

Статус и перспективы физики нейтрино

Российские проекты в глобальном контексте

Д. В. Наумов



Содержание

- Что мы знаем о нейтрино
- Неизвестно: упорядоченность масс
- Неизвестно: масса самого легкого нейтрино
- Масса самого легкого нейтрино: что дальше?
- Неизвестно: Дирак или Майорана?
- Неизвестно: CP-нарушение
- Неизвестно: возможная новая физика
- Флэйворная загадка
- Нейтрино как инструмент
- Российские проекты
- Образовательная онлайн программа “Физика нейтрино и астрофизика частиц”
- Итого

Что мы знаем о нейтрино



Нейтрино в Стандартной модели

- Нейтрино — фермион со спином $1/2$.
- Электрический заряд:
 - Теоретически равен нулю.
 - Экспериментально ограничен:
 - нейтральностью материи: $|q_\nu| < 10^{-21} e$.
 - на АЭС: $|q_\nu| < 10^{-12} e$.
- Нейтрино участвуют в слабом взаимодействии с обменом W^\pm, Z .
- Открыты три лептонных флэйвора (аромата):

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}.$$

- Измерение ширины $\Gamma(Z^0 \rightarrow \text{all})$ даёт $N_\nu = 2.984 \pm 0.008$.
- У нейтрино есть масса, но флэйворные состояния не совпадают с массовыми:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i V_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle.$$



Смешивание лептонов

Смешивание описывается матрицей Понтекорво-Маки-Накагавы-Саки (PMNS):

$$V = \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{e2} & V_{e3} \\ V_{\mu 1} & V_{\mu 2} & V_{\mu 3} \\ V_{\tau 1} & V_{\tau 2} & V_{\tau 3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

где $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$, $c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$, δ — фаза CP-нарушения, $\alpha_{1,2}$ — майорановские фазы.

$$V = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Осцилляции нейтрино

- Смешивание во взаимодействиях поколений лептонов с W^\pm бозонами и ненулевые и отличающиеся массы нейтрино приводят к явлению осцилляций нейтрино.
- Вероятности осцилляций зависят от

$$\Delta m_{ij}^2, \theta_{ij}, \delta.$$

и от расстояния и энергии нейтрино.

- Так определяются:

$$\theta_{12} \approx 34^\circ, \quad \theta_{13} \approx 9^\circ, \quad \theta_{23} \approx 45^\circ.$$

$$\Delta m_{21}^2 \approx 7.4 \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \quad |\Delta m_{31}^2| \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

Масса нейтрино

- Ограничения снизу:

$$|\Delta m_{31}^2| \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad \hookrightarrow \quad m_{3(1)} \geq \sqrt{|\Delta m_{31}^2|} \approx 50 \text{ meV}, \quad \text{NO(IO)},$$

$$\Delta m_{21}^2 \approx 7.4 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \quad \hookrightarrow \quad m_2 \geq \sqrt{\Delta m_{21}^2} \approx 8 \text{ meV}.$$

- Ограничения сверху:

$$\sum_i m_i < 120 \text{ meV} \quad (\text{космология}),$$

$$m_\beta < 45 \text{ meV} \quad {}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e, \quad m_\beta^2 = \sum_i |V_{ei}|^2 m_i^2.$$

Неизвестно: упорядоченность масс



Упорядоченность масс

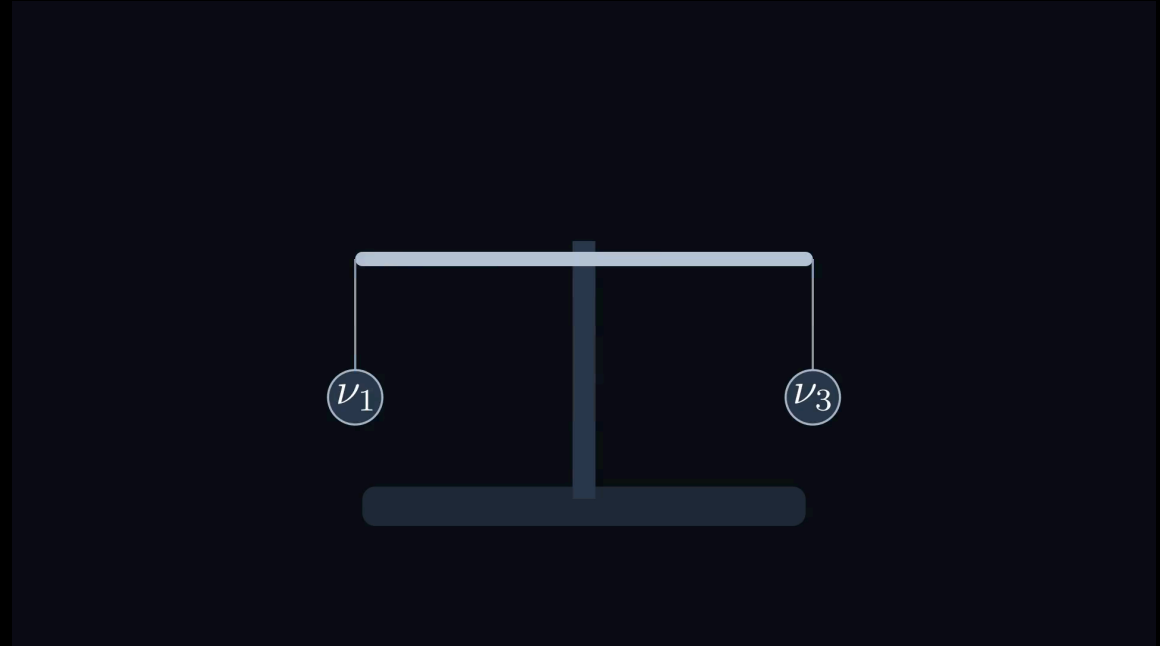
- Нормальный порядок (NO):

$$m_1 < m_2 < m_3.$$

- Обратный порядок (IO):

$$m_3 < m_1 < m_2.$$

- Упорядоченность масс влияет на интерпретацию $0\nu\beta\beta$.
- Важна для сверхновых, космологии и определения массы самого легкого нейтрино.
- JUNO, DUNE, NOvA, T2K, Hyper-K, ORCA, IceCube Upgrade и другие эксперименты дадут ответ на этот вопрос в течении десятилетия.



**Неизвестно: масса самого легкого
нейтрино**



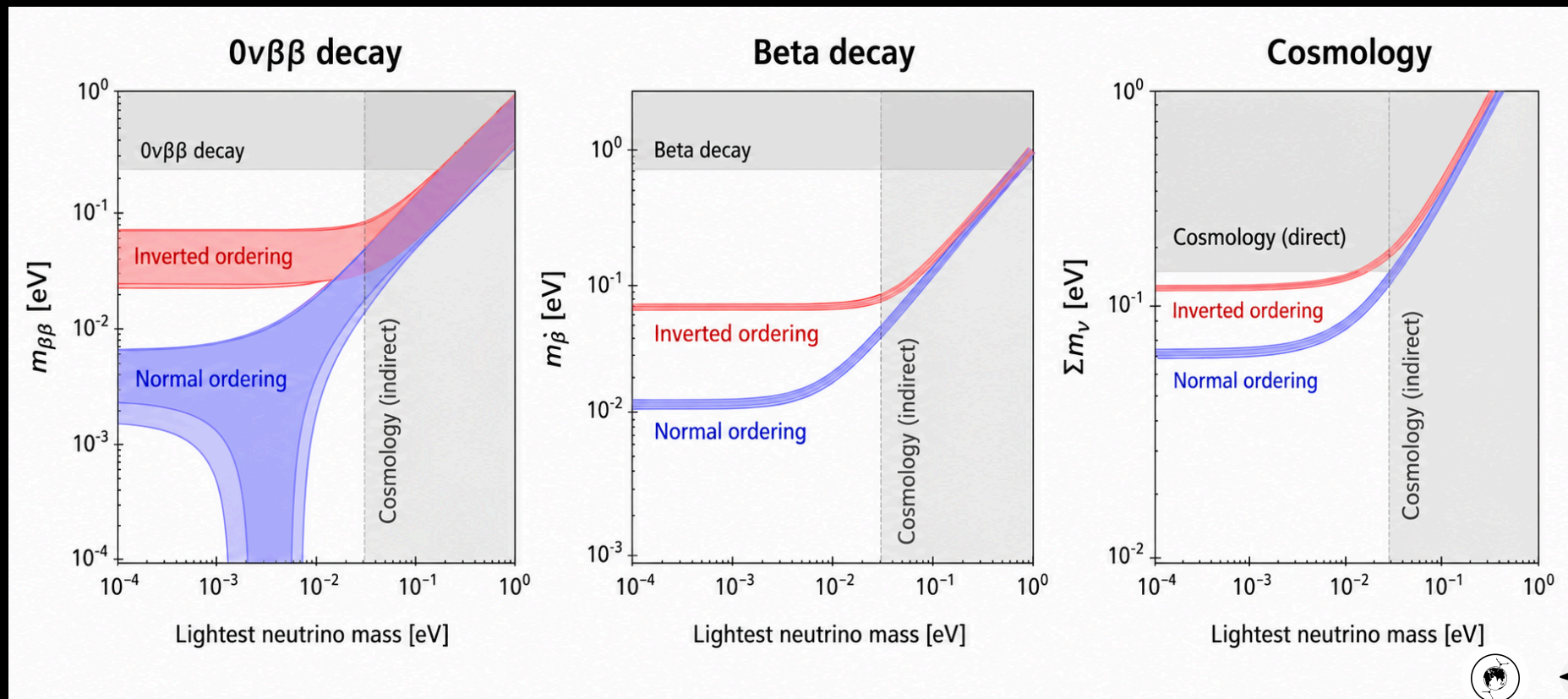
Масса самого легкого нейтрино

- Ограничения снизу:

$$|\Delta m_{31}^2| \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad \hookrightarrow \quad m_{3(1)} \geq \sqrt{|\Delta m_{31}^2|} \approx 50 \text{ meV}, \quad \text{NO(IO),}$$

$$\Delta m_{21}^2 \approx 7.4 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \quad \hookrightarrow \quad m_2 \geq \sqrt{\Delta m_{21}^2} \approx 8 \text{ meV}.$$

- Нет ограничения снизу (кроме нуля) на m_{lightest} .



Масса самого легкого нейтрино: что дальше?

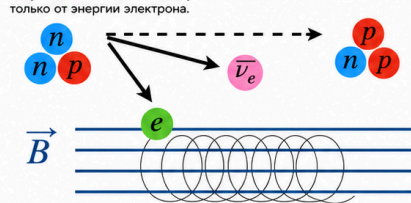
- KATRIN:
 - Обработать данные до 2025 года.
Чувствительность: $m_\beta < 0.3 \text{ eV}$ (90% CL).
 - 2026-2027: TRISTAN@KATRIN, поиск стерильного нейтрино.
 - 2028-2034: R&D для следующего поколения, чувствительность $m_\beta < 0.045 \text{ eV}$.
- Project 8 — спектроскопия циклотронного излучения электрона (CRES):
 - Чувствительность: 0.01–0.05 эВ

CRES — ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНА ПО ЧАСТОТЕ ЕГО ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Неразрушающее измерение энергии электронов для определения массы нейтрино

1 ПРИНЦИП МЕТОДА

При β -распаде нейтрон превращается в протон, электрон и антинейтрино. Электрон движется в магнитном поле и излучает циклотронное излучение. Частота этого излучения зависит только от энергии электрона.



2 ЦИКЛОТРОННАЯ ЧАСТОТА

Электрон с кинетической энергией K , движущийся в магнитном поле B , излучает на частоте

$$f_\gamma = \frac{eB}{2\pi m_e \left(1 + \frac{K}{m_e c^2}\right)}$$

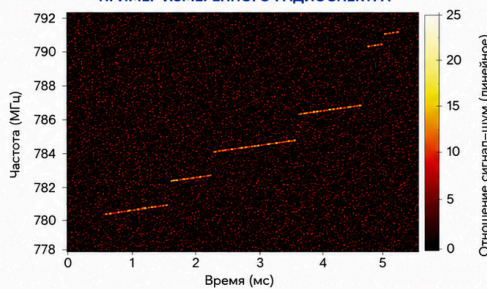
e — заряд электрона
 m_e — масса электрона
 c — скорость света
 B — магнитное поле
 K — кинетическая энергия электрона

ГЛАВНАЯ ИДЕЯ
 Измеряя частоту циклотронного излучения, мы определяем энергию электрона, не поглощая его и не изменяя его траекторию. Это позволяет достичь высокой точности и низкого фона.

3 КАК ЭТО РАБОТАЕТ

- 1 Источник β -распада**
Электрон рождается в β -распаде внутри магнитной ловушки.
- 2 Винтовая траектория**
Электрон движется по спирали в однородном магнитном поле B .
- 3 Циклотронное излучение**
Электрон излучает радиоволны на частоте f_γ , пропорциональной его энергии.
- 4 Детектирование**
Радиосигнал принимается антенной, усиливается и анализируется.
- 5 Спектр и энергия**
По измеренной частоте вычисляется энергия каждого электрона. Из формы спектра около конечной точки определяется масса нейтрино.

ПРИМЕР ИЗМЕРЕННОГО РАДИОСПЕКТРА



Каждая наклонная полоса — это циклотронное излучение одного электрона. По частоте определяется его энергия.

ПРЕИМУЩЕСТВА CRES

- ✓ Неразрушающее измерение (электрон не поглощается)
- ✓ Высокая энергетическая разрешающая способность
- ✓ Низкий фон и систематические неопределенности
- ✓ Чувствительность к массе нейтрино: ~ 0.01–0.05 эВ

ПРИМЕНЕНИЕ

Тритуевый β -распад: ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$
 Проекты: Project 8, KATRIN (CRES-источник), TRISTAN и др.



Неизвестно: Дирак или Майорана?



Дирак или Майорана?

- Дирак: нейтрино и антинейтрино — разные частицы
- Майорана: нейтрино и антинейтрино — одна и та же частица
- Если нейтрино — майорановские частицы, возможен **безнейтринный двойной бета-распад**:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^{-}.$$

- Этот процесс нарушает лептонное число на 2 единицы и может происходить только для майорановских нейтрино.
- $0\nu\beta\beta$ — единственный известный экспериментальный способ установить майорановскую природу нейтрино.
- KamLAND-Zen, 800:

$$m_{\beta\beta} < 22 - 122\text{meV}$$

- CUORE (Science 390, 1029-1032 (2025)):

$$m_{\beta\beta} < 70 - 250\text{meV}$$

- LEGEND-200 (Phys.Rev.Lett. 136 (2026) 2, 022701):

$$m_{\beta\beta} < 75 - 200\text{meV}$$



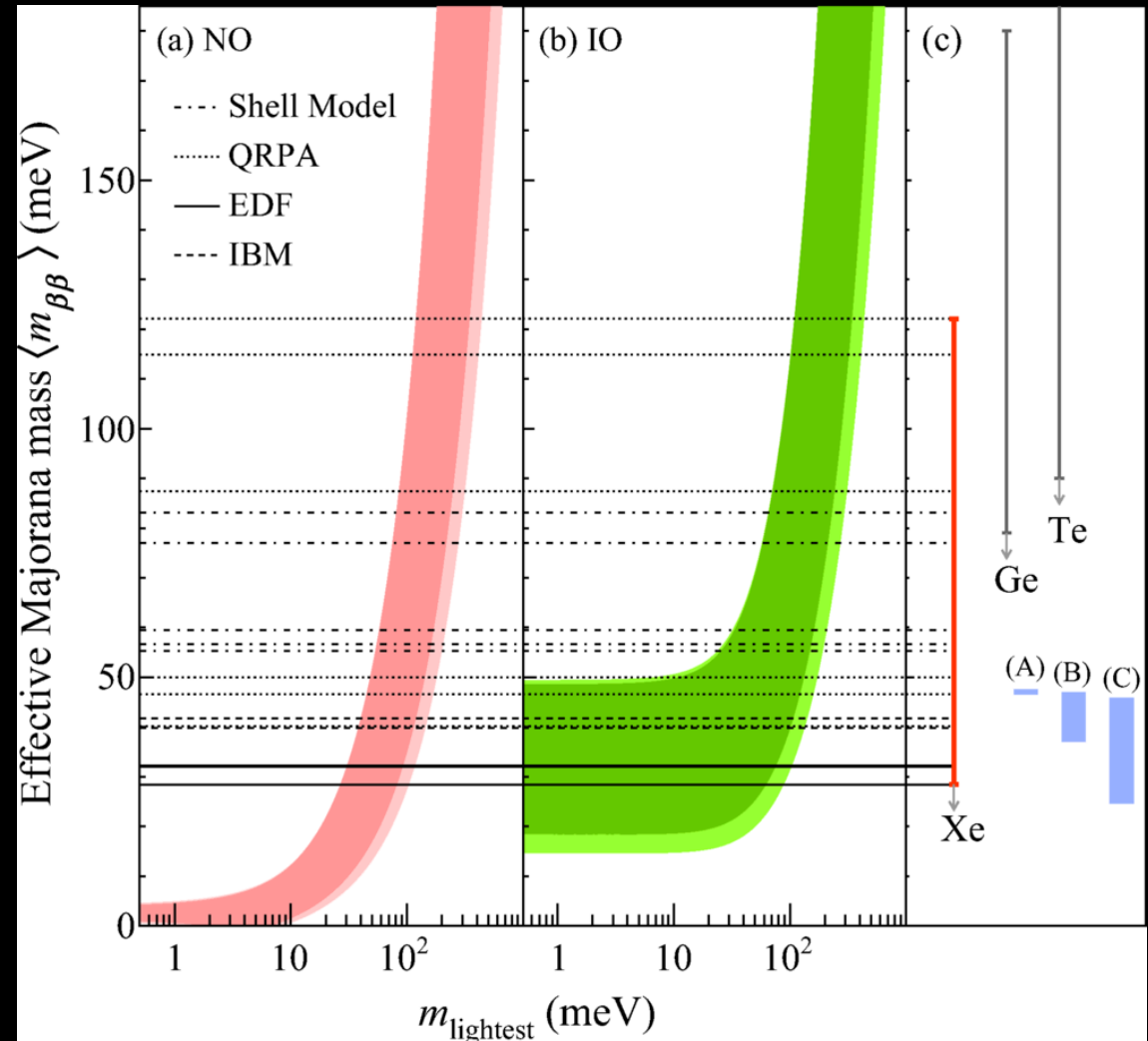
Дирак или Майорана?

Что дальше?

Эффективная майорановская масса

$$m_{\beta\beta} = \left| \sum_i V_{ei}^2 m_i \right|$$

- Следующее поколение экспериментов (SNO+, SuperNEMO, AMoRE-II) начинает набирать данные.
- В течение ближайшего десятилетия установки тонного масштаба (LEGEND-1000, CUPID, nEXO, NEXT-ND и др.) должны полностью проверить IO область.
- Важное ограничение чувствительности связано с неопределённостью ядерных матричных элементов, определяющих связь между периодом полураспада и $m_{\beta\beta}$.
- Для исследования значительной части области **нормальной иерархии** потребуются новые технологии и детекторы существенно большего масштаба.



Phys. Rev. Lett. 135 (2025) 262501



Неизвестно: СР-нарушение

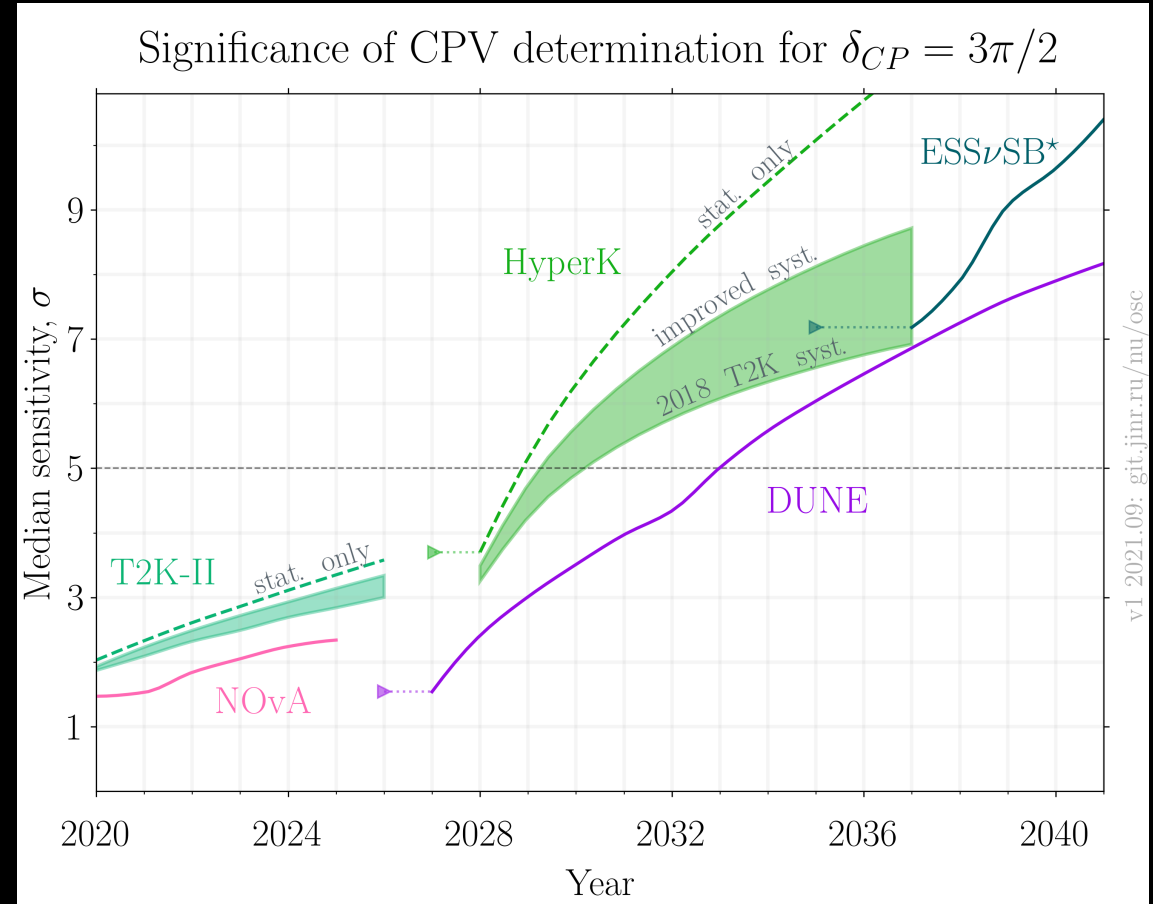


CP-нарушение

- CP-нарушение в PMNS-матрице может быть связано с идеями лептогенезиса.
- Экспериментально CP-нарушение проявляется в различии вероятностей осцилляций нейтрино и антинейтрино:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta).$$

- Очень сложное измерение.
- Эксперименты с ускорительными и атмосферными нейтрино это главная надежда



Неизвестно: возможная новая физика



Возможная новая физика

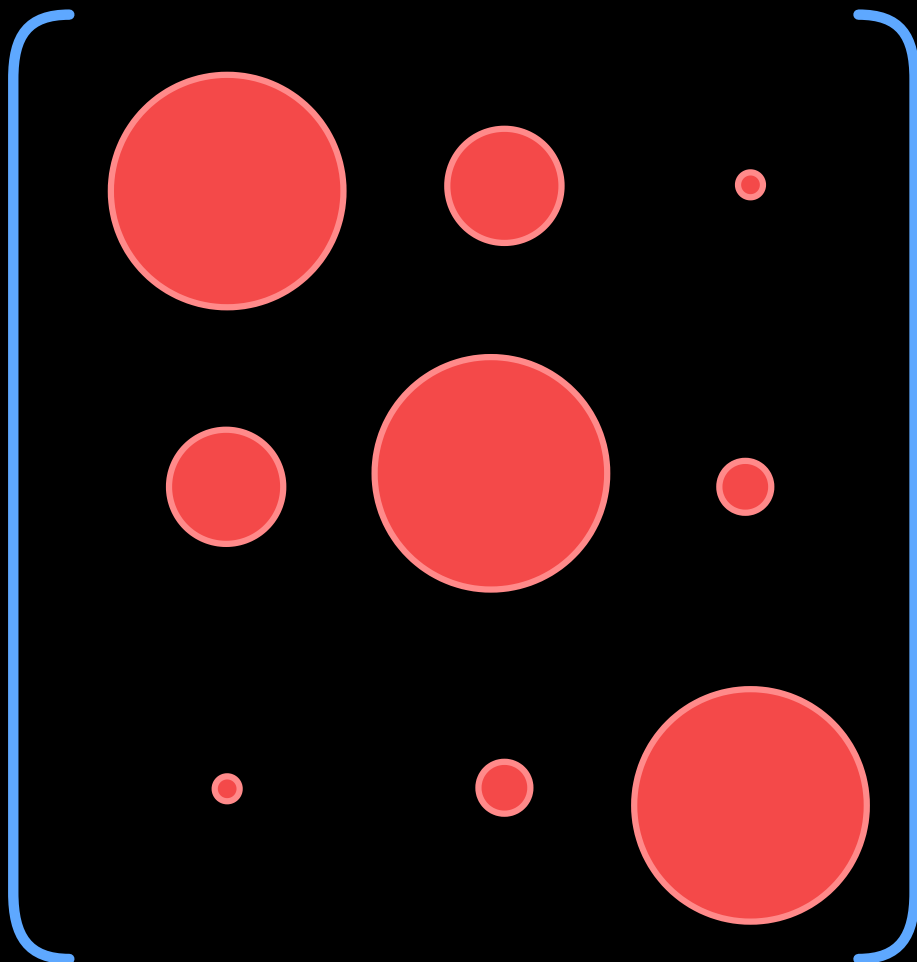
- Стерильные нейтрино: мотивация из аномалий и из теории масс.
- Нестандартные взаимодействия: возможные отклонения от SM-описания рассеяния и распространения.
- Электромагнитные свойства: магнитный момент, миллизаряд, зарядовый радиус.
- Текущая ситуация:
 - область возможных параметров стерильных нейтрино сильно ограничена;
 - отклонений от SM не найдено;
 - область остаётся важной как поиск новой физики.

Флэйворная загадка

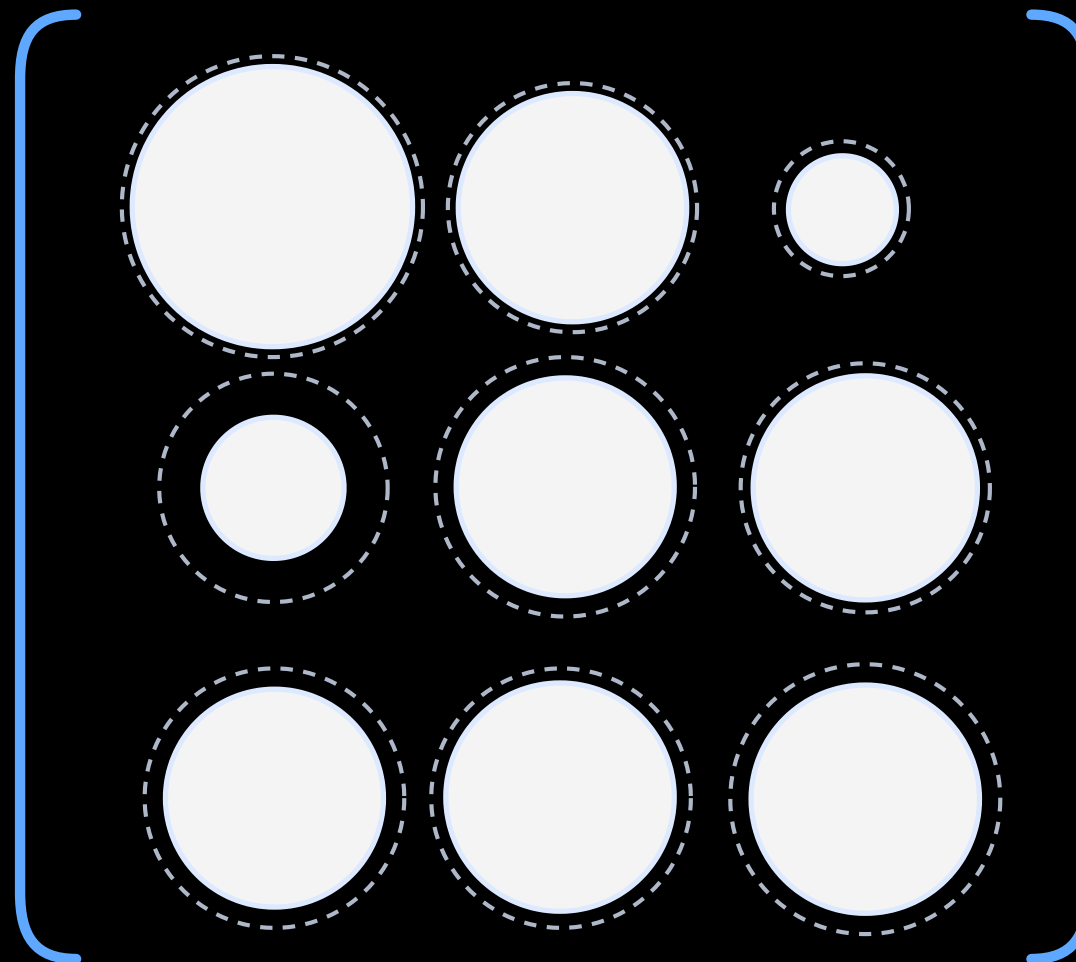


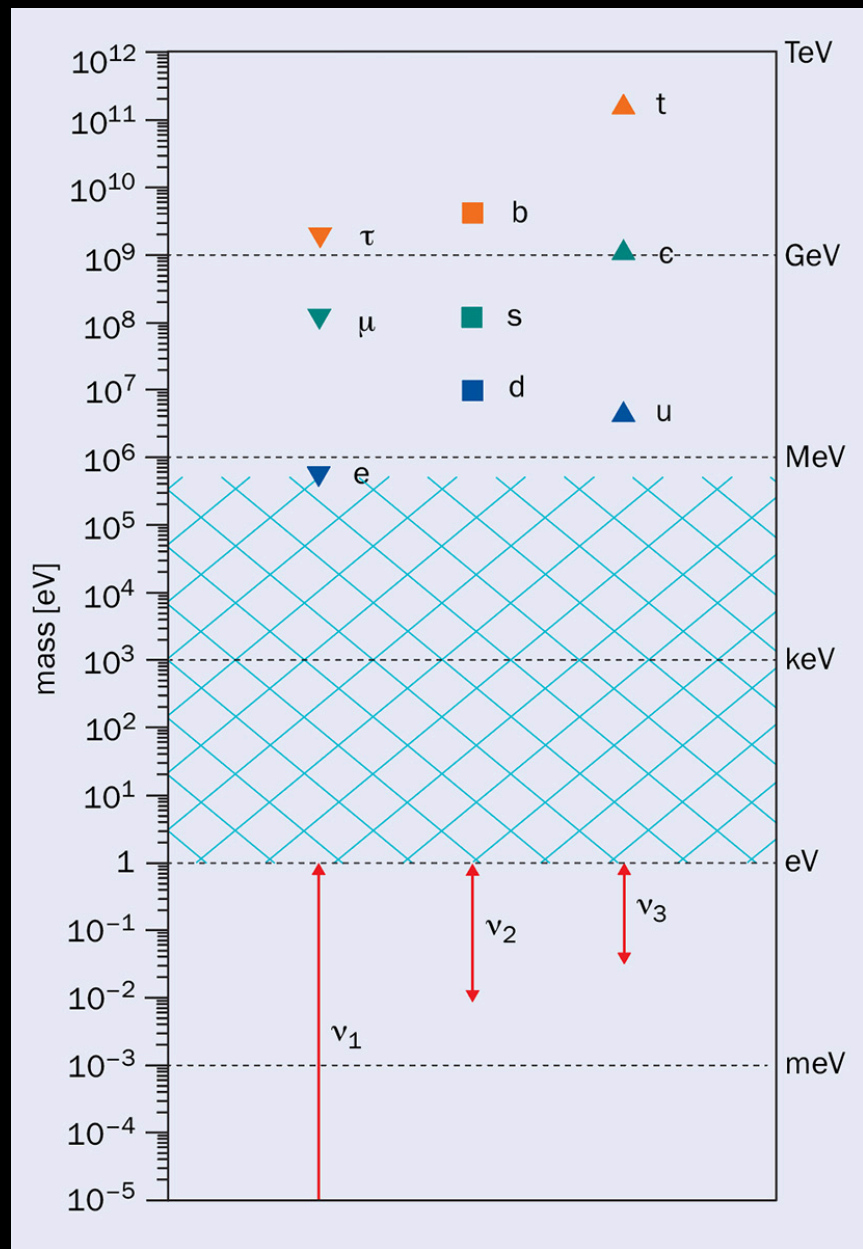
Флэйворная загадка

СКМ Matrix



PMNS Matrix





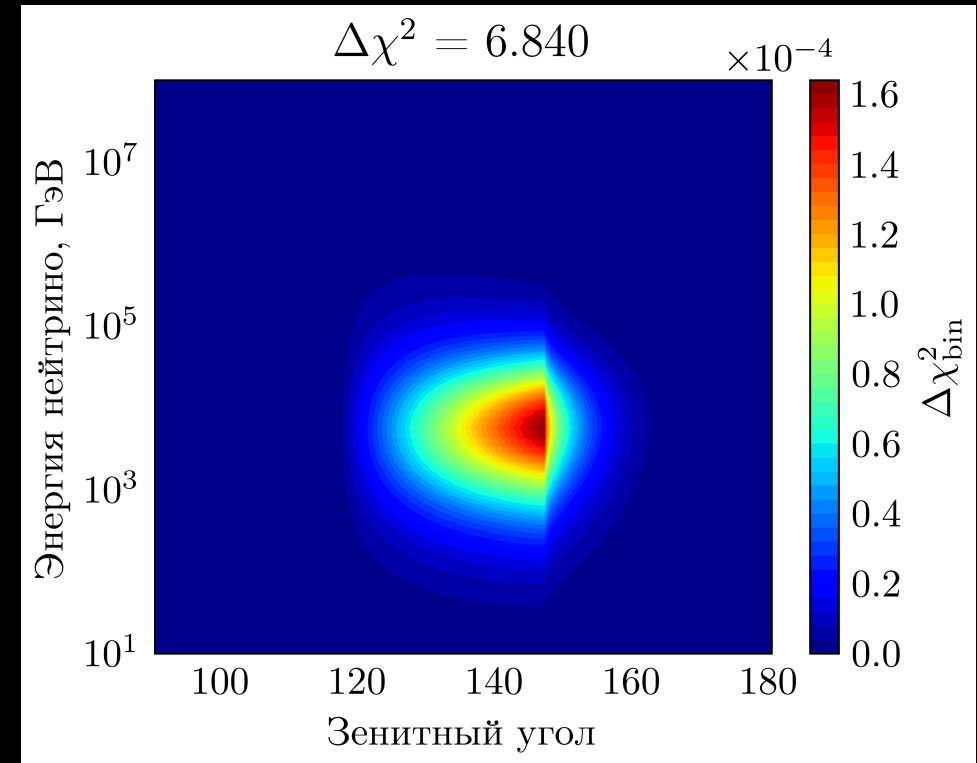
Нейтрино как инструмент



От объекта исследования к инструменту

Нейтрино позволяют смотреть туда, где фотоны не работают напрямую.

- Солнце и звёзды: прямой зонд термоядерных реакций.
- Сверхновые: диагностика коллапса ядра.
- Земля: геонейтрино и, в перспективе, томография.
- Реакторы: мониторинг и фундаментальная физика на коротких базах.
- Далёкий космос: астрофизические нейтрино высоких энергий.

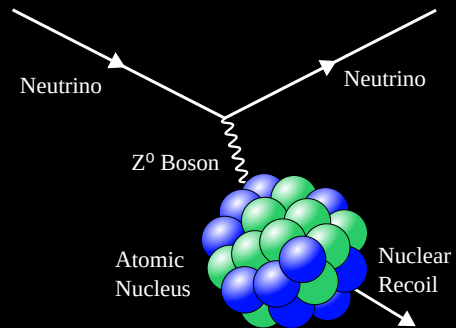


В.А. Аллахвердян. Диссертация 2026 (ОИЯИ)

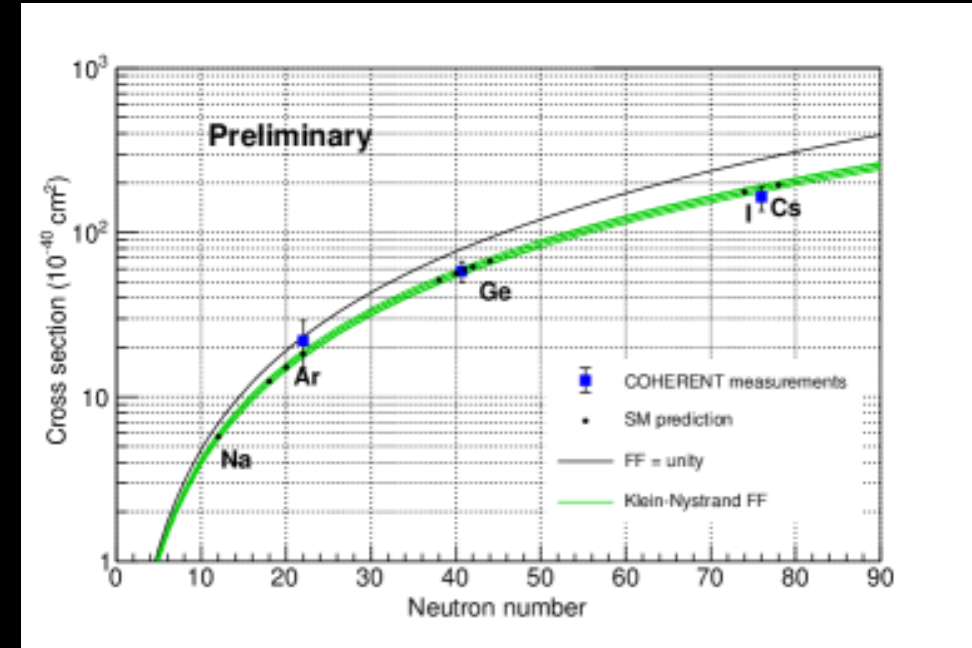
https://issc.jinr.ru/files/326/f_2_5830.pdf

Реакторы и когерентное рассеяние

- Реактор — интенсивный источник $\bar{\nu}_e$.
- Когерентное упругое рассеяние:



- Сечение растёт примерно как N^2 .
- Цена — малые энергии отдачи ядра.
- Это чувствительно к слабому заряду, новым взаимодействиям, магнитному моменту и фоновым моделям.
- Реакторные площадки становятся лабораториями низкоэнергетической нейтринной физики.



arXiv:2602.15652, “The COHERENT Experiment: 2026 Update”.

Российские проекты



КАЭС: реакторная нейтринная физика

Калининская АЭС — естественная площадка для нейтринных экспериментов на коротких расстояниях.

- Интенсивный поток $\bar{\nu}_e$.
- Возможность изучать осцилляции на коротких базах.
- Поиск стерильных состояний и новых взаимодействий.
- Когерентное рассеяние и низкопороговые детекторы.
- Потенциальная прикладная линия: нейтринный мониторинг реакторов.

Baikal-GVD

Baikal-GVD — российский вклад в нейтринную астрономию высоких энергий (2026: 0.8 км³).

- Регистрация астрофизических нейтрино в естественной водной среде.
- Измерение диффузного потока.
- Поиск точечных источников.
- Галактическая плоскость, активные галактики, мульти-мессенджерные совпадения.
- Первые результаты:
 - Астрофизические нейтрино сверхвысоких энергий:
 - 2013: Открыты в IceCube
 - 2023: Подтверждены Baikal-GVD
 - Два нейтрино от одного источника TXS 0506+056:
 - 2017: IceCube: 290 TeV
 - 2021: Baikal-GVD: 224 TeV
 - Млечный Путь как источник:
 - Указание от Baikal-GVD @2.5 σ
 - Совместный анализ Baikal-GVD + IceCube повышает значимость до 3.6 σ .



Baikal-HUNT

Следующий шаг — детектор объемом (10-30) км³ на озере Байкал.

- От регистрации редких событий к открытиям на уровне 5σ .
- Совместный проект РФ и КНР.
- Крупнейшая установка в мире, которая определит развитие области в мире на десятилетия.



Образовательная онлайн программа “Физика нейтрино и астрофизика частиц”



Образовательная онлайн программа “Физика нейтрино и астрофизика частиц” ^{31 / 33}

- 2 года
- Онлайн-лекции от ведущих российских экспертов.
- Два трека: теоретик и экспериментатор.
- Стипендия 45 тыс рублей со второго семестра. Можно два трека сразу.
- Исследовательский проект в конце программы.
- Цель: подготовить новое поколение исследователей нейтрино и астрофизики частиц в России.
- Подать заявку: <https://teach-in.ru/program>



Итого



Итоговая картина

- Нейтрино имеют массу и смешиваются: это установленный факт.
- Осцилляционная картина стала количественной и точной.
- Но не решены важные вопросы:
 - масса легкого нейтрино;
 - упорядоченность масс;
 - CP-нарушение;
 - Dirac или Majorana;
 - возможная новая физика.
- Нейтрино уже стало инструментом для астрофизики, геофизики и реакторной физики.
- Российские проекты входят в эту программу через Baikal-GVD, Baikal-HUNT, реакторные эксперименты на КАЭС, эксперименты в Баксанской подземной лаборатории, Neutrino-4 и др.
- Кроме идей и установок нам нужно готовить КАДРЫ!