

IceCube обнаружил излом в потоке космических нейтрино: ученые нашли новые признаки экстремальных процессов во Вселенной



Дата публикации: 31.05.2026

Одно из самых загадочных излучений во Вселенной вновь преподнесло сюрприз астрофизикам. Международная научная коллаборация IceCube представила результаты многолетнего исследования космических нейтрино, показавшие, что их энергетическое распределение значительно сложнее, чем считалось ранее. Анализ более десяти лет наблюдений позволил обнаружить отчетливый излом в спектре астрофизических нейтрино, который невозможно объяснить классической моделью с единственным степенным законом.

Открытие имеет фундаментальное значение для понимания процессов, происходящих в самых экстремальных уголках космоса. Результаты исследования опубликованы в журнале *Physical Review Letters* и уже рассматриваются как один из наиболее важных шагов в современной нейтринной астрономии.

Нейтрино часто называют «частицами-призраками». Эти элементарные

частицы обладают крайне малой массой и практически не взаимодействуют с веществом. Миллиарды нейтрино проходят через тело человека каждую секунду, не оставляя заметных следов. Благодаря этой особенности нейтрино способны путешествовать через целые галактики, облака газа, звезды и даже планеты практически без препятствий.

Именно поэтому астрофизические нейтрино представляют особую ценность для науки. В отличие от света или заряженных космических лучей, они сохраняют информацию о месте своего рождения и могут доставлять сведения из самых недоступных областей Вселенной.

Считается, что такие нейтрино возникают рядом с мощнейшими космическими ускорителями частиц. Среди возможных источников называют активные ядра галактик, остатки сверхновых, гамма-всплески, магнитары и другие объекты высоких энергий.

С момента первого открытия астрофизических нейтрино в 2013 году ученые пытались понять, как распределяются эти частицы по энергиям. На протяжении многих лет данные хорошо описывались сравнительно простой математической моделью, известной как степенной закон.

Согласно этой модели количество нейтрино постепенно уменьшается с ростом энергии по предсказуемой зависимости. Однако по мере накопления наблюдений начали появляться намеки на более сложную структуру.

Особый интерес вызывал диапазон около 30 тераэлектронвольт. Именно здесь некоторые данные указывали на возможное отклонение от стандартного поведения спектра. Однако статистики долгое время не хватало для окончательных выводов.

Новая работа стала возможной благодаря огромному объему накопленных данных и усовершенствованным методам анализа.

Нейтринная обсерватория IceCube расположена на Южном полюсе и является крупнейшим детектором нейтрино на планете. Для регистрации редких взаимодействий используется кубический километр прозрачного антарктического льда.

Внутри ледяного массива размещены 5160 высокочувствительных оптических датчиков. Когда нейтрино сталкивается с атомом во льду, возникают вторичные заряженные частицы, движущиеся быстрее скорости света в данной среде. В результате появляется слабое голубоватое свечение, известное как черенковское излучение.

Именно эти вспышки света позволяют ученым определять энергию, направление и тип зарегистрированных нейтрино.

Для проверки результатов исследователи использовали два независимых подхода анализа данных. Первый объединял события различных типов, включая длинные следы мюонных нейтрино и компактные каскадные взаимодействия. Второй анализ был сосредоточен на нейтрино, взаимодействующих непосредственно внутри объема детектора.

Несмотря на различия методов, оба исследования привели к одному и тому же выводу.

Оказалось, что энергетический спектр нейтрино содержит отчетливый излом около 30 ТэВ. Ни одна модель с единственным степенным законом не смогла корректно описать наблюдаемые данные.

Статистическая значимость результата превысила уровень 4σ . Для физики это означает чрезвычайно малую вероятность случайного происхождения эффекта — менее одного случая на 16 тысяч.

Наиболее точное описание данных дала модель ломаного степенного закона. Она показывает, что на низких энергиях поток нейтрино уменьшается значительно медленнее, чем на высоких.

Другими словами, спектр меняет свой наклон в районе 30 ТэВ, что свидетельствует о существовании дополнительного физического процесса или нескольких различных популяций источников.

Для ученых этот результат особенно важен, поскольку форма спектра напрямую связана с механизмами рождения нейтрино.

Если спектр имеет излом, это может означать, что разные астрофизические объекты доминируют в различных энергетических диапазонах. Например, часть нейтрино может производиться остатками сверхновых, а более энергичные частицы — активными галактическими ядрами с сверхмассивными черными дырами.

Существует и более интригующая возможность. Некоторые теоретические модели предполагают, что особенности спектра могут быть связаны с новой физикой за пределами Стандартной модели.

Среди обсуждаемых вариантов — процессы распада тяжелых частиц темной материи или взаимодействия, которые пока неизвестны современной физике.

Еще одним важным следствием открытия стало устранение давнего

противоречия между наблюдаемым потоком нейтрино и внегалактическим гамма-излучением.

Старая модель с единым степенным законом предсказывала слишком большое количество низкоэнергетических нейтрино по сравнению с наблюдаемым гамма-фоном Вселенной. Новый спектр существенно уменьшает это расхождение и делает картину происхождения высокоэнергетических частиц более согласованной.

Полученные данные также помогают лучше понять природу космических лучей — заряженных частиц экстремальных энергий, постоянно падающих на Землю из космоса.

Поскольку нейтрино рождаются одновременно с космическими лучами в процессах ускорения частиц, их спектр несет информацию о механизмах работы крупнейших природных ускорителей во Вселенной.

В ближайшие годы ученые планируют провести еще более точные измерения. Для этого используются новые методы обработки данных, улучшенные модели взаимодействий и будущие расширения обсерватории IceCube.

Особое внимание будет уделено совместному анализу нейтринных и гамма-наблюдений. Такой подход позволяет создавать полноценную картину процессов, происходящих в активных галактиках, остатках сверхновых и других космических объектах высоких энергий.

Открытие излома в спектре астрофизических нейтрино показывает, что Вселенная остается гораздо более сложной и интересной, чем предполагали даже самые успешные модели последних лет. Каждая новая частица, зарегистрированная глубоко под антарктическим льдом, помогает ученым постепенно раскрывать тайны самых мощных процессов, происходящих в космосе, и приближает нас к пониманию фундаментального устройства Вселенной.

Ссылка: «Свидетельства о спектральном изломе или искривлении в спектре астрофизических нейтрино от 5 ТэВ до 10 ПэВ» DOI: [10.1103/2gh9-d4q7](https://doi.org/10.1103/2gh9-d4q7).