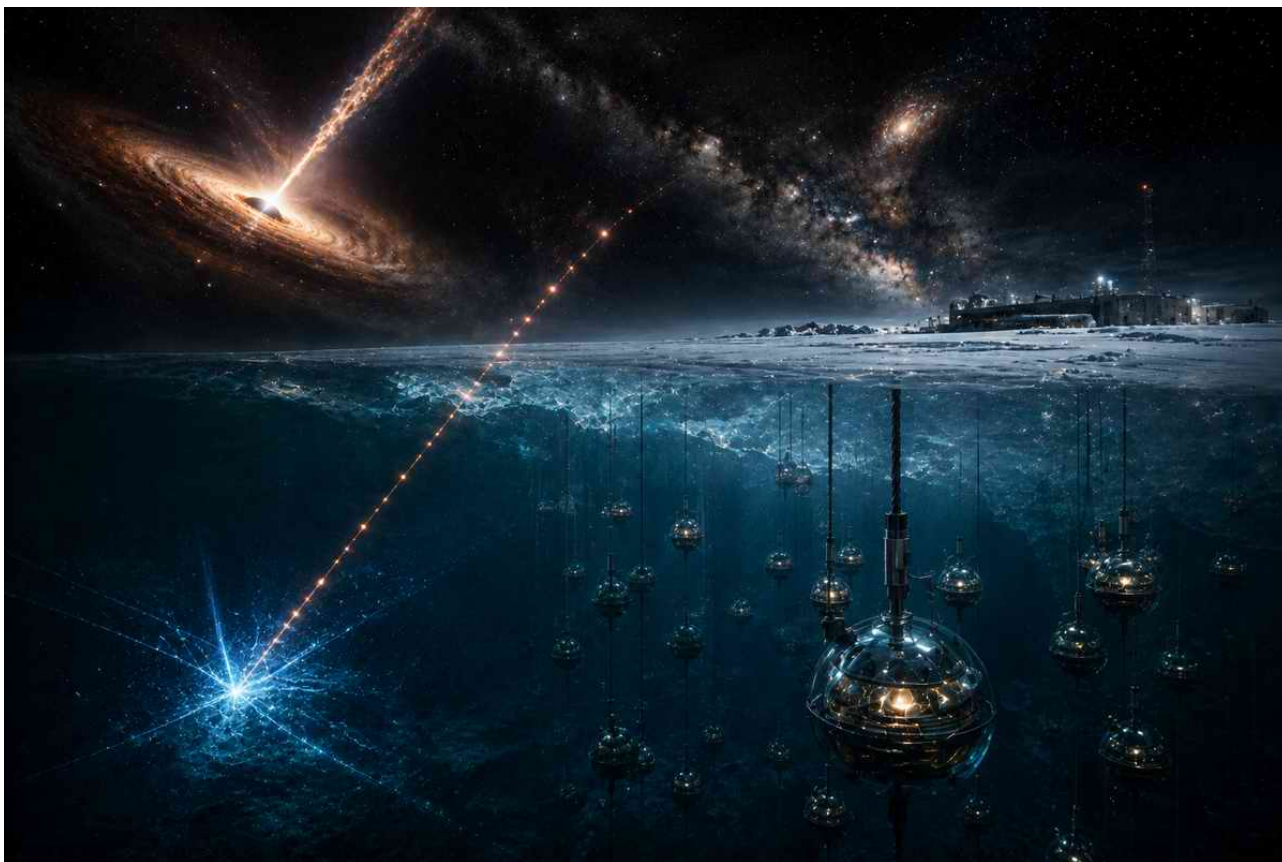


## Нейтринная астрономия: как «призрачные» частицы открывают скрытую Вселенную



Дата публикации: 07.07.2026

Нейтринная астрономия еще недавно считалась скорее перспективным направлением фундаментальной физики, чем полноценной наблюдательной дисциплиной. Однако всего за одно десятилетие ситуация кардинально изменилась. Сегодня нейтрино превратились в новый инструмент исследования Вселенной, дополнив традиционную астрономию, основанную на регистрации света. Если на протяжении столетий человечество изучало космос через фотоны различных диапазонов — от радиоволн до гамма-излучения, — то теперь ученые получают информацию при помощи частиц, практически не взаимодействующих с веществом и способных донести сведения из самых недоступных уголков космоса.

Нейтрино относятся к фундаментальным элементарным частицам. Они почти не имеют массы, не несут электрического заряда и взаимодействуют с окружающим веществом исключительно посредством слабого взаимодействия и гравитации. Через тело каждого человека каждую секунду проходят триллионы нейтрино, рожденных в недрах Солнца, атмосфере Земли и далеких космических

объектах, однако вероятность их столкновения с атомами настолько мала, что мы совершенно этого не замечаем. Именно эта почти абсолютная «невидимость» делает нейтрино бесценными космическими посланниками.

Фотоны, с помощью которых традиционно изучается Вселенная, сталкиваются с многочисленными препятствиями. Они рассеиваются в облаках газа и пыли, поглощаются плотной материей, теряют энергию или вообще не способны покинуть наиболее экстремальные области космоса. Нейтрино ведут себя совершенно иначе. Они практически беспрепятственно проходят через звезды, межзвездные облака, галактики и даже целые планеты, сохраняя информацию о процессах, происходящих рядом со сверхмассивными черными дырами, активными ядрами галактик, гамма-всплесками, областями ускорения космических лучей и другими объектами, скрытыми от обычных телескопов.

Главным символом новой эпохи стал нейтринный телескоп IceCube, построенный в глубине антарктического ледяного щита. На глубине более полутора километров в прозрачном древнем льду размещены 5160 высокочувствительных оптических модулей, закрепленных на 86 вертикальных гирляндах. Когда исключительно редкое нейтрино все же сталкивается с атомным ядром льда, возникают вторичные заряженные частицы, испускающие черенковское излучение — слабую голубоватую вспышку, которую и регистрируют детекторы. Именно по таким единичным вспышкам ученые восстанавливают направление, энергию и вероятное происхождение прилетевшей частицы.

Настоящий прорыв произошел в 2013 году, когда IceCube впервые зарегистрировал диффузный поток астрофизических нейтрино с энергиями в диапазоне тера- и петаэлектронвольт. Это открытие стало фактическим рождением нейтринной астрономии как самостоятельной науки. Позднее были обнаружены и первые конкретные источники высокоэнергичных нейтрино. Среди них оказались активные галактики NGC 1068 и NGC 4151, а также блазар TXS 0506+056. Особое значение имело событие 2017 года, когда регистрация нейтрино практически совпала по времени со вспышкой гамма-излучения, зафиксированной космическими телескопами. Впервые один и тот же космический процесс удалось одновременно наблюдать сразу несколькими независимыми способами, что стало одним из важнейших достижений современной многоканальной астрономии. В 2023 году IceCube обнаружил также диффузное нейтринное излучение, исходящее от плоскости Млечного Пути, подтвердив существование мощных источников нейтрино внутри нашей собственной Галактики.

Развитие нейтринной астрономии давно перестало быть проектом одной страны. В озере Байкал работает российская обсерватория Baikal-GVD —

крупнейший нейтринный детектор Северного полушария. По итогам экспедиции 2025 года его эффективный объем достиг примерно 0,7 кубического километра, а в ближайшие годы планируется увеличение до одного кубического километра. Следующим этапом должен стать международный российско-китайский проект HUNT с объемом детектора до 30 кубических километров. Одновременно развивается европейская обсерватория KM3NeT в Средиземном море, а в Тихом океане строится установка P-ONE. Вместе эти комплексы постепенно формируют глобальную сеть, обеспечивающую практически непрерывное наблюдение за всем нейтринным небом.

В 2025 году в журнале *Physical Review X* был опубликован масштабный обзор, подготовленный ведущими специалистами Гарвардского университета и коллаборации IceCube. Авторы сформулировали семь ключевых вопросов, которые будут определять развитие нейтринной астрономии в ближайшие десятилетия. Исследователям предстоит выяснить происхождение гамма-излучения, сопровождающего образование нейтрино при распаде пионов, определить природу источников высокоэнергичных нейтрино, понять механизм ускорения космических лучей до энергий, многократно превосходящих возможности земных ускорителей, использовать космические нейтрино в качестве своеобразного сверхмощного коллайдера Large Neutrino Collider для поиска новой физики за пределами Стандартной модели, применить сверхэнергичные нейтрино для томографии внутреннего строения Земли, уточнить абсолютную массу нейтрино посредством анализа их осцилляций и создать единую мировую сеть обмена данными между всеми нейтринными обсерваториями по аналогии с системами LIGO, Virgo и KAGRA, работающими в области гравитационно-волновой астрономии.

Особенно привлекательной выглядит идея использования космических нейтрино как естественного ускорителя элементарных частиц. При энергиях свыше 100 петаэлектронвольт столкновения нейтрино с атомными ядрами происходят при энергиях, превышающих возможности Большого адронного коллайдера. Фактически сама Вселенная становится гигантской экспериментальной установкой, где природа проводит эксперименты, недостижимые для современной техники.

Не менее перспективным направлением считается нейтринная томография Земли. Благодаря способности проникать через тысячи километров вещества сверхэнергичные нейтрино могут использоваться для изучения распределения плотности внутри планеты. Анализируя вероятность их прохождения через различные области земных недр, ученые надеются получить новые сведения о строении ядра и мантии, которые невозможно извлечь исключительно с помощью сейсмологии.

Однако значение нейтринной астрономии выходит далеко за рамки новых технологий. Она заставляет переосмыслить само понятие наблюдения. На протяжении всей истории науки человек стремился увидеть объект. В нейтринной астрономии увидеть источник напрямую практически невозможно. Мы наблюдаем лишь единичные следы его существования — редчайшие вспышки света в гигантских объемах прозрачного льда или воды. Сигнал здесь измеряется буквально отдельными событиями в течение месяцев или даже лет наблюдений, тогда как все остальное представляет собой непрерывный фон.

В этом скрыта глубокая философия новой науки. Она напоминает, что наиболее важные процессы во Вселенной далеко не всегда сопровождаются ярким свечением. Иногда самые фундаментальные явления оставляют лишь едва различимые отпечатки, требующие огромного терпения, сложнейших технологий и международного сотрудничества. Нейтринная астрономия учит исследователей не только смотреть на свет, но и внимательно вслушиваться в космическую тишину, где скрывается информация о событиях, недоступных никакому другому способу наблюдения.

Сегодня становится очевидно, что человечество вступает в новую эпоху исследования Вселенной. Если XX век стал эпохой электромагнитной астрономии, а начало XXI века принесло гравитационно-волновые наблюдения, то следующие десятилетия, вероятно, будут временем полноценной нейтринной астрономии. Переход от регистрации фотонов к изучению «призрачных» частиц требует не только новых детекторов размером в кубические километры льда или воды, но и нового научного мышления. Именно нейтрино способны привести исследователей к разгадке происхождения космических лучей, природы сверхмассивных черных дыр, процессов рождения самых энергичных частиц во Вселенной и, возможно, открыть физику, которая находится далеко за пределами современных представлений о строении материи. В этом и заключается главная ценность нейтринной астрономии: она показывает, что самые глубокие тайны мироздания могут скрываться не там, где Вселенная светит ярче всего, а там, где она почти полностью молчит.