

# ДЕТЕКТИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ НЕЙТРИНО СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА НЕЙТРИННОМ ТЕЛЕСКОПЕ ICECUBE

## DETECTION OF COSMIC NEUTRINOS OF SUPER-HIGH ENERGY ON THE NEUTRIN TELESCOPE ICECUBE

**Д. С. Василевская., О. М. Бояркин**  
**D. Vasilevskaya, O. Boyarkin**

*Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,  
г. Минск, Республика Беларусь  
ledi.papchenya@gmail.com  
Belarusian State University, ISEI BSU,  
Minsk, Republic of Belarus*

Рассмотрена работа нейтринного телескопа IceCube. Телескоп IceCube является мощным инструментом для поиска темной материи и может выявить физические процессы, связанные с загадочным происхождением частиц сверхвысоких энергии в природе.

The work of the neutrino telescope IceCube is considered. The IceCube telescope is a powerful tool for searching for dark matter and can reveal the physical processes associated with the mysterious origin of ultrahigh-energy particles in nature.

*Ключевые слова:* IceCube, детектор частиц, нейтрино, нейтринный телескоп, астрофизические нейтрино.

*Keywords:* IceCube, particle detector, neutrino, neutrino telescope, astrophysical neutrino.

В этой статье мы анализируем работу нейтринного детектора IceCube. Обсерватория IceCube – это детектор нейтрино, расположенный во льдах Антарктики, конечным объемом более  $1 \text{ км}^3$ . Система создана с целью регистрации нейтрино высоких энергий – почти безмассовых, не имеющих заряда субатомных частиц. Физики давно знали, что разнообразные высокоэнергетические процессы, происходящие в глубоком космосе, должны сопровождаться испусканием нейтрино больших энергий. Долгое время такие нейтрино астрофизического происхождения зарегистрировать не удавалось, пока огромный нейтринный детектор IceCube не дал первые намеки на их обнаружение.

Первые зарегистрированные нейтрино были «земными». Это были нейтрино, вылетающие из работающего ядерного реактора или образующиеся в ускорителях при распаде нестабильных элементарных частиц, например, пи-мезонов. Затем были обнаружены солнечные нейтрино, которые испускаются во время «горения» ядерного топлива в центре Солнца, а также атмосферные нейтрино, рождающиеся в атмосфере при бомбардировке Земли космическими лучами высоких энергий. Изучение солнечных и атмосферных нейтрино сопровождалось загадками, которые были разрешены всего десятилетие назад и привели к открытию нейтринных осцилляций. Должны еще существовать и астрофизические нейтрино, рождающиеся где-то в глубоком космосе и прилетающие к нам издалека.

Астрофизические нейтрино представляют собой принципиально новый инструмент для наблюдений за космосом, за теми высокоэнергетическими процессами, которые там происходят. В отличие от протонов, электронов и других частиц нейтрино не отклоняются магнитными и электрическими полями. Поэтому, определив направление прилета космического нейтрино, сразу же получаем направление на источник. В отличие от света и других форм электромагнитного излучения нейтрино ничем не поглощаются на своем пути, а значит, позволяют увидеть источник, скрытый от оптического наблюдения за толстой газопылевой завесой.

С астрофизическими нейтрино была только одна проблема — их до сих пор не получалось зарегистрировать. Именно это удалось сделать огромному нейтринному детектору IceCube. Первые указания на то, что в данных IceCube действительно есть нейтрино астрофизического происхождения, появились в 2013 — и тогда это стало одним из главных событий в физике за 2013 г. Сейчас, после обработки результатов пяти лет работы детектора, эти намеки превратились в окончательно установленный факт: нейтрино космического происхождения существуют.

Первой целью IceCube была регистрация максимально высокоэнергетических нейтрино, которые могли поместиться в его детекторе. Летом 2013 г. коллаборация сообщила первый громкий результат: в данных первых двух лет работы было обнаружено целых два нейтринных события с энергией больше  $1 \text{ ПэВ}$ . Главная проблема с регистрацией нейтрино астрофизического происхождения состоит в том, что их мало, на порядки меньше, чем атмосферных и, тем более, солнечных нейтрино. К счастью, солнечные нейтрино обладают энергиями в несколько МэВ, и их легко отсеять, если повысить энергетический порог регистрации. С атмосферными нейтрино ситуация посложнее, но и тут есть предсказание, что с ростом энергии поток атмосферных нейтрино должен спадать быстрее, чем космических. Поэтому если подняться еще на несколько порядков по энергии и отбирать только нейтрино с энергией несколько десятков ТэВ и выше, то тогда атмосферных нейтрино почти не останется, и можно будет впервые прощупать нейтрино астрофизического происхождения. Напомним,

что энергия протонов на Большом адронном коллайдере составляет всего 7 ТэВ, а тут речь идет про нейтрино в десятки раз большей энергии.

Нейтрино с такой большой энергией оставит в детекторе очень яркий сигнал. Нейтрино словно ударяет с огромной силой по какому-то атому в рабочем объеме детектора. Это приводит к большому энерговыделению — рождению многочисленных фотонов и электрон-позитронных пар, свечение от которых регистрируется фотоумножителями (ФЭУ). Условно говоря, от удара нейтрино материал детектора на мгновение вспыхивает ярким светом. Проблема только в том, что чем ярче эта вспышка, тем больше ее пространственный размер. Для энергий нейтрино в сотни ТэВ или даже ПэВ этот размер составляет сотни метров. В маленький детектор такой сигнал просто не поместится. Поэтому для того, чтобы отличить нейтринные события с энергией 1 ПэВ и 1 ТэВ — то есть четко различать астрофизические и атмосферные нейтрино, — требуется установка размером порядка километра. Большой размер детектора нужен также и для того, чтобы повысить вероятность их регистрации. Если теоретические модели процессов рождения астрофизических нейтрино верны, при таких масштабах можно рассчитывать на поимку как минимум нескольких астрофизических нейтрино в год.

Именно эти соображения лежали в основе проекта нейтринного детектора IceCube. Чувствительные фотоэлементы в IceCube организованы в виде гирлянд, которые спускались в свежепробуренные шахты на глубину до двух с половиной километров, где они быстро вмерзали в окружающий лед. IceCube состоит из 86 таких цепочек по 60 ФЭУ в каждой, а сами цепочки расположены на расстоянии 125 метров друг от друга. Кроме этого, в центре детектора есть небольшая область с более плотной «застройкой» (установка Deep Core), а сверху над IceCube расположен датчик космических лучей IceTop. Этот датчик позволяет отличить одиночное космическое нейтрино от нейтрино, рожденного в атмосфере: в первом случае мощный нейтринный сигнал внутри IceCube происходит в одиночестве, а во втором случае IceTop зафиксирует совпадающий по времени широкий ливень вторичных частиц.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙТРИННОГО ДЕТЕКТОРА RED-100

### THEORETICAL ASPECTS OF APPLICATION OF NEUTRINO RUSSIAN EMISSION DETECTOR-100

**В. А. Горская, О. М. Бояркин**  
**V. Gorskaya, O. Boyarkin**

*Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,  
г. Минск, Республика Беларусь  
vavaka-1@mail.ru*

*Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus*

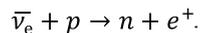
Обсуждается применения нейтронных детекторов для мониторинга атомных электростанций и представлены основные цели нейтринного детектора RED-100.

This report discusses the applications of neutron detectors for monitoring nuclear power stations, and the main goals of RED-100 neutrino detector are presented.

*Ключевые слова:* нейтронный детектор, реакторное антинейтрино, когерентное рассеяние.

*Keywords:* neutron detector, reactor antineutrino, coherent scattering.

Возможность обнаружения антинейтрино обуславливается слабым ядерным взаимодействием. На данный момент, для обнаружения антинейтрино используется эффект обратного бета-распада:



Однако существует и альтернативный подход, основанный на использовании эффекта когерентного рассеяния антинейтрино на тяжелых ядрах. Когерентное рассеяние нейтрино на ядрах — фундаментальный физический процесс, до сих пор не наблюдавшийся на практике, несмотря на то, что он имеет большое значение для описания эволюции сверхновых звезд и Вселенной в целом. Сечение рассеяния будет описываться формулой:

$$\frac{d\sigma}{dT}(E, T) = \frac{G_F^2}{2\pi} M \left[ 2 - \frac{2T}{E} + \left(\frac{T}{E}\right)^2 - \frac{MT}{E^2} \frac{Q_W^2}{4} F^2(Q^2) \right]$$

Основные параметры: E — энергия налетающего антинейтрино; T — кинетическая энергия ядра отдачи; M — масса ядра; F — ядерный форм-фактор. Это рассеяние проявляется, когда длина волны антинейтрино соизмерима с размерами атомного ядра. Вероятность протекания пропорциональна квадрату числа нейтронов в ядре.

Для исследований был построен детектор RED-100, который способен контролировать содержания  $^{239}\text{Pu}$  в активной зоне реактора. RED-100 — двухфазный эмиссионный детектор на жидком ксеноне, у которого высокий