

1. Осцилляции реакторных антинейтрино. Коллаборация Daya Bay, в которой принимают участие российские исследователи из ОИЯИ (г. Дубна), представила новые наиболее точные данные по осцилляциям электронных антинейтрино, рождающихся в атомных реакторах [1]. Уменьшение числа антинейтрино по мере их удаления от реактора даёт информацию об угле смешивания θ_{13} , важную для решения проблемы иерархии масс и поиска нарушения CP -инвариантности в нейтринных осцилляциях. В эксперименте Daya Bay, проводимом в Китае, наблюдается обратный бета-распад $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ путём регистрации позитрона и нейтрона, захватываемого атомами гадолиния в восьми детекторах на расстояниях 500 и 1650 м от реакторов. Гадолиний составляет 0,1 % по массе в жидком сцинтилляторе, просматриваемом фотоумножителями. Из данных по $5,55 \times 10^6$ событиям получено $\sin^2(2\theta_{13}) = 0,0851 \pm 0,0024$. Отсюда для прямого и обратного упорядочения масс $\Delta m_{32}^2 = (2,466 \pm 0,060) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ и $\Delta m_{21}^2 = -(2,571 \pm 0,060) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ соответственно. Гипотезу об осцилляциях нейтрино впервые высказал Б. Понтекорво в 1957 г. [2] (см. также [3–5]).

2. Данные эксперимента Borexino. Хотя эксперимент Borexino по регистрации нейтрино в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) был завершён в октябре 2021 г., обработка накопленных в нём данных даёт новые интересные результаты. Коллаборация Borexino выполнила поиск совпадений между нейтринными событиями и всплесками гравитационных волн, наблюдавшихся интерферометрами LIGO/Virgo [6]. Нейтрино могли бы рождаться вместе с гравитационными волнами при слиянии чёрных дыр и нейтронных звёзд. Хотя совпадений не обнаружено, их отсутствие дало новые ограничения на механизмы излучения нейтрино. Анализ фазы III эксперимента Borexino, выполненный недавно самой коллаборацией Borexino, позволил уточнить величину потока и спектр солнечных нейтрино от CNO-цикла ядерных реакций в ядре Солнца [7]. Гипотеза об отсутствии регистрации CNO-нейтрино исключена на уровне достоверности 7σ , и указанный анализ спектров нейтрино даёт предположение моделям Солнца с высокой металличностью. Интересно отметить, что альтернативная обработка данных эксперимента Borexino, которую провели исследователи из ИЯИ РАН и МИФИ Л.Б. Безруков, И.С. Карпиков и В.В. Синев, включив в расчёт нейтрино от распадов ядер ^{40}K в Земле, показывает лучшее согласие с измеренными спектрами нейтрино, чем модель без ^{40}K [8, 9]. При этом предпочтительной становится модель Солнца с малой металличностью. Наличие в Земле большого количества ^{40}K должно вести также к повышенному выходу радиогенного тепла из недр Земли.

3. Галактические нейтрино. Наша Галактика, особенно область её звёздного диска, видна во всем электромагнитном диапазоне, от радиоволн до гамма-лучей. Коллаборацией IceCube, регистрирующей нейтрино на детекторе в Антарктиде, представлено первое нейтринное изображение Галактики [10]. Гамма-фотоны рождаются при взаимодействии космических лучей с межзвёздным газом в Галактике, и в 1979 г. F.W. Stecker предсказал, что в тех же процессах должны рождаться нейтрино. Поток этих галактических нейтрино позже был детально рассчитан В.С. Березинским совместно с Т. Gaisser, F. Halzen и Т. Stanev. При изучении южной части неба, где находится центр Галактики, IceCube выделил каскадные события, связанные со взаимодействием нейтрино в объёме самого детектора. Хотя точность определения направлений по каскадным событиям ниже, чем по трековым, в каскадных событиях проще отфильтровать сильный фон атмосферных мюонов. Благодаря применению современных методов компьютерной обработки данных, известных как "машинное обучение", галактические нейтрино были выделены на уровне достоверности $4,5\sigma$. Сигнал имеет вид диффузного неоднородного излучения, сконцентрированного вблизи диска Галактики. Наличие галактической компоненты

нейтрино в данных IceCube ранее было обнаружено Ю.Ю. Ковалевым, А.В. Плавным и С.В. Троицким на основе анализа трековых событий [11]. О роли нейтрино в астрофизике см. [12].

4. Регистрация гравитационных волн в проекте NANOGrav. В 1978 г. М.В. Сажин (Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ, Москва) предложил способ регистрации гравитационных волн от двойных массивных объектов на основе наблюдений пульсаров [13]. Гравитационные волны, проходящие между пульсарами и наблюдателем на Земле, должны возмущать пространство-время и тем самым сдвигать фазы сигналов. Коллаборация NANOGrav ранее уже получала свидетельства существования фона гравитационных волн диапазона нГц, но статистическая значимость результата была мала. В июне 2023 г. NANOGrav представила данные за 15 лет [14], где достоверность достигает $(3,5\text{--}4)\sigma$. С помощью радиотелескопов наблюдались 67 пульсаров, и были зарегистрированы скоррелированные сдвиги фаз их импульсов, соответствующие прохождению гравитационных волн. Квадрупольный характер корреляций позволил исключить иные причины сдвига фаз, в том числе движение Солнечной системы через неоднородную среду, влияющую на распространение радиоволн. В наблюдениях NANOGrav отдельные источники не видны, а регистрируется только общий стохастический фон гравитационных волн. Он имеет близкий к степенному спектр с показателем $\gamma = 3,2 \pm 0,6$. Похожий фон с $\gamma \simeq 13/3$ и с той же амплитудой могли создать пары сверхмассивных чёрных дыр с массами $(10^8\text{--}10^{10})M_\odot$, которые находились в центрах галактик и сближались вслед за их слияниями. Вблизи сверхмассивных чёрных дыр, вероятно, рождались и внегалактические нейтрино, зарегистрированные на IceCube [15]. Однако нельзя исключать, что фон гравитационных волн имеет другие более экзотические источники, например, фазовые переходы или коллапсы доменных стенок в ранней Вселенной. Одновременно о регистрации гравитационного фона диапазона нГц сообщили ещё три коллаборации. Гравитационные волны большей частоты от слияний чёрных дыр звёздных масс и нейтронных звёзд уже наблюдаются с 2016 г. интерферометрами LIGO/Virgo/KAGRA, а ещё раньше излучение гравитационных волн было косвенно обнаружено по изменению орбиты двойного пульсара.

Список литературы

1. An F P et al. (Daya Bay Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **130** 161802 (2023) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.161802>
2. Понтекорво Б *ЖЭТФ* **34** 247 (1958); Pontecorvo B *Sov. Phys. JETP* **7** 172 (1958)
3. Бедняков В А, Наумов Д В, Смирнов О Ю *УФН* **186** 233 (2016); Bednyakov V A, Naumov D V, Smirnov O Yu *Phys. Usp.* **59** 225 (2016)
4. Куденко Ю Г *УФН* **188** 821 (2018); Kudenko Yu G *Phys. Usp.* **61** 739 (2018)
5. Колупаева Л Д и др. *УФН* **193** 801 (2023); Kolupaeva L D et al. *Phys. Usp.* **66** 751 (2023) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2022.05.039191>
6. Basilico D et al. (Borexino Collab.) *Eur. Phys. J. C* **83** 538 (2023)
7. Appel S et al. (Borexino Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **129** 252701 (2022); arXiv:2205.15975
8. Bezrukov L B, Karpikov I S, Sinev V V, arXiv:2304.02747
9. Безруков Л Б и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **87** 1042 (2023); Bezrukov L B et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **87** (7) (2023)
10. Abbasi R et al. (IceCube Collab.) *Science* **380** 1338 (2023); arXiv:2307.04427
11. Kovalev Y Y, Plavin A V, Troitsky S V *Astrophys. J. Lett.* **940** L41 (2022)
12. Понтекорво Б *УФН* **79** 3 (1963); Pontecorvo B *Sov. Phys. Usp.* **6** 1 (1963)
13. Сажин М В *Астрон. журн.* **55** 65 (1978); Sazhin M V *Sov. Astron.* **22** 36 (1978)
14. Agazie G et al. *Astrophys. J. Lett.* **951** L8 (2023); arXiv:2306.16213
15. Plavin A et al. *Astrophys. J.* **894** 101 (2020)