энергии и углу



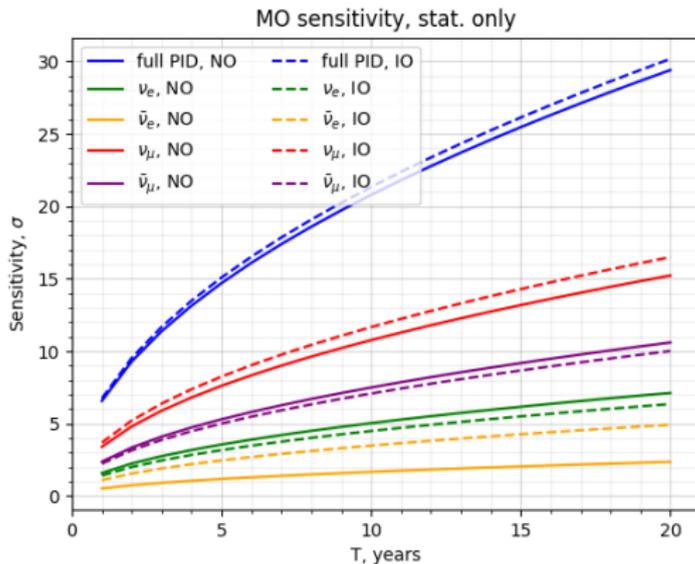
Гистограммы после применения эффектов детектора и PID 5



Гистограммы после ребиннинга (B3)



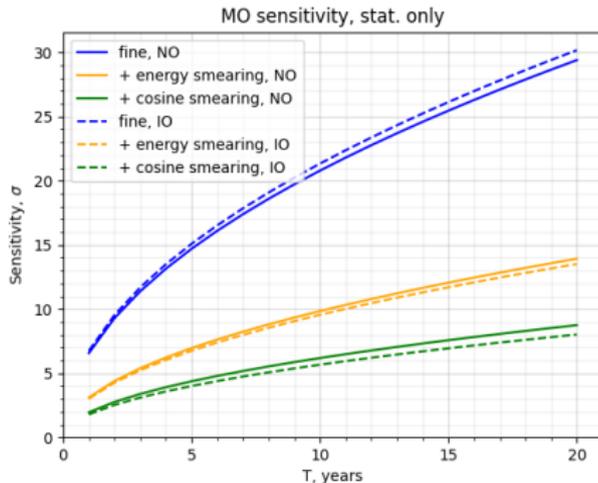
Чувствительность к иерархии масс: вклад разных каналов



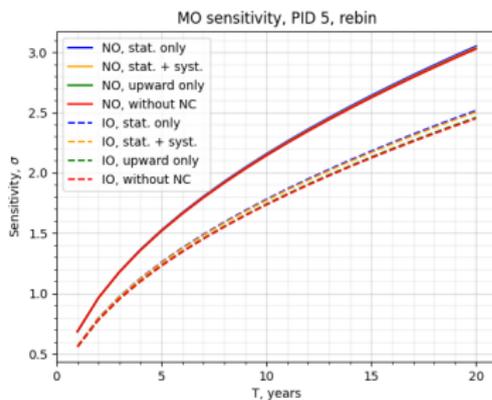
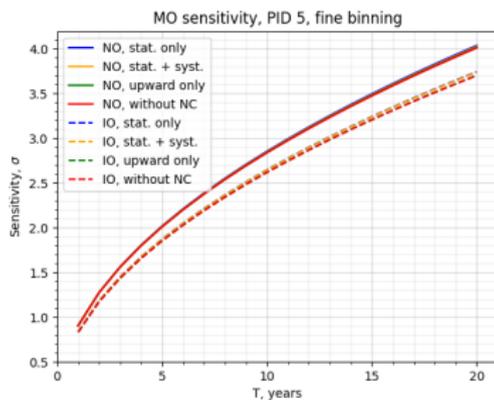
Чувствительность к иерархии масс: влияние эффектов детектора

$$\text{NO: } N\sigma = \sqrt{\min \chi_{\text{IO}}^2 - \min \chi_{\text{NO}}^2}, \quad \text{IO: } N\sigma = \sqrt{\min \chi_{\text{NO}}^2 - \min \chi_{\text{IO}}^2}$$

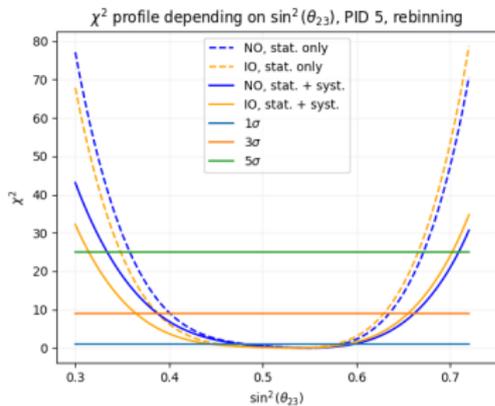
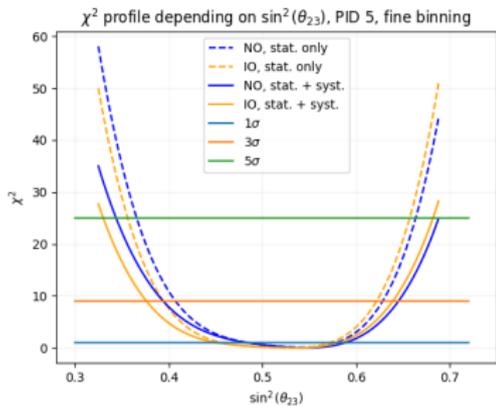
Зависимость чувствительности JUNO к иерархии масс от времени работы эксперимента в случае точной идентификации частиц (эффекты PID и систематики потоков и сечений не применялись). Рассмотрены варианты NO и IO для случаев: без эффектов детектора, только размытие по энергии и размытие по энергии и углу. Для 6 летней работы JUNO чувствительность, оценённая без учёта и с учетом размытия, уменьшается с $\sim 16\sigma$ до $\sim 5\sigma$.



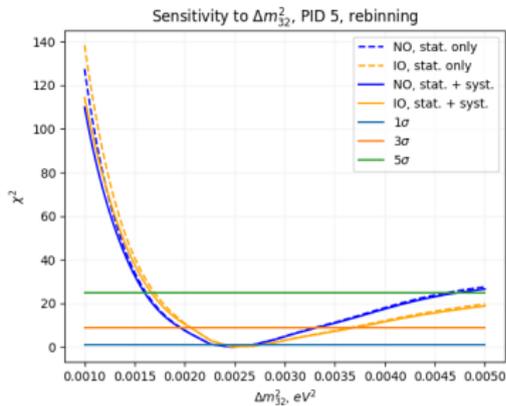
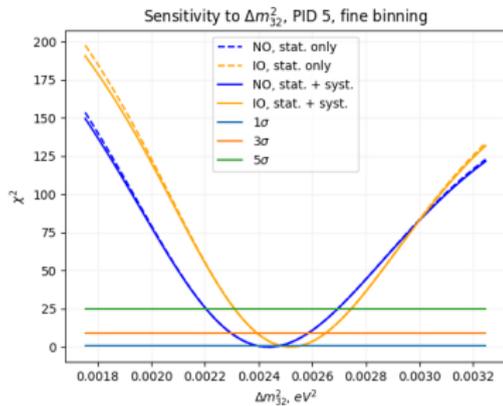
Чувствительность к иерархии масс: влияние downward-going нейтрино и событий NC



Чувствительность к параметру $\sin^2 \theta_{23}$

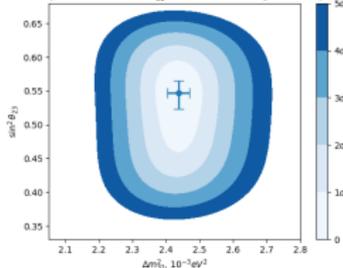


Чувствительность к параметру Δm_{32}^2

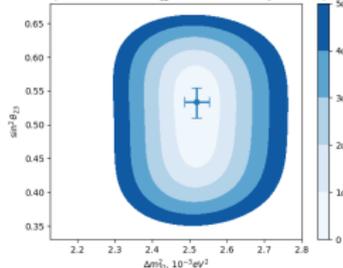


Контуры чувствительности к параметрам Δm_{32}^2 и $\sin^2 \theta_{23}$

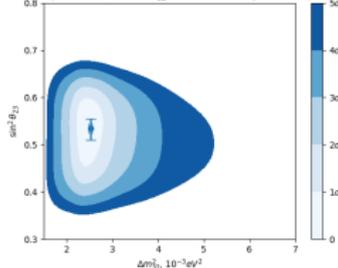
Sensitivity to $\sin^2 \theta_{23}$ and Δm_{32}^2 , PID 5, fine binning, stat. only, NO



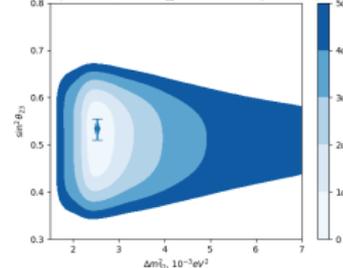
Sensitivity to $\sin^2 \theta_{23}$ and Δm_{32}^2 , PID 5, fine binning, stat. only, IO



Sensitivity to $\sin^2 \theta_{23}$ and Δm_{32}^2 , PID 5, rebinning, stat. only, NO



Sensitivity to $\sin^2 \theta_{23}$ and Δm_{32}^2 , PID 5, rebinning, stat. only, IO



Чувствительность к параметрам Δm_{32}^2 и $\sin^2 \theta_{23}$

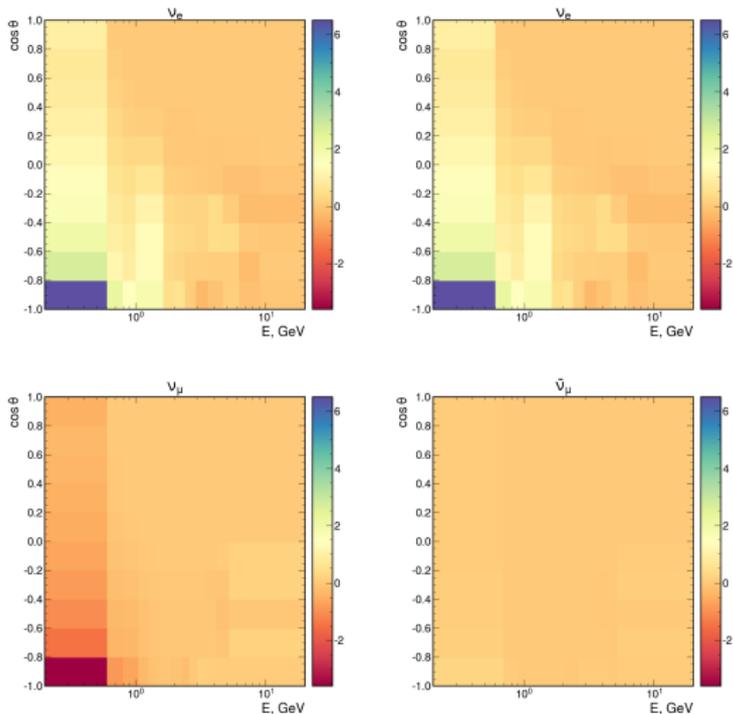
NO, 0.547	stat. only	stat. + syst.
fine	$0.547^{+0.045}_{-0.066}$	$0.547^{+0.055}_{-0.064}$
rebin	$0.547^{+0.049}_{-0.067}$	$0.547^{+0.066}_{-0.070}$

NO, 2.437	stat. only	stat. + syst.
fine	$2.437^{+0.068}_{-0.047}$	$2.437^{+0.068}_{-0.047}$
rebin	$2.44^{+0.25}_{-0.15}$	$2.44^{+0.25}_{-0.15}$

IO, 0.534	stat. only	stat. + syst.
fine	$0.534^{+0.051}_{-0.077}$	$0.534^{+0.062}_{-0.083}$
rebin	$0.534^{+0.057}_{-0.080}$	$0.534^{+0.072}_{-0.089}$

IO, 2.519	stat. only	stat. + syst.
fine	$2.519^{+0.060}_{-0.042}$	$2.519^{+0.060}_{-0.042}$
rebin	$2.52^{+0.25}_{-0.12}$	$2.52^{+0.25}_{-0.12}$

Чувствительность к параметру δ_{CP}



Чувствительность к параметру δ_{CP}

