

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Анализ эффекта тени Солнца в потоке атмосферных мюонов с
помощью телескопа ANTARES»

Выполнил студент
213м группы
Романов А. Н.

подпись студента

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., доцент Широков Е. В.

подпись научного руководителя

Допущена к защите
Зав. кафедрой _____

подпись зав. кафедрой

Москва
2020

Содержание

Содержание	2
1 Введение	3
2 Космическое излучение	5
2.1 Общие сведения	5
2.2 Предел Грайзена - Зацепина - Кузьмина	6
2.3 Астрофизические нейтрино	7
3 Глубоководные нейтринные телескопы	11
3.1 Принцип работы	11
3.2 Излучение Вавилова-Черенкова	11
3.3 Нейтринный телескоп IceCube	12
3.4 Байкальский нейтринный телескоп	15
3.5 Проект KM3NeT	16
4 Нейтринный телескоп ANTARES	19
5 Анализ тени Солнца	23
5.1 Определение оптимальных ограничений на параметры ка- чества восстановленных треков	23
5.2 Угловая разрешающая способность телескопа и статисти- ческая значимость результатов	30
5.3 Поиск возможного смещения центра тени Солнца	34
6 Заключение	38
Список литературы	39

1 Введение

Нейтрино - электрически нейтральная фундаментальная частица с полужелым спином, участвующая только в слабом и гравитационном взаимодействиях и относящаяся к классу лептонов. В настоящее время известно три аромата нейтрино: электронное, мюонное и тау-нейтрино, а также соответствующие им античастицы.

Появление такого объекта, как нейтрино, в физике частиц, неразрывно связано с явлением бета-распада. Этот распад обладает известной особенностью - непрерывным спектром энергий электронов, что невозможно при двухчастичном распаде. Единственным способом устранить противоречие с законами сохранения было введение новой частицы, обладавшей малой массой и электрически нейтральной. Первым существование нейтрино предложил В. Паули в 1930 г. Для того чтобы проверить гипотезу Паули, необходимо было обнаружить нейтрино экспериментально. Однако, в следствие крайне низкого сечения взаимодействия нейтрино с веществом, это удалось осуществить лишь в 1956 г. в результате эксперимента Ф. Райнеса и К. Коуэна [1]. В нем было зарегистрировано антинейтрино с помощью реакции:



Источником антинейтрино служил атомный реактор, в котором они образуются в большом количестве. Таким образом, в результате эксперимента, гипотеза Паули была подтверждена.

В 1962 году Л. Ледерманом, М. Шварцом и Д. Стейнбергером было открыто мюонное нейтрино в Брукхейвенской национальной лаборатории. В этом эксперименте использовался пучок протонов, направленный на бериллиевую мишень. В результате взаимодействия образуется большое количество пионов, которые распадаются на мюоны и мюонные нейтрино [2]. Существенно позднее, в 2001 году, в эксперименте DONUT

было зарегистрировано тау-нейтрино [3].

Внегалактические нейтрино впервые были зарегистрированы в 1987 году - при вспышке сверхновой в Большом Магеллановом Облаке. В 2013 году об уверенной регистрации потока астрофизических нейтрино сообщила коллаборация IceCube [4]. На Рис. 1 представлено распределение направлений прилета высокоэнергетических нейтрино, зарегистрированное телескопом IceCube.

Современные представления о свойствах нейтрино могут быть найдены в [5].

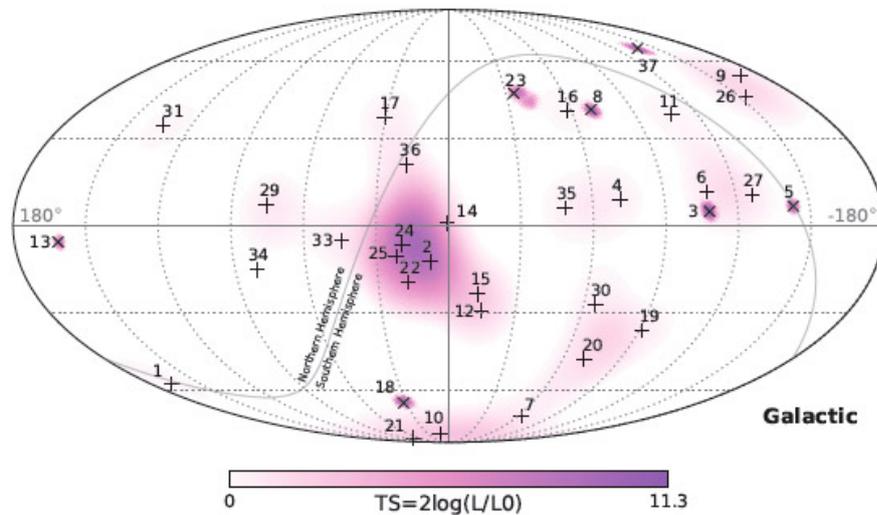


Рисунок 1: Распределение направлений прилета высокоэнергетических нейтрино в галактических координатах. Центр карты соответствует центру Млечного Пути, экватор показывает плоскость галактики.

2 Космическое излучение

2.1 Общие сведения

Основными источниками астрофизической информации могут быть первичные протоны, гамма-кванты и нейтрино. Однако, при энергиях, больших нескольких ТэВ, фотоны взаимодействуют с инфракрасным и микроволновым фоном, образуя электрон-позитронные пары. Протоны и электроны из-за наличия заряда подвержены влиянию магнитных полей в космическом пространстве, что не позволяет проследить их траекторию и установить их источник. Кроме того, космические магнитные поля настолько сложны и разнообразны, что распределение высокоэнергетических протонов вблизи Земли оказывается практически изотропным. При сверхвысоких энергиях заряженных частиц эта изотропность исчезает, но при этом с энергиями порядка 10^{21} эВ они начинают взаимодействовать с микроволновым фоном, образуя пионы (эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГЗК) [6]).

Энергетический спектр космических лучей представлен на Рис. 14.

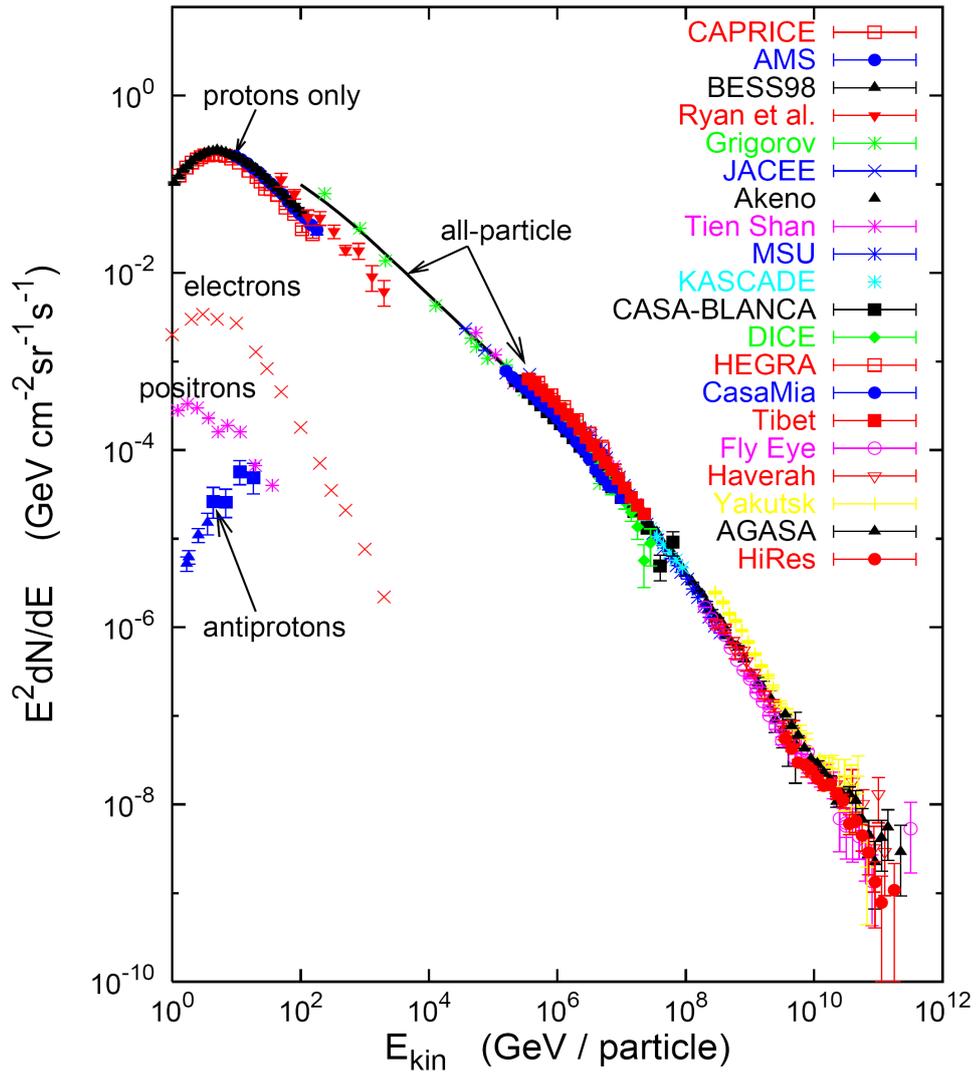


Рисунок 2: Энергетический спектр космических лучей.

2.2 Предел Грайзена - Зацепина - Кузьмина

Энергетический спектр частиц космического излучения экспоненциально уменьшается при энергии $> 5 \times 10^{19}$ эВ. При такой энергии протоны начинают взаимодействовать с фотонами реликтового излучения, рождая пионы:

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \begin{cases} p + \pi^0 \\ n + \pi^+ \end{cases} \quad (2)$$

Во время этих процессов протоны теряют энергию. Средняя длина потери энергии составляет около 50 Мпк. Этот эффект был впервые описан Грайзенем, Зацепиным и Кузьминым в 1966 году [6].

2.3 Астрофизические нейтрино

Нейтринная астрономия является новым и уникальным методом изучения Вселенной. Поскольку нейтрино участвуют только в слабом и гравитационном взаимодействиях, они могут покидать экстремально плотные ядра источников и доносить информацию о процессах, происходящих внутри. Также, из-за крайне низкого сечения взаимодействия (около 10^{-20} барн для энергий порядка МэВ) нейтрино могут преодолевать космологические расстояния без изменения траектории. Эти свойства делают нейтрино дополнительным источником информации о процессах, происходящих во Вселенной, наряду с протонами, гамма-квантами и гравитационными волнами [7]. На Рис. 3 представлен спектр нейтрино различного происхождения [8].

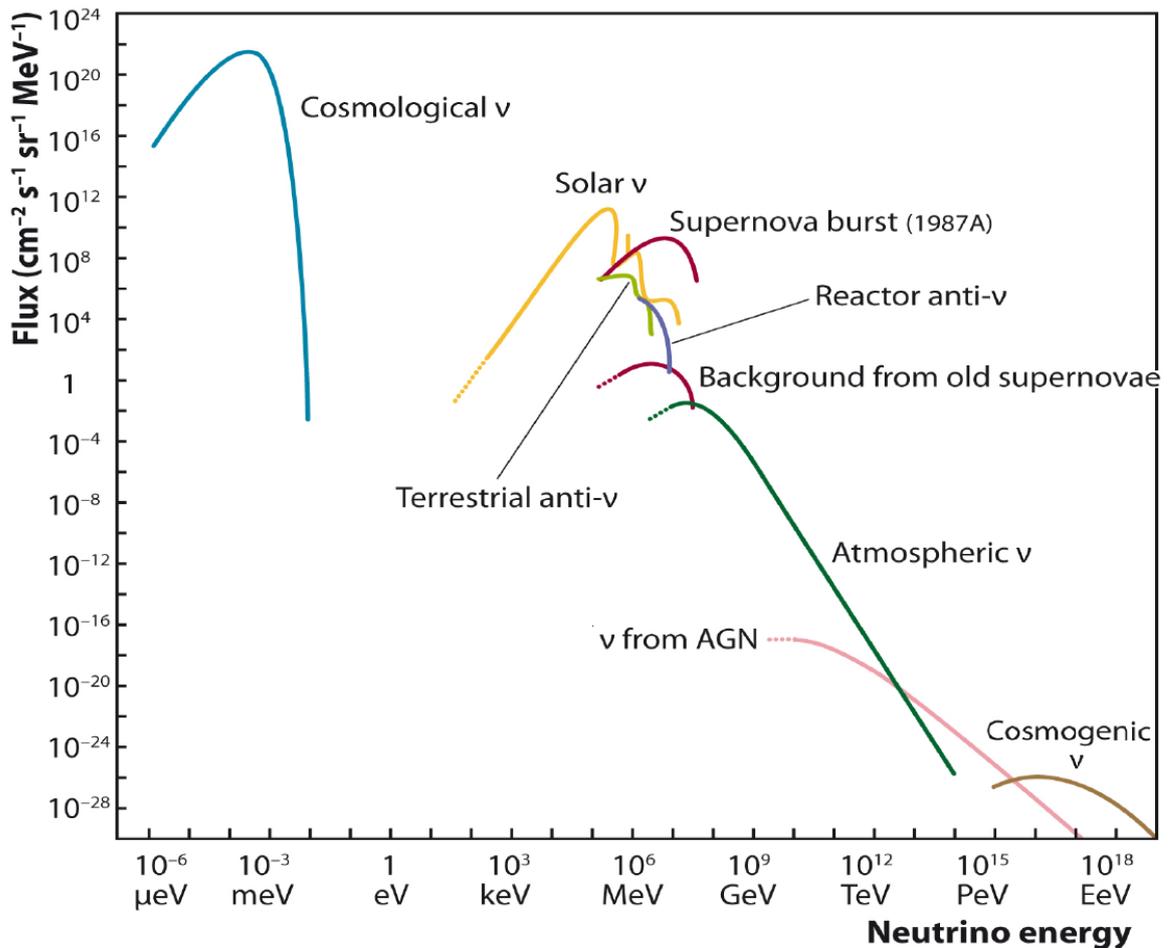


Рисунок 3: Спектр нейтрино различного происхождения.

Среди возможных источников высокоэнергетических нейтрино можно выделить следующие [9]:

- Вспышки гамма излучения (Gamma Ray Bursts - GRBs)

Вспышки гамма излучения являются одним из наиболее вероятных источников нейтрино высокой энергии [10]. Образование вспышек связывают со слиянием двойных звёзд, либо пары нейтронная звезда - чёрная дыра, или же с коллапсом сверхмассивных звёзд.

- Взрывы сверхновых

При взрывах сверхновых выделяется большое количество энергии, значительная часть которой уносится, ускоряющимися в электро-

магнитных полях протонами и другими заряженными частицами. Одновременно, к источникам нейтрино могут относиться и остатки сверхновых [11], которые представляют собой газопылевые образования, получившиеся при взрыве сверхновых, десятки или сотни лет до момента наблюдения. Наиболее яркие из них имеют спектр фотонов вплоть до десятков ТэВ.

- Активные ядра галактик (Active Galactic Nuclei - AGN)

AGN представляет собой спиральную галактику, в центре которой находится массивная чёрная дыра ($10^7 - 10^9$ солнечных масс). Из-за большой удалённости от наблюдателя и, как следствие, сильного снижения потока частиц по сравнению с исходным, активные ядра галактик представляют меньший интерес для нейтринных телескопов.

- Нейтрино, связанные с распространением космических лучей

Космические лучи сверхвысокой энергии могут рождать нейтрино во взаимодействиях с реликтовым излучением [12]. Данный механизм является одним из наиболее вероятных источников высокоэнергетических нейтрино и наиболее простым для предсказания. Кроме того, космические лучи взаимодействуют с водородом, сконцентрированным в плоскости галактики, рождая нейтрино высокой энергии [13]. Также предполагается, чтобы сами нейтрино сверхвысоких энергий, испущенные космическими ускорителями, могут взаимодействовать с реликтовыми нейтрино, рождая Z -бозоны: $\nu + \nu_b \rightarrow Z$. Распад Z -бозонов приводит к появлению адронных струй, служащих источником нейтрино меньших (относительно начальных) энергий. Это, так называемый, механизм Z -всплеска [14].

- Распад Темной Материи

Несоответствие наблюдаемой массы гравитационно связанных объ-

ектов (например, галактик) с их наблюдаемыми параметрами, а также несоответствие наблюдаемых космологических параметров с наблюдаемыми астрофизическими данными средней плотности Вселенной (дефицит наблюдаемой массы), может быть объяснён наличием массы, недоступной астрономическим наблюдениям. Эта масса, вероятно, присутствует в виде реликтовых частиц Большого Взрыва (WIMPs, частицы Калуцы-Клейна и т.д.). Аннигиляция этих частиц может происходить с рождением нейтрино сверхвысоких энергий [15].

- Топологические дефекты

Существует также теория появления нейтрино из распада так называемых топологических дефектов, частиц с массами более 10^{20} эВ, оставшихся с момента рождения Вселенной [16]. Существуют теоретические предсказания частицы под названием нейтралино [17], подверженной только гравитационному взаимодействию, и потому концентрирующейся в центре Земли и Солнца, а затем распадающейся с испусканием нейтрино.

3 Глубоководные нейтринные телескопы

3.1 Принцип работы

В силу свойств слабого взаимодействия, прямое детектирование атмосферных и астрофизических нейтрино невозможно. Нейтрино должны провзаимодействовать со средой телескопа, например, с водой или льдом, рождая заряженные частицы [18], которые могут быть обнаружены оптическими датчиками.

Нейтрино трех ароматов ν_i , электронное, мюонное и тау-нейтрино (ν_e, ν_μ, ν_τ), взаимодействуют с веществом посредством заряженных (СС) и нейтральных токов (НС). Калибровочные бозоны во взаимодействиях с заряженными токами - W^\pm бозоны, с нейтральными - Z^0 . Эти взаимодействия описываются следующей реакцией:

$$\nu_i + N \rightarrow l + X, \quad (3)$$

в которых нейтрино ν_i взаимодействует с нуклоном N , рождая лептон l и другую частицу X . При движении заряженного лептона в прозрачной среде со скоростью большей скорости света в этой среде возникает черенковское излучение, описанное ниже, которое может быть зарегистрировано фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) телескопа.

3.2 Излучение Вавилова-Черенкова

В прозрачных средах частицы высоких энергий, такие как электроны, мюоны и тау-лептоны, могут достигать скоростей превышающих скорость света в этих средах.

$$v > \frac{c}{n}, \quad (4)$$

v - это скорость частицы, c - скорость света в вакууме и n - показатель преломления среды. Черенковское излучение [19] является совмест-

ным излучением множества атомов среды, расположенных вдоль траектории движения частицы и поляризованных её электрическим полем. Таким образом, непосредственно излучает не частица, а среда, в которой движется частица. Волновой фронт этого излучения представляет собой поверхность конуса, вершиной которого является частица, а осью - её траектория (Рис. 4). Угол раствора конуса θ фиксирован и определяется скоростью частицы и свойствами среды: $\cos\theta = \frac{1}{\beta n}$, где $\beta = \frac{v}{c}$.

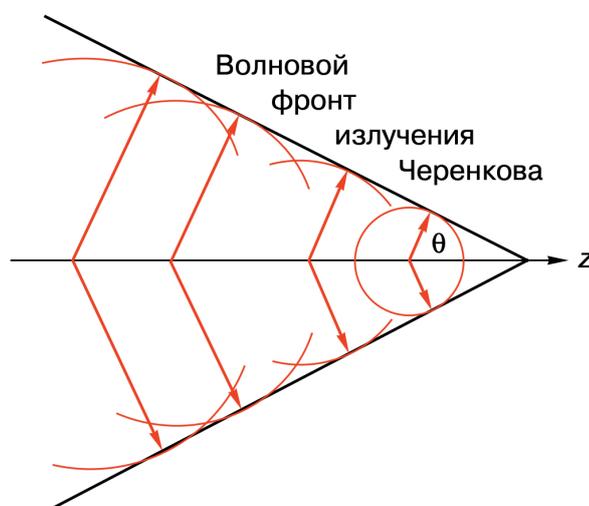


Рисунок 4: Фронт волны черенковского излучения

3.3 Нейтринный телескоп IceCube

Нейтринный телескоп IceCube [25] расположен на Южном полюсе во льду на глубине от 1500 до 2500 метров. Во время строительства IceCube было пробурено 86 скважин, в которых были размещены струны. На каждой струне располагается 60 цифровых оптических модулей.

Схема оптического модуля телескопа IceCube изображена на Рис. 5.

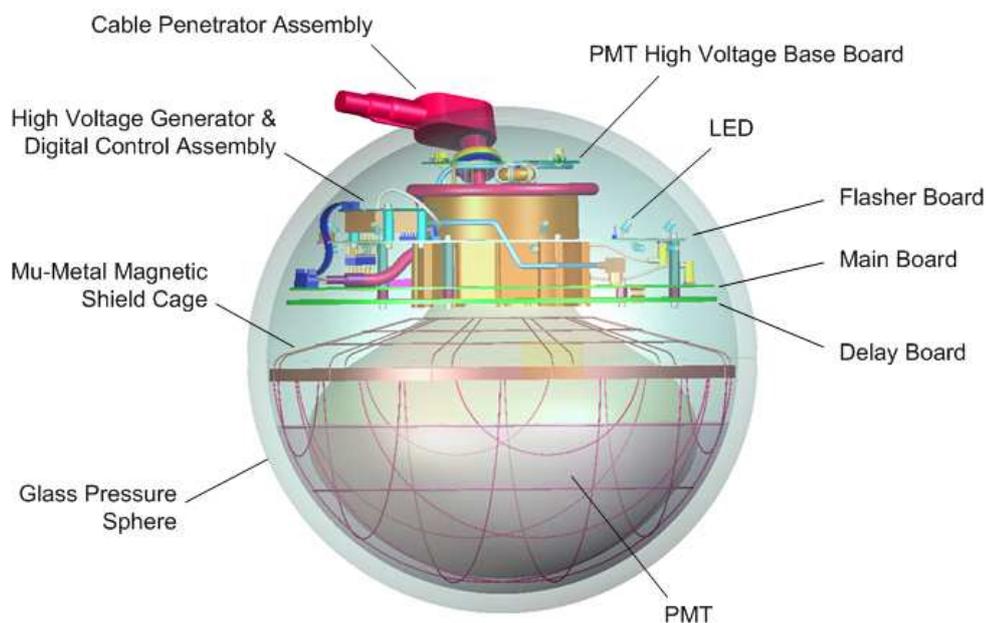


Рисунок 5: Схематичное изображение цифрового оптического модуля телескопа IceCube.

Для регистрации черенковского света внутри модуля располагается фотоумножитель. Он и другие инструменты, которые, например, используются для калибровки, такие как светодиоды, окружены толстым стеклом, чтобы защитить их от высокого давления.

В 2007 году детектор IceCube работал с 22 струнами. Каждый следующий год устанавливались новые струны, и детектор расширялся. В своей окончательной конфигурации с 86 струнами детектор используется с мая 2011 года. Более компактная группа оптических модулей называется DeepCore и расположена в нижней части детектора IceCube [26]. Основной целью DeepCore является обнаружение нейтрино низких энергий с энергетическим порогом 10 ГэВ. DeepCore может использоваться для поиска темной материи и наблюдения осцилляций атмосферных нейтрино. Схема нейтринной обсерватории IceCube изображена на Рис. 6. Также, на Рис. 6 показаны DeepCore, AMANDA и IceTop. AMANDA является предшественником IceCube, первые 80 струн которой были установлены на глубине от 1500 до 2000 метров в 1995 году [21]. IceTop - это детектор

космических лучей [27]. Лаборатория IceCube расположена на поверхности, в центре 86 струн.

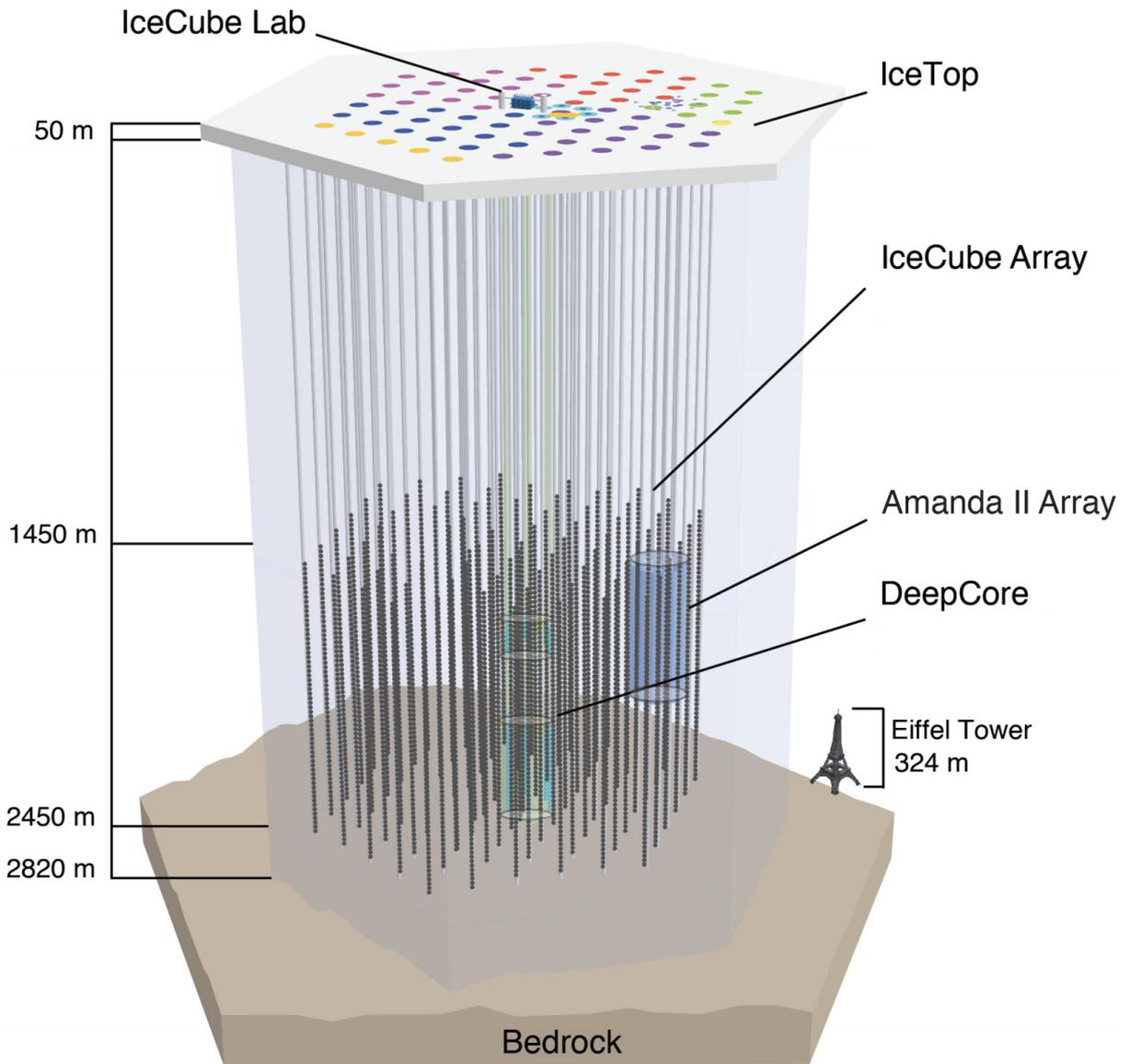


Рисунок 6: Схема устройства нейтринного телескопа IceCube

3.4 Байкальский нейтринный телескоп

Нейтринный телескоп НТ1000 на озере Байкал [24] нацелен на решение широкого круга задач астрофизики, космологии и физики элементарных частиц - поиска локальных источников нейтрино, исследование диффузного потока нейтрино, поиска проявления темной материи, поиска магнитных монополей и других гипотетических частиц. Концептуально НТ1000 представляет собой трехмерную решетку фотодетекторов, расположенную на глубине 800 - 1300 метров и заполняющую объем порядка кубического километра. НТ1000 будет иметь гибкую модульную структуру, формируемую из независимых кластеров вертикальных гирлянд с оптическими модулями. С учетом оптических свойств и уровня собственного свечения водной среды озера Байкал, конфигурация телескопа должна обеспечить высокую эффективность регистрации мюонов с энергией выше 10 ТэВ и ливней с энергией выше 100 ТэВ, генерируемых при взаимодействии нейтрино с веществом.

В настоящее время нейтринный телескоп НТ-1000 интенсивно расширяется. Схема телескопа изображена на Рис. 7.

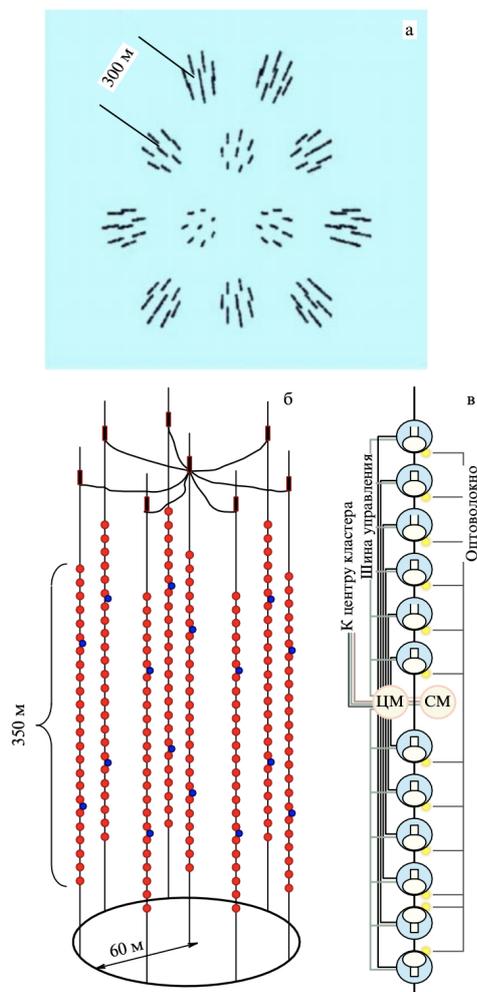


Рисунок 7: Схематичное изображение нейтринного телескопа НТ-1000 на озере Байкал: (а) - вид сверху; (б) - кластер телескопа (в) - струна с оптическими модулями.

3.5 Проект KM3NeT

KM3Net - это исследовательская инфраструктура, разрабатывающая нейтринные телескопы следующего поколения [28]. Основными задачами коллаборации KM3NeT являются:

- Обнаружение и последующее исследование источников высоко энергетических нейтрино.
- Определение иерархии масс нейтрино.

Для достижения этих целей, коллаборация КМЗНеТ строит новую исследовательскую инфраструктуру, состоящую из сети глубоководных нейтринных телескопов в Средиземном море. Были выбраны 2 места, удовлетворяющие требованиям: Тулон (Франция) и Капо Пассеро (Италия). Инфраструктура будет состоять из трех, так называемых, строительных блоков. Строительный блок содержит 115 стрингов, каждый стринг состоит из 18 оптических модулей и каждый модуль содержит 31 фотоэлектронный умножитель. Таким образом, каждый строительный блок представляет собой 3-х мерный массив из фотодатчиков, которые используются для детектирования черенковского излучения, вызванного релятивистскими частицами, образующимися при взаимодействии нейтрино с веществом. В совокупности эти строительные блоки называются ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss). Один строительный блок будет предназначен для точного измерения осцилляций атмосферных нейтрино. Этот строительный блок называется ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss). ARCA будет располагаться в Капо Пассеро, ORCA в Тулоне. Благодаря универсальной конструкции КМЗНеТ, в технической реализации ARCA и ORCA практически идентичны. На Рис. 8 представлены участники международной коллаборации КМЗНеТ и расположение телескопа.

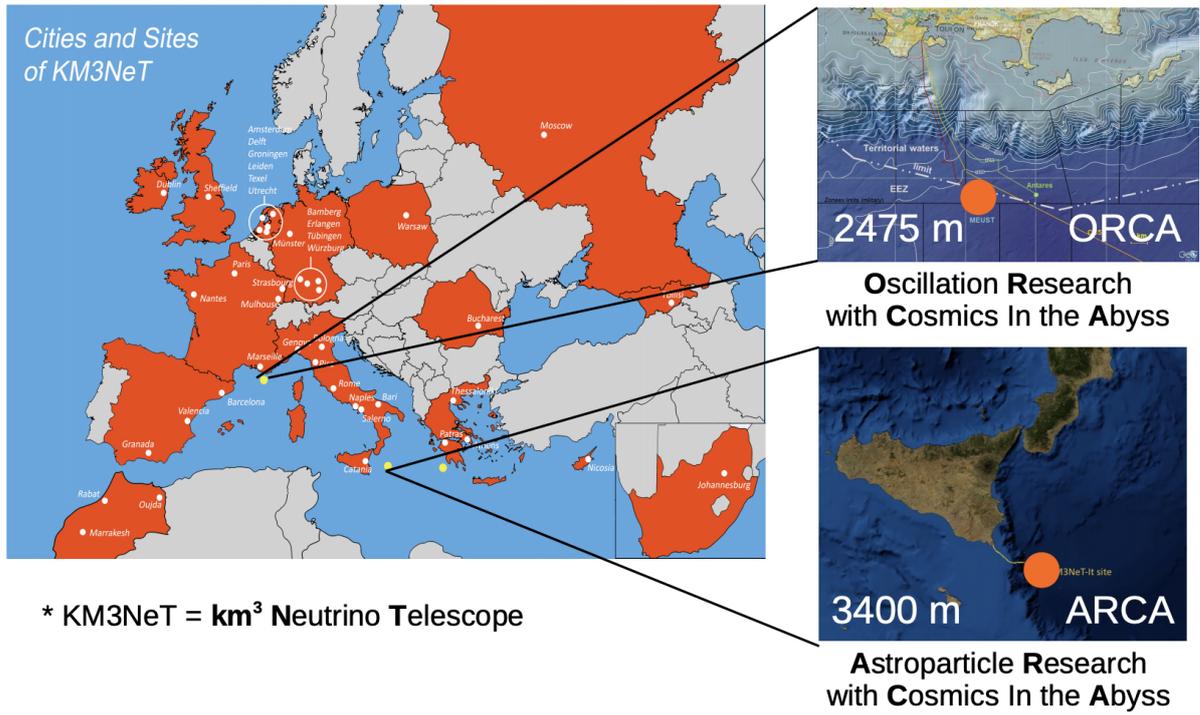


Рисунок 8: Участники коллаборации KM3NeT и расположение телескопа.

4 Нейтринный телескоп ANTARES

Глубоководный нейтринный телескоп ANTARES [29] работает уже более 10 лет. Он расположен в Средиземном море, в 40 км от берега Тулона (Франция). Детектор состоит из 12 вертикальных элементов, так называемых линий, оснащенных 10-дюймовыми фотоумножителями, которые регистрируют черенковское излучение (Рис. 9). Длина одной линии составляет 450 м. Каждая линия состоит из 25 этажей с тремя ФЭУ внутри стеклянных сфер - оптических модулей, устойчивых к высокому давлению. Самые нижние оптические модули расположены в 100 м над морским дном. Расстояние между этажами составляет 14.5 м, а расстояние между двумя соседними линиями - 65 м. ФЭУ обращены вниз на 45° , чтобы оптимизировать регистрацию излучения света от частиц, летящих снизу вверх. Линии подключены к распределительной коробке, которая соединяет детектор с береговой станцией через электрооптический кабель длиной около 40 км.

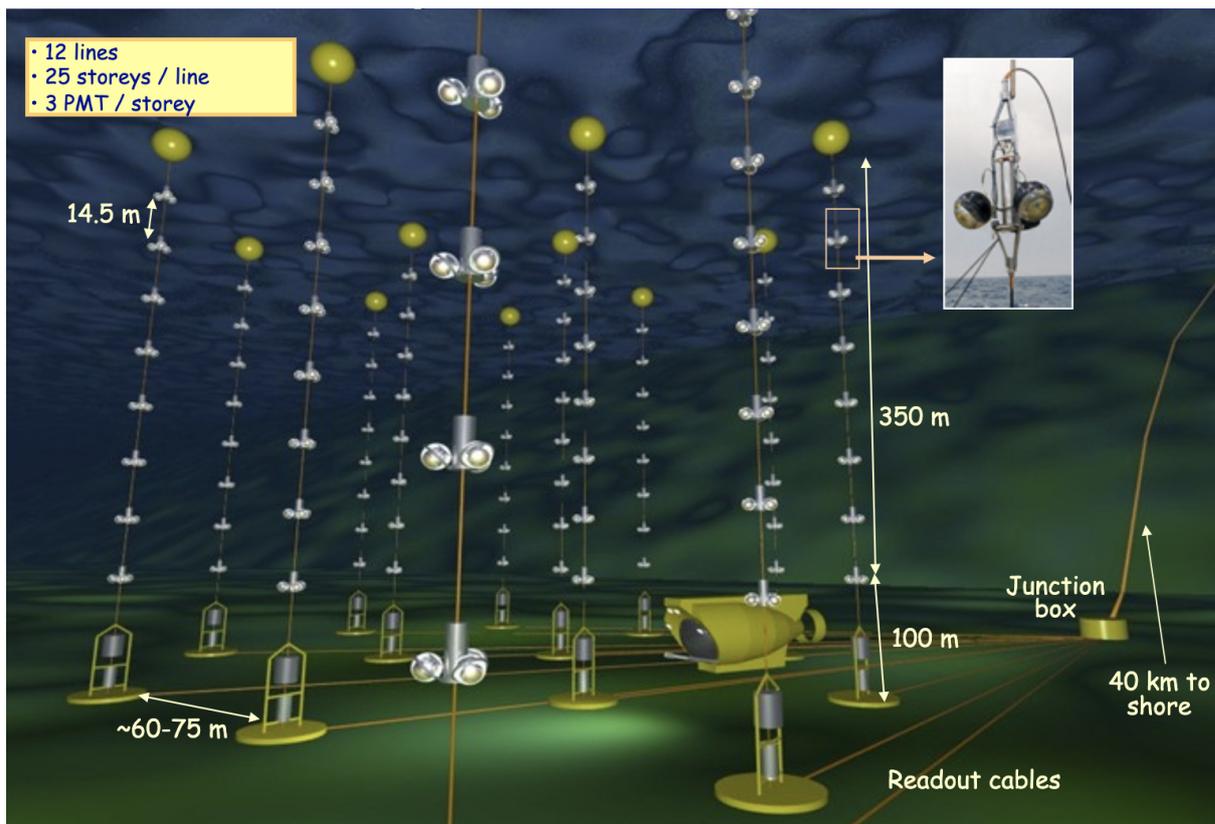


Рисунок 9: Схема нейтринного телескопа ANTARES.

Фотоны, зарегистрированные ФЭУ, генерируют сигнал (хит) с соответствующей информацией о заряде и времени. Набор сигналов, обнаруженных в определенном временном окне, называется событием. Если сигналы одного события удовлетворяют причинно-следственной связи в пространстве-времени, событие идентифицируется как мюонное [30, 31]. Реконструкция треков частиц основана на функции плотности вероятности времени обнаружения фотонов ФЭУ.

Телескоп находится в рабочем состоянии в течение некоторых циклов. Эти циклы называются ранами (от английского run – пробег). Они могут иметь различную протяжённость во времени, но в среднем длительность одного рана составляет 3-4 часа работы. Существует некоторая классификация ранов. Они подразделяются на физические (physics runs), калибровочные (calibration runs) и пустые (transient runs). О первом типе говорят, когда речь идёт о нормальной работе детектора (т.е.

происходит регистрация мюонов); вторые используются для калибровки - проверка работы ФЭУ при помощи лазеров, установленных на дне, фонарей, а также при "нефизических" параметрах работы; последний тип выставляется в случае невозможности сбора данных детектором, например, при высокой биоактивности.

Система сбора данных основана на концепции "все данные на берег" [32]. В этом режиме все сигналы от ФЭУ, которые превышают предварительно установленный порог (обычно 0,3 одиночных фотоэлектрона), оцифровываются и передаются на берег, где они обрабатываются в режиме реального времени. Поток данных варьируется от пары Гб/с до нескольких десятков Гб/с в зависимости от уровня биоломинесцентной активности.

ANTARES - международный проект. Он представляет собой коллаборацию учёных из многих европейских стран - Германии, Голландии, Испании, Италии, России, Румынии и Франции (Рис. 10). С 2005 года научная группа МГУ, состоящая из сотрудников Научно-исследовательского института ядерной физики (НИИЯФ) и физического факультета Московского Государственного Университета, принимает участие в работах связанных с проектированием, созданием и обработкой данных от нейтринных телескопов большого объёма. С лета 2009 г. научная группа МГУ является официальным участником международной коллаборации ANTARES.

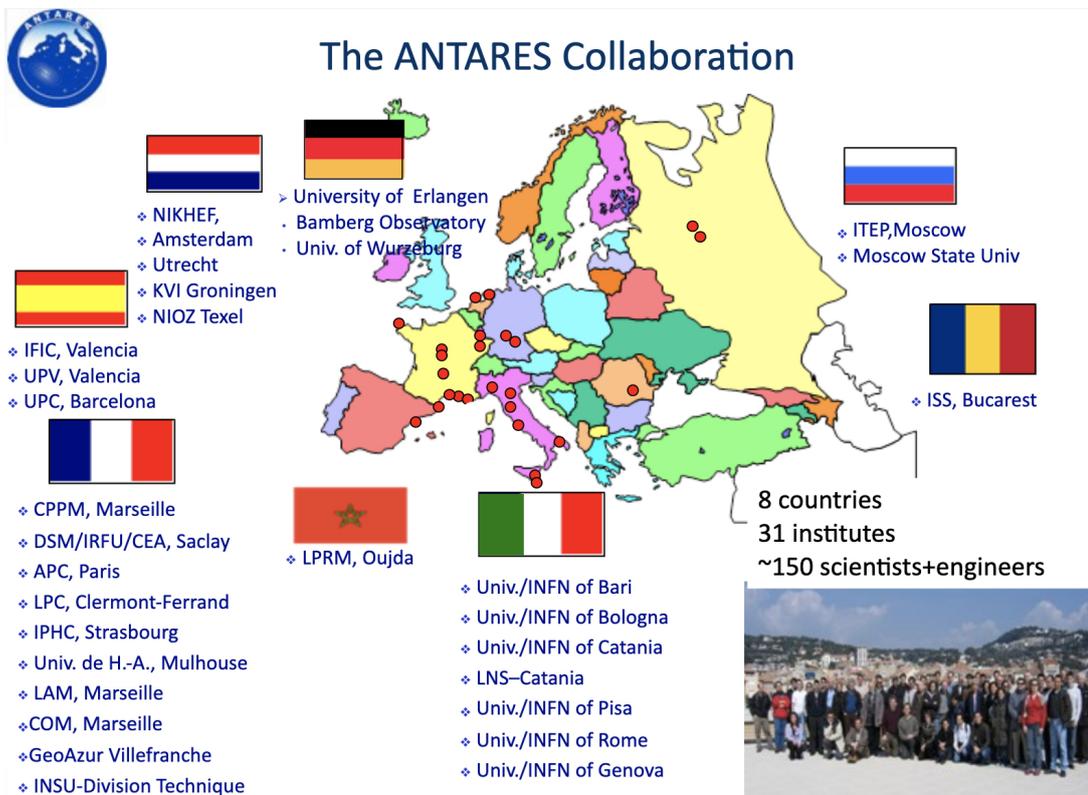


Рисунок 10: Участники международной коллаборации ANTARES.

5 Анализ тени Солнца

Глубоководный нейтринный телескоп ANTARES, в первую очередь, предназначен для обнаружения точечных источников нейтрино, поэтому необходима оценка его угловой разрешающей способности. При взаимодействии первичных космических лучей в атмосфере рождаются вторичные атмосферные мюоны, которые могут быть зарегистрированы телескопом ANTARES. Однако, Солнце поглощает часть первичных космических лучей, что приводит к дефициту в потоке атмосферном мюонов, который, в среднем, является изотропным. Подобный анализ проводился несколькими коллаборациями, в частности: CYGNUS [33], TIBET [34], BUST [35], CASA [36], MACRO [37], SOUDAN [38], ARGO-YBG [39], HAWC [40], а также IceCube [41]. Анализ тени Луны с помощью телескопа ANTARES был опубликован в [42].

5.1 Определение оптимальных ограничений на параметры качества восстановленных треков

Качество восстановленных треков мюонов определяется параметром Λ . Также, при реконструкции траектории мюона, вычисляется угловая ошибка в определении направления его прилета - β [43]. Для нахождения наиболее оптимальных ограничений на параметры Λ и β было использовано Монте Карло (МК) моделирование.

Моделирование включает в себя мюонные события, которые генерируются в воде на глубине нахождения детектора с помощью кода MUPAGE [44]. В основе MUPAGE лежат параметрические формулы, позволяющие рассчитать поток и угловое распределение пучков мюонов с учетом кратности и энергетического спектра. Мюоны генерируются на поверхности цилиндра, который окружает активный объем детектора высотой 650 м и радиусом 290 м. Моделирование включает в себя распространение мюонов в инструментальном объеме телескопа, индуциро-

ванное излучение черенковского света, распространение света на оптические модули и оцифрованный отклик ФЭУ [45]. Чтобы воспроизвести изменчивость во времени условий функционирования детектора, моделирование подразделяется на циклы (раны, описанные выше), соответствующие фактическим периодам сбора данных телескопом (run-by-run МК моделирование [46]). Для того чтобы моделирование осуществлялось за разумное время вычислений, статистика МК составляет 1/3 от реальной статистики. Для увеличения статистики моделирования были использованы, так называемые, дополнительные зоны. Поскольку генерация мюонов производится со всех направлений, можно использовать области неба, в которых в данный момент времени нет Солнца (эти области являются, фактически, фоновыми). Дополнительные зоны получаются искусственно путем смещения положения Солнца в моделируемых данных на 2, 4, 6, 8, 12, 14, 16, 18, 20 и 22 часа. Тем самым, полная статистика МК с учетом 11 дополнительных зон и зоны, содержащей реальное расположение Солнца, в 4 раза больше, чем статистика реальных данных. Данный метод схематично проиллюстрирован на Рис. 11.



Рисунок 11: Схематичная иллюстрация метода дополнительных зон.

Для определения наиболее оптимальных ограничений на параметры качества восстановленных треков использовался метод проверки статистических гипотез. Нулевая гипотеза H_0 соответствует отсутствию эффекта тени Солнца в моделируемых данных; гипотеза H_1 соответствует наличию этого эффекта. Затем, строятся два набора данных МК моделирования, соответствующие двум гипотезам (наборы данных S_0 и S_1 , соответственно). В наборе S_1 эффект наличия тени получается путем удаления всех мюонных событий, сгенерированных внутри диска Солнца с радиусом 0.26° . Для каждого набора данных, S_0 и S_1 , строится гистограмма с распределением событий в зависимости от углового расстояния от центра Солнца δ , до максимального расстояния равного 10° . Такая гистограмма подразделяется на 25 бинов, размер одного бина $\Delta\delta = 0.4^\circ$. Каждый бин соответствует концентрическому кольцу с увеличивающимся радиусом, центр которого расположен в центре Солнца. Содержимое каждого бина делится на соответствующую площадь кольца. Таким об-

разом, получается гистограмма плотности событий.

Предполагая, что совокупность событий в каждом бине соответствует распределению вероятности Пуассона, рассчитываются статистические функции λ_0 и λ_1 , соответствующие двум гипотезам, описанным выше:

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= \Delta\chi_{H_0}^2, \\ \lambda_1 &= \Delta\chi_{H_1}^2,\end{aligned}\tag{5}$$

где

$$\begin{aligned}\Delta\chi_{H_0}^2 &= \sum_{i=1}^{N_{bins}} \left[\frac{(n_0^i - \mu_i)^2}{\sigma_{\mu,i}^2} - \frac{(n_0^i - \nu_i)^2}{\sigma_{\nu,i}^2} \right] \\ \Delta\chi_{H_1}^2 &= \sum_{i=1}^{N_{bins}} \left[\frac{(n_1^i - \mu_i)^2}{\sigma_{\mu,i}^2} - \frac{(n_1^i - \nu_i)^2}{\sigma_{\nu,i}^2} \right],\end{aligned}\tag{6}$$

где μ_i (ν_i) - это количество событий в i -ом бине согласно гипотезе H_1 (H_0); $\sigma_{\mu,i}$ ($\sigma_{\nu,i}$) - погрешность в i -ом бине согласно гипотезе H_1 (H_0). Для оптимизаций ограничений на параметры восстановленных треков было сгенерировано 10^6 случайных распределений плотностей событий, следующих распределению Пуассона со средним значением μ_i (ν_i), тем самым получая значения n_1 (n_0) для каждого такого псевдо-эксперимента.

Проверка статистических гипотез была проведена для различных наборов ограничений на Λ и β , чтобы определить - какой набор ограничений максимизирует чувствительность детектора к обнаружению тени Солнца (Рис. 12). Было обнаружено, что чувствительность практически постоянна для: $-6. < \Lambda_{cut} < -5.9$ и $0.6^\circ < \beta_{cut} < 1.5^\circ$. Ожидаемая статистическая значимость составляет 3.4σ . Поскольку поток атмосферных мюонов является неоднородным, распределение мюонов зависит от высоты Солнца над горизонтом в момент обнаружения частицы. Чтобы исключить события близкие к горизонту, было введено ограничение на угол возвышения Солнца: $\theta_{Sun} > 15^\circ$.

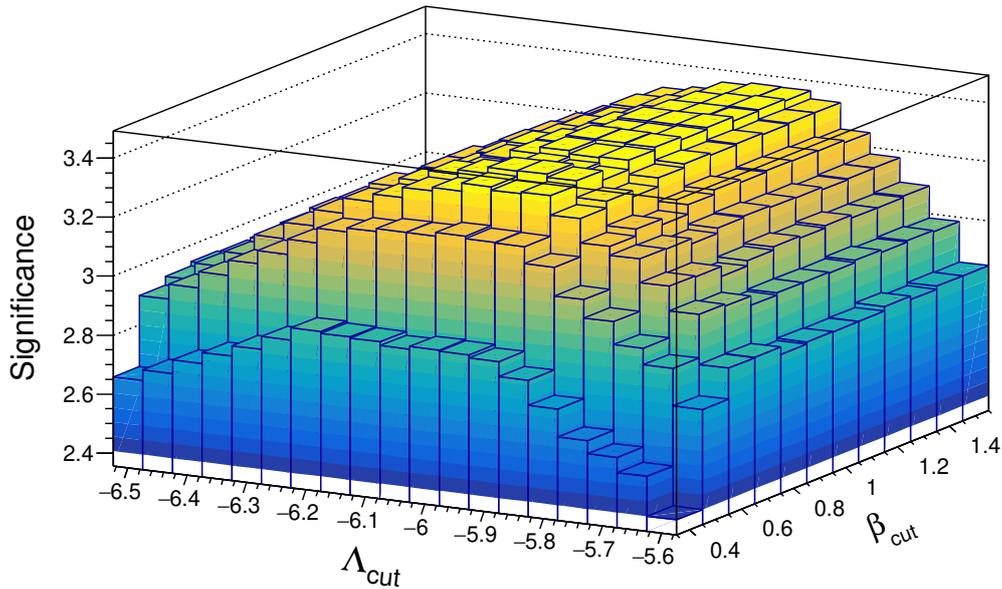


Рисунок 12: Статистическая значимость детектирования тени Солнца в период с 2008 по 2017 год, основанная на данных, полученных путем МК моделирования, как функция от ограничений на Λ и β . Ожидаемая статистическая значимость - 3.4σ .

Чтобы уточнить ограничения на Λ и β , а также чтобы получить однородную плотность распределения мюонов вдали от расположения Солнца, что является важным условием в оценке статистической значимости результатов, который будет описан ниже, были построены гистограммы плотностей событий в областях, не содержащих Солнце (области фона). Эти области были получены аналогично дополнительным зонам в МК моделировании, описанным выше. Гистограммы были построены для различных наборов ограничений на Λ и β (в той области ограничений, где чувствительность обнаружения тени Солнца максимальна при проверки статистических гипотез). Затем, гистограммы были аппроксимированы горизонтальной линией. Из аппроксимаций были получены значения χ^2 для каждой гистограммы (Рис. 13). Минимальное значение χ^2 было найдено при следующем наборе ограничений: $\Lambda > -5.9$ и $\beta < 1.1^\circ$. Фоновое распределение при этих ограничениях на параметры

показано на Рис. 14

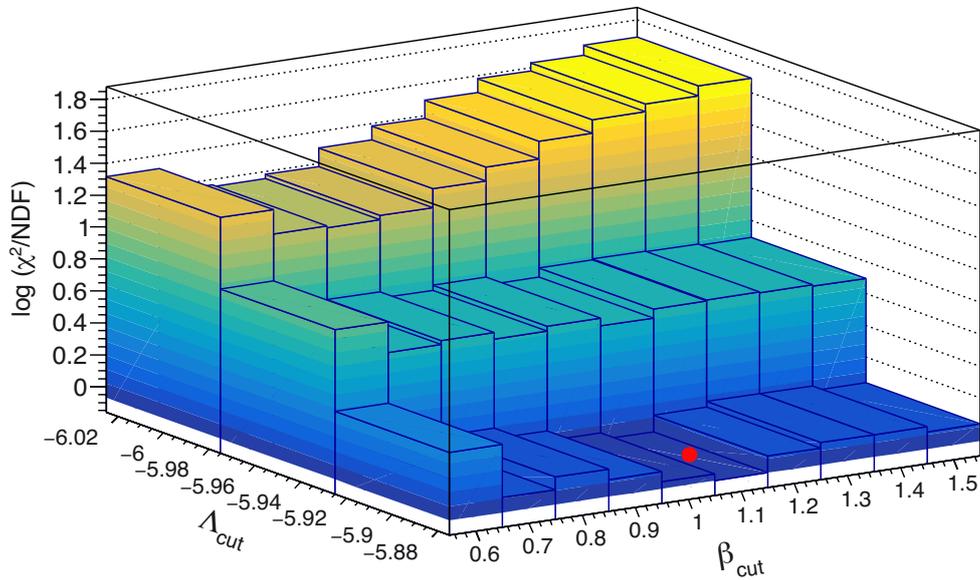


Рисунок 13: Натуральный логарифм от значений χ^2 , полученных при аппроксимации фоновых распределений горизонтальной линией, как функция от ограничений на Λ и β . Минимальное значение χ^2 найдено при $\Lambda > -5.9$ и $\beta < 1.1^\circ$ (красный круг).

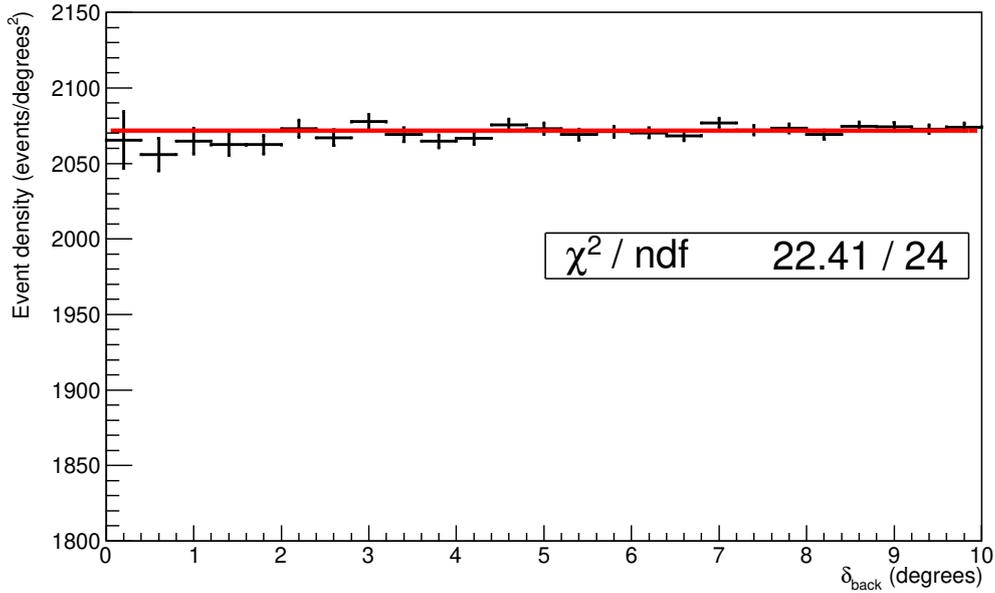


Рисунок 14: Фоновое распределение плотности мюонов, аппроксимированное горизонтальной линией, построенное для наиболее оптимальных ограничений на Λ и β ($\Lambda > -5.9$ и $\beta < 1.1^\circ$).

На Рис. 15 показаны распределения статистических функций λ_0 и λ_1 для наиболее оптимальных ограничений на Λ и β . Заштрихованная область представляет 50% псевдо-экспериментов, которые соответствуют гипотезе H_1 (наличие тени Солнца). Синяя область ниже распределения λ_0 соответствует вероятности того, что эффект тени Солнца, на самом деле, является флуктуацией. Значение этой вероятности равно 7.4×10^{-4} , а соответствующая статистическая значимость составляет 3.4σ .

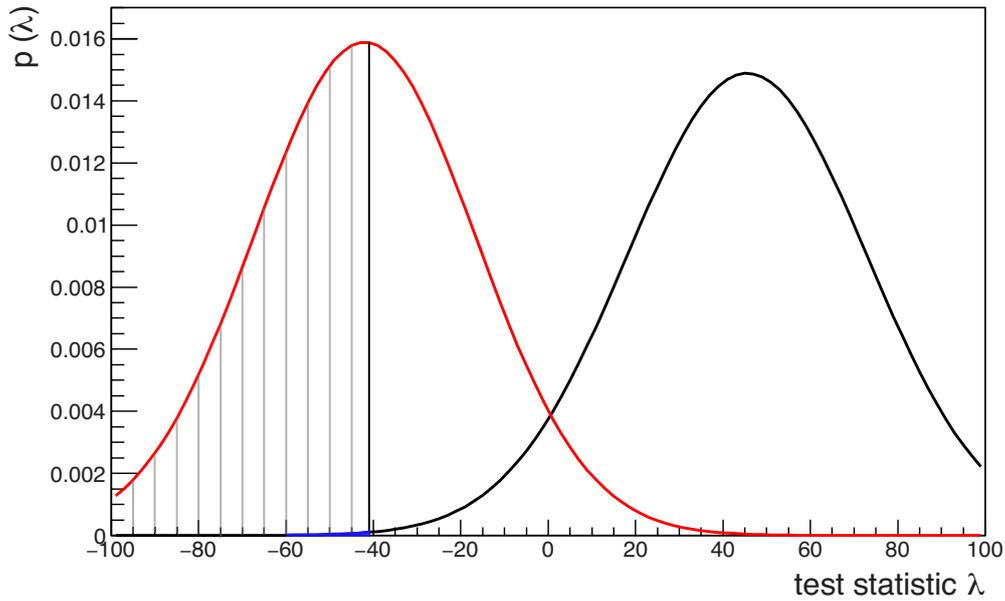


Рисунок 15: Распределения статистической функции λ для гипотез H_0 (черная кривая) и H_1 (красная кривая). Закрашенная область соответствует ожидаемой статистической значимости, равной 3.4σ .

5.2 Угловая разрешающая способность телескопа и статистическая значимость результатов

Для анализа эффекта тени Солнца были отобраны события, зарегистрированные телескопом ANTARES в период с 2008 по 2017 год, которые удовлетворяют ограничениям на параметры качества восстановленных треков, полученным выше. Всего было отобрано 1.5×10^6 событий. Гистограмма распределения событий для реальных данных строилась также, как гистограмма событий для данных МК моделирования, описанная выше в процедуре проверки статистических гипотез (пункт 5.1).

Для того чтобы оценить количество событий, которые будут отсутствовать в данных из-за эффекта тени Солнца, использовалась функция рассеяния точки (ФРТ), полученная путем МК моделирования. Поскольку Солнце не является точечным источником, ФРТ была свернута со ступенчатой функцией размером 0.26° , которая отражает наличие конеч-

ного размера Солнца. Затем, ФРТ была нормализована к гистограмме с реальными данными. Значение χ^2 между данными и нормализованной ФРТ составляет 0.8. Обе гистограммы представлены на Рис. 16.

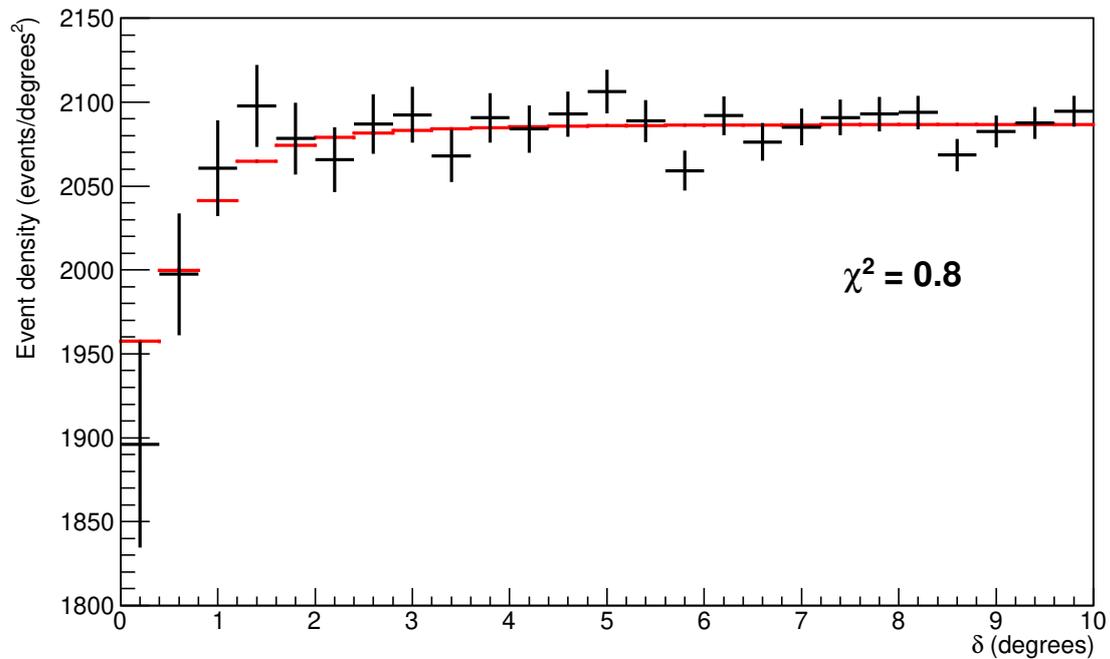


Рисунок 16: Функция рассеяния точки (красная гистограмма), свернутая со ступенчатой функцией и нормализованная к гистограмме с реальными данными (черная гистограмма).

Ожидаемое число событий, которые будут отсутствовать в данных из-за эффекта тени, оценивалось путем вычисления площади ФРТ в диапазоне от 0° до 2° . В результате, предполагаемое количество поглощенных событий составляет $N_{abs} = 118.5$. Чтобы оценить угловое разрешение детектора, гистограмма с реальными данными была аппроксимирована следующей функцией (Рис. 17):

$$f(\delta) = \frac{dN}{d\delta^2} = k \left(1 - \frac{A_{data}}{\sigma_{res}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_{res}^2}} \right), \quad (7)$$

где k - средняя плотность событий в случае отсутствия эффекта тени, δ - угловое расстояние от центра Солнца, σ_{res} - угловая разрешающая способность телескопа и $A_{data} = \frac{N_{abs}}{\sqrt{\frac{\pi}{2}}k}$, чтобы:

$$\int_0^\infty (k - f(\delta)) d\delta = N_{abs} \quad (8)$$

Таким образом, количество поглощенных событий в данных равно количеству поглощенных событий, полученному из ФРТ. Значение угловой разрешающей способности из аппроксимации: $\sigma_{res} = 0.45^\circ \pm 0.12^\circ$. Это значение получилось меньше чем значение, полученное при анализе тени Луны с помощью телескопа ANTARES [42], поскольку в настоящем анализе учитывается, что ФРТ не имеет чисто гауссовой формы, что накладывает ограничения на ожидаемое количество поглощенных мюонов.

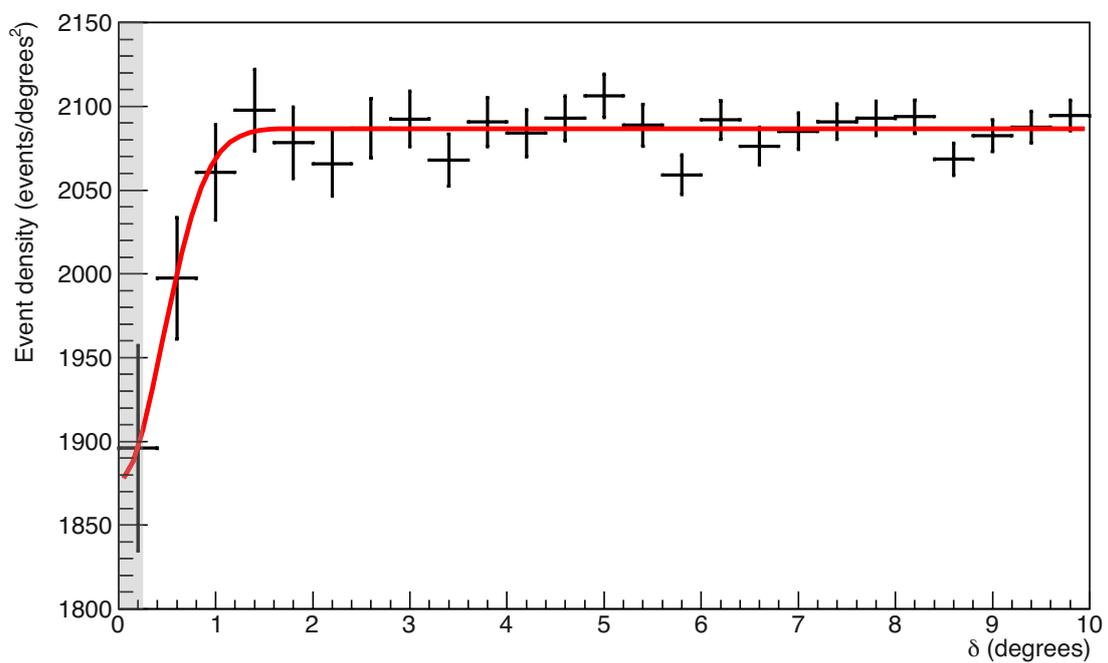


Рисунок 17: Распределение плотности мюонов как функция от углового расстояния δ от центра Солнца. Заштрихованная область соответствует среднему угловому радиусу Солнца (0.26°).

Статистическая значимость результатов оценивалась с помощью метода проверки гипотез. Для гипотезы H_0 предполагается, что эффект тени отсутствует, поэтому гистограмма распределения мюонов сравнивается с функцией $\frac{dN}{d\delta^2} = k$, соответствующее значение χ^2 : $\chi_0^2 = 34.19$. Гипотеза H_1 соответствует наличию эффекта тени в данных, и гистограмма на Рис. 17 аппроксимируется функцией 7 с одним свободным параметром, σ_{res} . Из этой аппроксимации получается значение $\chi_1^2 = 17.82$. Затем, вычисляется статистическая функция λ : $\lambda = \chi_1^2 - \chi_0^2$. Функция $-\lambda$ следует распределению χ^2 с одной степенью свободы. Это позволяет оценить статистическую значимость обнаружения тени Солнца: значение $-\lambda$ составляет 16.37, соответствующее значение вероятности (p-value) равно 5.2×10^{-5} . Статистическая значимость составляет 3.9σ .

5.3 Поиск возможного смещения центра тени Солнца

Центр тени может быть смещен из-за воздействия магнитного поля Солнца на первичные космические лучи. Для исследования данного эффекта было построено двумерное распределение мюонов как функция от $x = (\alpha_\mu - \alpha_{Sun}) \times \cos(h_\mu)$ и $y = h_\mu - h_{Sun}$, где α_μ , α_{Sun} - азимутальные координаты и h_μ , h_{Sun} - зенитные углы треков частиц и Солнца, соответственно. Затем, гистограмма аппроксимируется полиномом второй степени - функцией, описывающей фоновое распределение (гипотеза H_0):

$$p_2(x, y, \mathbf{k}) = k_0 + k_1x + k_2x^2 + k_3y + k_4y^2 \quad (9)$$

Из аппроксимации получается значение вектора параметров $\mathbf{k} \equiv \{331.8 \pm 0.7, 0.53 \pm 0.06, -0.011 \pm 0.012, 14.56 \pm 0.06, 0.166 \pm 0.012\}$.

После этого, распределение событий аппроксимируется функцией f_{Sun} ,

получаемой путем вычитания из $p_2(x, y, \mathbf{k})$ двумерной функции Гаусса:

$$f_{Sun}(x, y, A, (x_s, y_s)) = p_2(x, y, \mathbf{k}) - \frac{A_{Sun}}{2\pi\sigma_{res}^2} e^{-\frac{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2}{2\sigma_{res}^2}} \quad (10)$$

где A_{Sun} - амплитуда дефицита в потоке мюонов, вызванного тенью Солнца, (x_s, y_s) - предполагаемое положение центра тени. Значение σ_{res} фиксировано и равно значению угловой разрешающей способности, найденному в пункте 5.2.

Для оценки возможного смещения, положение центра тени Солнца (x_s, y_s) предполагается в различных точках двумерной гистограммы, описанной выше, с шагом 0.1° . Реальное расположение центра Солнца - точка $O \equiv (0^\circ, 0^\circ)$. Затем, для каждого смещения центра тени вычисляется статистическая функция λ :

$$\lambda(x_s, y_s) = \chi_{Sun}^2(x_s, y_s) - \chi_{NoSun}^2, \quad (11)$$

где χ_{NoSun}^2 - значение χ^2 , полученное из аппроксимации двумерной гистограммы функцией 9. Это значение является константой для всех точек гистограммы. χ_{Sun}^2 - это значение χ^2 , полученное из аппроксимации функцией 10.

На Рис. 18 показано распределение статистической функции $\lambda(x_s, y_s)$. Минимальное значение этой функции было найдено в точке $(0^\circ, 0^\circ)$ (номинальная позиция Солнца): $\lambda_{min} = -13.48$. В каждой точке гистограммы на Рис. 18 $-\lambda$ следует распределению χ^2 с одной степенью свободы. Тем самым, можно вычислить статистическую значимость детектирования тени Солнца, используя данный двумерный подход. Значение $-\lambda_{min}$ соответствует значению вероятности (p-value) равному 2.4×10^{-4} . Статистическая значимость составляет 3.5σ .

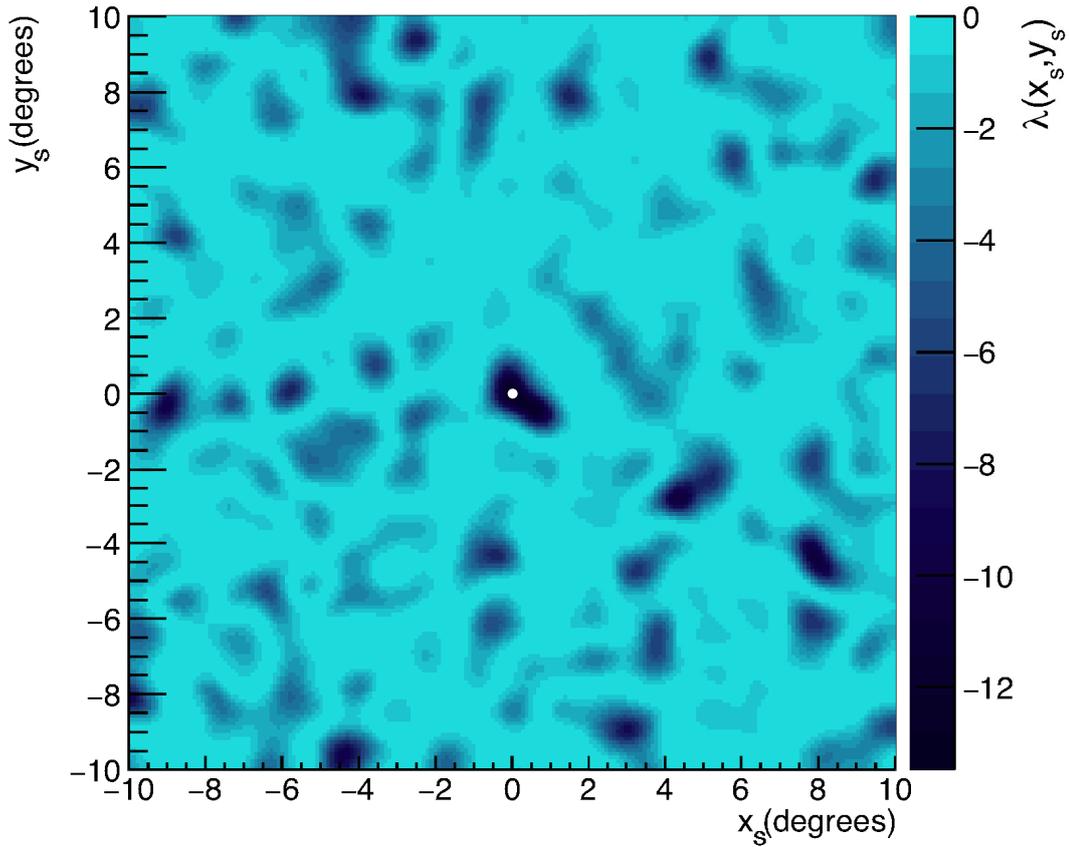


Рисунок 18: Распределение статистической функции $\lambda(x_s, y_s)$, построенной вокруг номинальной позиции Солнца $O \equiv (0^\circ, 0^\circ)$. Минимальное значение $\lambda_{min} = -13.48$ найдено в точке O (белая точка).

На Рис. 19 представлено распределение интервалов, построенных вокруг точки $(0^\circ, 0^\circ)$, в которой функция $\lambda(x_s, y_s)$ принимает наименьшее значение. Интервалы соответствуют уровням доверия: $\lambda \leq \lambda_{cut} = \lambda_{min} + Q$, где Q - это квантиль, соответствующий распределению χ^2 с двумя степенями свободы (в данном случае, это x_s и y_s) и определенному уровню доверия [47]. Используемые уровни доверия (УД): $\equiv \{68.27\%, 95.45\%, 99.73\%\}$.

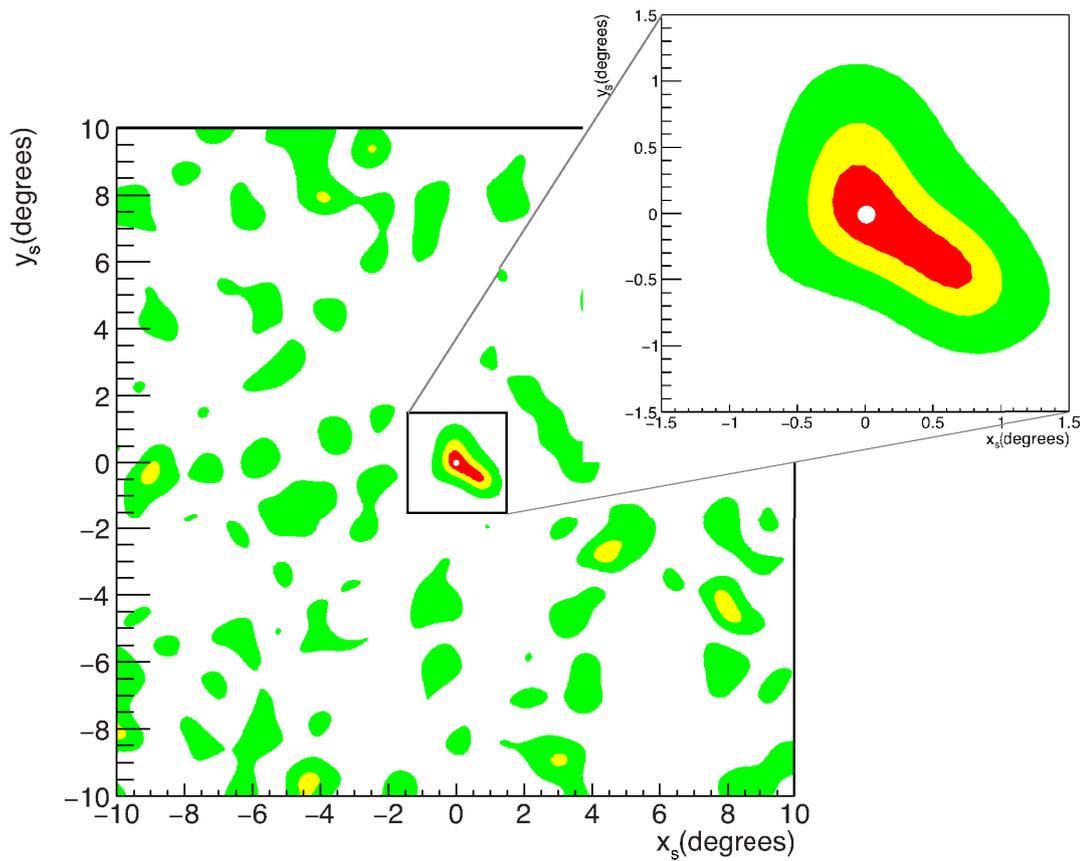


Рисунок 19: Интервалы, соответствующие различным уровням доверия (красный: 68.27%; желтый: 95.45%; зеленый: 99.73%). Белая точка указывает позицию, в которой значение $\lambda_{min} = -13.48$.

6 Заключение

Одной из основных целей телескопа ANTARES является поиск точечных источников нейтрино [43, 48, 49]. В связи с этим, крайне важно корректно оценить угловую разрешающую способность детектора.

В данной работе представлено исследование эффекта тени Солнца в потоке атмосферных мюонов с помощью нейтринного телескопа ANTARES. Анализ основан на данных телескопа, зарегистрированных в период с 2008 по 2017 гг.

Эффект тени Солнца был исследован с помощью двух взаимодополняющих подходов, которые позволили определить угловую разрешающую способность детектора. Полученное значение разрешающей способности составляет $0.45^\circ \pm 0.12^\circ$. Статистическая значимость результатов - 3.9σ . Также, было установлено, что центр тени совпадает с истинным расположением центра Солнца.

Список литературы

- [1] C. Cowan, F. Reines, F. Harrison, H. Kruse, and A. McGuire, "Detection of the free neutrino: A Confirmation," *Science*, vol. 124, pp. 103-104, 1956.
- [2] G. Danby et al. "Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos". In: *Phys. Rev. Lett.* 9 (1 July 1962), pp. 36–44. doi: 10.1103/PhysRevLett.9.36.
- [3] K. Kodama et al. "Observation of tau neutrino interactions". In: *Physics Letters B* 504.3 (2001), pp. 218–224. issn: 0370-2693
- [4] IceCube Collaboration. "Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector." *Science* 342.6161 (2013): 1242856.
- [5] <http://pdg.lbl.gov/2019/listings/rpp2019-list-neutrino-prop.pdf>
- [6] Zatsepin, Georgi T., and Vadim A. Kuzmin. "Upper limit of the spectrum of cosmic rays." *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters)* 4.3 (1966): 78-80.
- [7] Abbott, Benjamin P., et al. "Observation of gravitational waves from a binary black hole merger." *Physical review letters* 116.6 (2016): 061102.
- [8] Spiering, Christian. "Towards high-energy neutrino astronomy." *From Ultra Rays to Astroparticles*. Springer, Dordrecht, 2012. 231-263.
- [9] Halzen, Francis, and Dan Hooper. "High-energy neutrino astronomy: the cosmic ray connection." *Reports on Progress in Physics* 65.7 (2002): 1025.

- [10] Waxman, Eli, and John Bahcall. "High energy neutrinos from cosmological gamma-ray burst fireballs." *Physical Review Letters* 78.12 (1997): 2292.
- [11] Gaisser, Thomas K., Francis Halzen, and Todor Stanev. "Particle astrophysics with high energy neutrinos." *Physics Reports* 258.3 (1995): 173-236.
- [12] R. Engel, D. Seckel and T. Stanev, *Phys. Rev. D* 64, 093010 (2001), astro-ph/0101216.
- [13] Gaisser, Thomas K., Francis Halzen, and Todor Stanev. "Particle astrophysics with high energy neutrinos." *Physics Reports* 258.3 (1995): 173-236.
- [14] Fargion, Daniele, B. Mele, and A. Salis. "Ultra-high-energy neutrino scattering onto relic light neutrinos in the galactic halo as a possible source of the highest energy extragalactic cosmic rays." *The Astrophysical Journal* 517.2 (1999): 725.
- [15] Feng, Jonathan L., Konstantin T. Matchev, and Frank Wilczek. "Prospects for indirect detection of neutralino dark matter." *Physical Review D* 63.4 (2001): 045024.
- [16] Sarkar, Subir, and Ramon Toldra. "The high energy cosmic ray spectrum from relic particle decay." *Nuclear Physics B* 621.1-2 (2002): 495-520.
- [17] Ellis, John, et al. "Supersymmetric dark matter in the light of CERN LEP and the Fermilab Tevatron collider." *Physical Review D* 62.7 (2000): 075010.
- [18] T. K. Gaisser, F. Halzen, et al., "Particle astrophysics with high energy neutrinos," *Physics Reports*, vol. 258, pp. 173–236, 1995.

- [19] Денисов, С. П. "ИЗЛУЧЕНИЕ "СВЕРХСВЕТОВЫХ" ЧАСТИЦ (ЭФФЕКТ ЧЕРЕНКОВА). "Соровский общеобразовательный журнал 2 (1996): 89-97.
- [20] Aynutdinov, Vladimir, et al. "The Baikal neutrino experiment: from NT200 to NT200+." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 567.2 (2006): 433-437.
- [21] Andrés, E. C., et al. "The AMANDA neutrino telescope." Nuclear Physics B-Proceedings Supplements 77.1-3 (1999): 474-485.
- [22] Fukuda, S., et al. "The super-kamiokande detector." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 501.2-3 (2003): 418-462.
- [23] Montaruli, Teresa. "MACRO as a telescope for neutrino astronomy." International Cosmic Ray Conference. Vol. 2. 1999.
- [24] Aynutdinov, V., et al. "The BAIKAL neutrino experiment—Physics results and perspectives." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 602.1 (2009): 14-20.
- [25] A. Achterberg, M. Ackermann, et al., "First year performance of the IceCube neutrino telescope," Astroparticle Physics, vol. 26, pp. 155–173, 2006.
- [26] T. DeYoung for the IceCube Collaboration, "Particle physics in ice with IceCube DeepCore," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 692, pp. 180–183, 2012.

- [27] R. Abbasi, Y. Abdou, et al., "IceTop: The surface component of IceCube. The IceCube Collaboration," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 700, pp. 188–220, 2013.
- [28] Adrian-Martinez, Silvia, et al. "Letter of intent for KM3NeT 2.0." *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 43.8 (2016): 084001.
- [29] Ageron, M., et al. "ANTARES: the first undersea neutrino telescope." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 656.1 (2011): 11-38.
- [30] Adrián-Martínez, Silvia, et al. "Stacked search for time shifted high energy neutrinos from gamma ray bursts with the Antares neutrino telescope." *The European Physical Journal C* 77.1 (2017): 1-10.
- [31] Aguilar, J. A., et al. "Time calibration of the ANTARES neutrino telescope." *Astroparticle Physics* 34.7 (2011): 539-549.
- [32] Aguilar, J. A., et al. "The data acquisition system for the ANTARES neutrino telescope." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 570.1 (2007): 107-116.
- [33] Alexandreas, D. E., et al. "Observation of shadowing of ultrahigh-energy cosmic rays by the moon and the sun." *Physical Review D* 43.5 (1991): 1735.
- [34] Amenomori, M., et al. "Moon shadow by cosmic rays under the influence of geomagnetic field and search for antiprotons at multi-TeV energies." *Astroparticle physics* 28.1 (2007): 137-142.
- [35] Andreyev, Yu M., et al. "Observation of the Moon shadow in cosmic ray muons." *Cosmic Research* 40.6 (2002): 559-564.

- [36] Borione, A., et al. "Observation of the shadows of the Moon and Sun using 100 TeV cosmic rays." *Physical Review D* 49.3 (1994): 1171.
- [37] Ambrosio, Michelangelo, et al. "Moon and Sun shadowing effect in the MACRO detector." *Astroparticle physics* 20.2 (2003): 145-156.
- [38] Cobb, J. H., et al. "Observation of a shadow of the Moon in the underground muon flux in the Soudan 2 detector." *Physical Review D* 61.9 (2000): 092002.
- [39] Bartoli, B., et al. "Measurement of the cosmic ray antiproton/proton flux ratio at TeV energies with the ARGO-YBJ detector." *Physical Review D* 85.2 (2012): 022002.
- [40] Abeysekara, A. U., et al. "Constraining the p^-/p ratio in TeV cosmic rays with observations of the Moon shadow by HAWC." *Physical Review D* 97.10 (2018): 102005.
- [41] Aartsen, M. G., et al. "Detection of the temporal variation of the Sun's cosmic ray shadow with the IceCube detector." *The Astrophysical Journal* 872.2 (2019): 133.
- [42] Albert, A., et al. "The cosmic ray shadow of the Moon observed with the ANTARES neutrino telescope." *The European Physical Journal C* 78.12 (2018): 1006.
- [43] Albert, A., et al. "First all-flavor neutrino pointlike source search with the ANTARES neutrino telescope." *Physical Review D* 96.8 (2017): 082001.
- [44] Carminati, G., et al. "Atmospheric MUons from PArametric formulas: a fast GEnerator for neutrino telescopes (MUPAGE)." *Computer Physics Communications* 179.12 (2008): 915-923.

- [45] Yepes-Ramírez, H. A. R. O. L. D., and ANTARES Collaboration. "Characterization of optical properties of the site of the ANTARES neutrino telescope." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 725 (2013): 203-206.
- [46] Fusco, Luigi Antonio, and Annarita Margiotta. "The Run-by-Run Monte Carlo simulation for the ANTARES experiment." *EPJ Web of Conferences*. Vol. 116. EDP Sciences, 2016.
- [47] Cowan, Glen. *Statistical data analysis*. Oxford university press, 1998.
- [48] A. Albert et al. (ANTARES and IceCube Collaborations), *The Astrophysical Journal* 892(92) (2020).
- [49] S. Adrian-Martinez et al. (ANTARES Collaboration), *The Astrophysical Journal Letters* 786(1) (2014).