

Аннотация

о выполнении Государственного контракта
№ П133 от 13 апреля 2010 г.

В последние годы нейтринная астрофизика переходит в разряд экспериментальных наук, как уникальный инструмент исследования Вселенной. Нейтрино, благодаря слабому взаимодействию с веществом, может выходить из массивных объектов непрозрачных для других видов излучения и, следовательно, регистрация потока нейтрино от таких объектов может дать важную информацию о процессах внутри них. Это же свойство нейтрино (слабое взаимодействие с веществом) приводит к необходимости создания установок большого объема для регистрации нейтрино высоких энергий. Все действующие в настоящее время детекторы нейтрино высоких энергий, размещенные в природных средах, основаны на регистрации черенковского излучения релятивистских заряженных частиц, рожденных при взаимодействии нейтрино со средой. Регистрация нейтрино очень высоких энергий ($>10^{18}$ эВ) из-за редкости событий требует детекторов с эффективным объемом мишени гораздо больше одного кубического километра.

В 1957 году советский физик Г.А. Аскармян показал, что при рождении ливней высоких энергий в воде должны генерироваться акустические сигналы. Было предложено использовать этот эффект для акустической регистрации нейтрино высоких энергий в море или в озере Байкал. Однако, возможность и целесообразность создания больших подводных акустических нейтринных детекторов, их основные характеристики, такие как энергетический порог и эффективный объем, определяются, как природными факторами - шумами в месте развертывания установки, особенностями генерации и распространения акустических сигналов, так и техническими особенностями детекторов - чувствительностью и собственными шумами гидрофонов, параметрами электронных схем т.д.

Несмотря на существующий уже более 30 лет интерес к акустическому методу регистрации нейтрино сверхвысоких энергий и значительное число теоретических работ на эту тему, поток которых опять возрос в последнее время, практическая работа в этой области находится на самом начальном этапе. На данный момент в мире не только не существует крупномасштабного акустического детектора астрофизических нейтрино, но в работах разных авторов существует большой разброс в результатах моделирования и расчетов свойств акустических сигналов от ядерно-электромагнитных каскадных ливней в воде.

Основная цель данного проекта - разработка теоретических основ метода поиска астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий в байкальской воде акустическим методом.

В рамках первого этапа поисковых научно-исследовательских работ был выполнен аналитический обзор работ в области исследования акустической регистрации нейтрино сверхвысоких энергий. Была разработана модель формирования акустических сигналов в байкальской воде от ливней сверхвысоких энергий, основанная на параметризации плотности распределения энергии каскада, полученной участниками коллаборации ACORNE, вычисления акустического эффекта проводились методом Монте-Карло в рамках терморadiационного механизма. Была создана программа для численных расчетов процессов формирования в байкальской воде акустических сигналов от ливней сверхвысоких энергий в среде разработки Microsoft Visual Studio 2008 Express с использованием метода Монте-Карло, данных натуральных наблюдений за гидрофизическими параметрами озера Байкал, библиотеки обработки и визуализации данных ROOT, UNURAN. Реализованы алгоритмы для расчета термодинамических параметров среды.

Разработана модель распространения акустических сигналов в байкальской воде от ливней сверхвысоких энергий. Модель учитывает явление рефракции звука в связи с зависимостью скорости звука от глубины и явления поглощения и дисперсии. Решены прямая и обратная задачи трассировки звука в лучевом приближении и в приближении слоистой среды.

Построена модель прохождения астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий сквозь вещество и расчет ослабления потока нейтрино в воде и грунте для условий их регистрации в Байкальском нейтринном эксперименте. Проведен расчет распространения нейтрино сверхвысоких энергий в среде с учетом эффекта поглощения с использованием кода ANIS, учитывающего все существенные процессы взаимодействия нейтрино, такие как поглощение нейтрино, $\nu_\tau \rightarrow \tau \rightarrow \nu_\tau$ повторное рождение, повторное рождение в NC взаимодействиях, также как и возможное рождение нейтрино в резонансном рассеянии электронов $\bar{\nu}_e \rightarrow W^- \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau}$. Расчет произведен для AGN – подобного потока $\Phi(E) \propto E^{-2}$, нормировка была выбрана такая, что $\Phi(E) = 10^{-6} E^{-2} GeV^{-1} cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}$.

Разработан метод определения эффективного объема регистрации астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий акустическим методом в условиях Байкальского

нейтринного эксперимента, в котором учитываются реальные гидрофизические характеристики водной среды в озере Байкал и свойства акустических шумов, создаваемых другими источниками. Разработан соответствующий алгоритм и численная программа. Получена оценка эффективного объема регистрации астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий акустическим методом для экспериментального кластера акустического детектора на озере Байкал.

Разработаны методы выделения слабых сигналов от каскадных ливней и способы уменьшения влияния естественного фона, что позволяет увеличить отношение сигнал/шум и понизить энергетический порог регистрации астрофизических нейтрино на Байкале до величины порядка 10^{18} эВ.

Разработаны предложения по созданию большого акустического детектора на Байкале. По нашему мнению, в качестве элементарной ячейки акустического детектора нейтрино целесообразно использовать регистрирующие модули, позволяющие выделять сигналы заданной формы, которые могут быть интерпретированы в терминах плоской волны, порожденной квазилокальным источником. Для этого модуль должен иметь, как минимум, 4 распределенных в пространстве гидрофонов. Результаты моделирования показали, что при расположении гидрофонов в вершинах пирамиды со стороной порядка метра можно получить точность восстановления направления угла прихода сигнала не хуже градуса и иметь приемлемую вероятность имитаций.

Вторая идея состоит в том, что раз основным источником шума является поверхностный слой водоема, то акустические приемники надо размещать не на дне или в придонной зоне, а на небольших глубинах и «прослушивать» водоем сверху вниз. При этом необходимо насколько возможно уменьшить чувствительность гидрофонов к шуму из верхней полусферы. Эксперимент на Байкале показал высокую эффективность этого метода. Еще одна особенность предлагаемого нами проекта, отчасти обусловлена ограниченностью пропускной способности линий связи с подводным комплексом Байкальского нейтринного телескопа. Полный объем информации, получаемой после оцифровки даже всего с 4-х гидрофонов, составляет несколько десятков мегабит в секунду. Передача такого объема данных и его хранение на берегу кажется нам не только сложным, но и бессмысленным делом. Поэтому мы разработали специальный достаточно простой алгоритм предварительной обработки информации под водой, что позволяет на несколько порядков уменьшить поток данных на берег.

Если отвлечься от технических проблем развертывания и проблем фона, регистрирующие модули будущего акустического нейтринного телескопа должны были бы располагаться на поверхности (или части поверхности) достаточно большого объема. В то время как в черенковских установках оптические детекторы более или менее

равномерно заполняют весь объем установки. Это связано с тем, что длина затухания акустических волн в воде во много раз меньше, чем длина поглощения черенковского излучения. В принципе, достаточно было бы разместить акустические антенны только на дне, вероятно, это технически проще и дешевле. Однако, как говорилось выше, при этом существенно ухудшатся фоновые условия (вероятно, проблема фона может быть решена при достаточно плотной расстановке приемных антенн на большой площади дна). Другой возможный подход состоит в том, чтобы распределить регистрирующие модули на буйковых станциях в некотором диапазоне относительно небольших глубин, например 100 -500 м. Расстояние между антеннами на буйковой станции должно быть порядка 15-30 м, что определяется характерной толщиной диска, в котором должна распространяться основная доля звуковой энергии. Буйковые станции должны образовывать плоскости, расстояние между которыми должно составлять несколько сот метров (все геометрические параметры установки будут уточняться в ходе работ по моделированию).

Важно также что распределение регистрирующих модулей акустического детектора в относительно неглубоко расположенном слое и их ориентация на прием сигналов снизу позволит с большей эффективностью осуществить поиск околоразрывных нейтрино. Последние должны преобладать при сверхвысоких энергиях, поскольку Земля для них уже непрозрачна и относительно мал телесный угол для около вертикальных нейтрино сверху.

Руководитель проекта

Д.Ю.Богородский