

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ИГУ»)
Физический факультет

Кафедра общей и космической физики
Допускается к защите
зав. кафедрой,
профессор, д.ф.-м.н. _____ Паперный В.Л.
«_____» _____ 2021 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА
по направлению 03.03.02 Физика
направленность (профиль)
«Солнечно-земная физика»

Разработка моделирования взаимодействий нейтрино в генераторе
NuProp для эксперимента BaikalGVD

Студент 4 курса очного отделения,
Группа 01411 - ДБ
_____ Карнакова Александра Владимировна
(подпись)

Нормоконтролёр: доцент, к.ф.-м.н.
_____ Красов В.И.
(подпись)

Руководитель: д.ф.-м.н., профессор
_____ Язев С.А.
(подпись)

Консультант: д.ф.-м.н., заместитель директора по
научной работе ЛЯП ОИЯИ, г.Дубна
_____ Наумов Д.В.
(подпись)

Работа защищена:
«_____» _____ 2021 г.
С оценкой _____
Протокол № _____

Иркутск 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Физика нейтрино	7
1.1 Нейтрино и основы Стандартной модели	7
1.2 Слабое взаимодействие	9
1.3 Взаимодействие нейтрино с нуклоном	11
1.4 Кварк-партонная модель	13
1.5 Атмосферные тау-нейтрино	14
2 Z-фактор	17
3 Байкальский нейтринный телескоп Baikal-GVD	19
3.1 Задачи нейтринной астрофизики	19
3.2 Принцип работы нейтринного телескопа	20
3.3 Baikal-GVD	22
4 Экспериментальная часть	24
Заключение	30
Список использованных источников	32

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Нейтринная астрофизика является молодым и очень перспективным направлением в современной физике. На сегодняшний день множество стран мира занимаются изучением нейтрино, образуя международные коллаборации по исследованию этих удивительных частиц. В разных точках Земли строятся гигантские установки для детектирования нейтрино, приходящих из различных уголков Вселенной. Так, например, IceCube на Южном полюсе, KM3NeT в Средиземном море, отечественный телескоп Baikal-GVD на Байкале фиксируют потоки нейтрино высоких энергий. Одна из главных задач таких установок — это обнаружение источников нейтрино. По свойствам пришедшего на Землю нейтрино можно судить о природе самого объекта — источника. Таким образом мы можем узнать, какие процессы происходят в космосе.

Но для успешного детектирования нейтрино необходимо не только построить телескоп, но и суметь смоделировать процессы, происходящие на пути исследуемой частицы. На основе теоретических представлений о взаимодействии нейтрино с веществом пишутся программные пакеты для моделирования. Таким пакетом является пакет «NuProp», разрабатываемый коллаборацией Baikal-GVD. Данный набор программ описывает сечения взаимодействия: полные и дифференциальные, плотность Земли на различных уровнях, потоки на поверхности Земли, кинематику рассеяния, функцию регенерации, Z-фактор и др.

Поэтому первым этапом работы было изучение данного пакета, проверка и тестирование некоторых программ. Так, были построены графики

полных сечений нейтрино для различных теоретических моделей: STEQ6.5M, MRST04. Были исследованы вероятности выживания нейтрино, т. е. отношение потоков нейтрино на какой-либо глубине к потоку на поверхности Земли, в зависимости от угла прихода и энергии. Полученные графики подтвердили, что нейтрино при малых энергиях плохо взаимодействует с веществом, это значит, что выживаемость их выше, чем при более высоких энергиях. Также были рассмотрены глубина проникновения нейтрино и вероятность регистрации нейтрино в зависимости от зенитного угла и энергии. В графиках мы увидели характерную ямку, отвечающую прохождению нейтрино через плотное ядро Земли.

Главной целью работы является расчет потока атмосферных тау-нейтрино на произвольной глубине. Подход к решению данной задачи описан в статье [1]. Основная идея этого метода заключается в сведении интегродифференциального уравнения переноса к нелинейному интегральному уравнению, содержащему Z - фактор — величину, непосредственно связанную с эффективными пробегами поглощения.

Т.к. такой расчет уже проводился коллаборацией для мюонных нейтрино, была поставлена задача провести подобный анализ для тау—нейтрино.

Задачи работы:

- Изучить процесс взаимодействия нейтрино с веществом
- Вычислить Z - фактор методом итераций, используя теоретические модели для сечения взаимодействия нейтрино с нуклоном, а также функцию регенерации и поток нейтрино на поверхности Земли
- Оценить вклад процесса регенерации нейтрино в общем потоке

Первая глава является теоретической базой для понимания физики нейтрино. Во второй главе объясняется смысл вспомогательной функции Z -фактора, для чего и как она вводится. Третья глава посвящена современному состоянию нейтринной астрофизики, целям и задачам, которые она преследует, а также отечественному телескопу Baikal-GVD. Экспериментальная часть описана в четвертой и заключительной главе, в ней было проведено моделирование, расчет Z -фактора для тау-нейтрино.

1 Физика нейтрино

1.1 Нейтрино и основы Стандартной модели

В природе существуют 4 фундаментальных взаимодействия, это гравитационное, сильное, слабое и электромагнитное. Все они действуют на разных расстояниях, имеют разные переносчики и константы связи. Стандартная модель - это модель, описывающая лишь три взаимодействия: сильное, слабое и электромагнитное. Гравитационное взаимодействие в нее не включено. Стандартная модель очень успешно объясняет экспериментальные данные.

В современной физике выделяют три семейства лептонов и три семейства кварков с соответствующими анти-частицами и анти-кварками. В табл. 1 и табл. 2 показаны эти семейства (поколения) [5].

Таблица 1: Лептоны

1 Поколение	2 Поколение	3 Поколение
Электрон/позитрон e^-/e^+	Мюон μ^-/μ^+	Таон τ^-/τ^+
Нейтрино/антинейтрино		
$\nu_e/\bar{\nu}_e$	$\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$	$\nu_\tau/\bar{\nu}_\tau$

Таблица 2: Кварки

1 Поколение	2 Поколение	3 Поколение
u up верхний	c charm очарованный	t top истинный
d down нижний	s strange странный	b bottom прелестный

Как уже было показано, существует три аромата нейтрино: электрон-

ное, мюонное и тау. Пока ученым неизвестны точные массы этих частиц, но выяснено ограничение на массы нейтрино. Само наличие массы требует теории, выходящей за рамки стандартной модели [6].

Приведем известные свойства нейтрино:

- Масса нейтрино гораздо меньше массы кварков и лептонов, сумма масс всех ароматов нейтрино не превышает 0,5 эВ
- Нейтрино участвует только в двух взаимодействиях, в гравитационном и слабом
- Электрический заряд меньше $10^{-17}e$ или равен нулю
- Спин $-1/2$. Спин нейтрино направлен против направления движения, спин антинейтрино направлен по направлению движения.
- Магнитный момент нейтрино меньше 10^{-12} магнитного момента электрона, но по-видимому, не равен нулю [9].

Также известно явление осцилляций нейтрино - перехода нейтрино из одного флейворного состояния в другое. Этот процесс является доказательством того, что нейтрино имеет ненулевую массу.

Состояние нейтрино определенного сорта с определенной энергией задается формулой (1), где $U_{\alpha k}$ - элементы матрицы Понтекорво — Маки — Накагавы — Сакаты [6] :

$$|\nu_{\alpha}(p)\rangle = \sum_k U_{\alpha k} |\nu_k(p)\rangle \quad (1)$$

Стоит отметить, что именно нейтринные осцилляции обеспечивают поток астрофизических тау-нейтрино.

1.2 Слабое взаимодействие

Слабое взаимодействие ответственно за такие процессы, как бета-распад радиоактивных ядер, распады элементарных частиц, нейтринные реакции и др, в нем принимают участие лептоны и кварки, из которых состоят адроны. Именно это взаимодействие на макроуровне отвечает за энерговыделение в звездах и в том числе и на Солнце. Слабое взаимодействие выделяется на фоне остальных тем, что это единственное взаимодействие, способное превращать одни кварки в другие или одни лептоны в другие [4].

Свое название оно получило из-за медленного протекания процессов, которые им инициированы, из-за меньшей вероятности и маленького радиуса взаимодействия, чем в сильном и электромагнитном взаимодействиях. Но при энергиях сталкивающихся частиц больше 100 ГэВ слабое взаимодействие становится сильнее электромагнитного.

В слабом взаимодействии нарушаются пространственная P-четность; зарядовая C-четность; CP-четность - комбинация зеркального отражения и замены частицы на античастицу. Другими словами, скорость реакций, вызванных слабым взаимодействием, разная в нашем мире и в зеркально отраженном. Нарушение пространственной четности приводит к тому, что в слабом взаимодействии участвуют только левые частицы (спин которых противоположно направлен импульсу) и правые античастицы (спин сонаправлен импульсу). Нарушаются законы сохранения странности S, чарма C, изоспина T. В результате слабых взаимодействий суммарное значение странности и чарма частиц до и после взаимодействия может как сохра-

няться, так и изменяться.

Хорошо известно, что электромагнетизм обусловлен взаимодействием электрического тока с фотонами, слабое взаимодействие обусловлено же взаимодействием слабого тока с промежуточными векторными бозонами W^+, W^-, Z^0 . Первые два из них при этом обладают ещё и электрическим зарядом, третий нейтрален. Эти частицы являются переносчиками слабого взаимодействия. В отличие от фотона они имеют массу в силу спонтанного нарушения симметрии. Масса W - бозона составляет около 80,4 ГэВ, а Z - бозон примерно 91,2 ГэВ [5].

Слабые токи, испускающие и поглощающие W -бозоны, называются заряженными токами, а Z -бозоны - нейтральными токами. Заряженные токи меняют заряд входящих в них частиц, нейтральные - не меняют. Z -бозон нейтрален, поэтому суммарный электрический заряд его продуктов распада равен нулю.

Диаграммы Фейнмана, описывающие процессы, протекающие через нейтральный и заряженный токи показаны на рис. 1 и рис. 2.

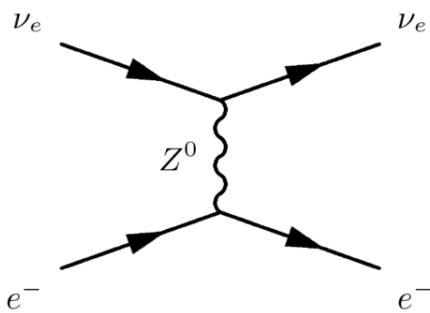


Рис. 1: Рассеяние нейтрино на электроне

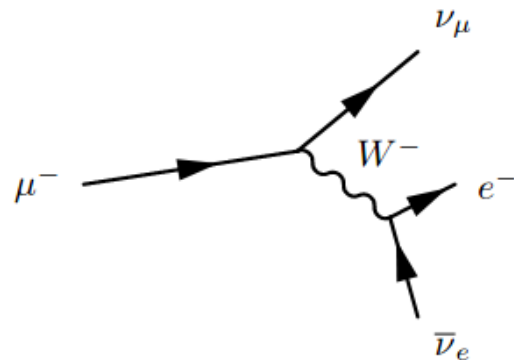


Рис. 2: Распад мюона $\mu \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

1.3 Взаимодействие нейтрино с нуклоном

Процесс лептон - нуклонного глубоко-неупругого рассеяния графически изображен на рис. 3.

Глубоко-неупругое рассеяние происходит с передачей большого импульса нуклону и с рождением адронных струй. При столкновении нейтрино с кварком нуклона происходит рождение кварк-антикварковых пар из вакуума, что и приводит к образованию струи из мезонов и барионов (в упругом рассеянии конечное состояние, как и начальное, является нуклоном) [4].

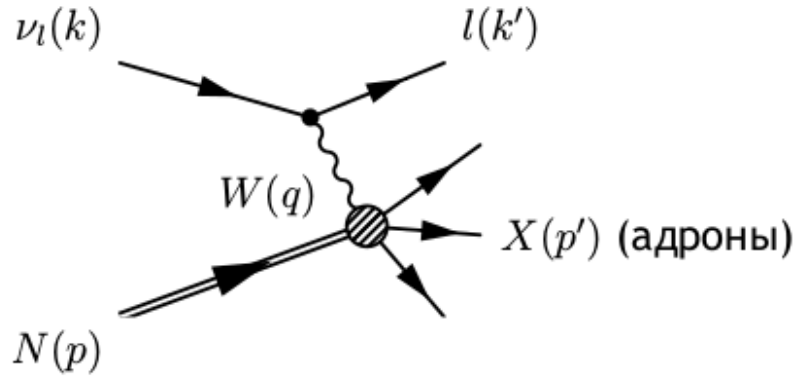


Рис. 3: Лептон-нуклонное взаимодействие

Для описания процесса вводят следующие кинематические переменные, 4-х импульсы [4]:

$k = (E, \vec{k})$ - налетающего лептона;

$k' = (E', \vec{k}')$ - конечного лептона;

$P = (M, 0)$ - нуклона;

$P' = (E_h, \vec{p}_h)$ - конечной адронной системы;

$q = (q, \vec{q}_0) = k - k'$ - промежуточного бозона;

Для описания глубоконеупругого события используются такие лоренц-

инвариантные кинематические переменные [4] :

- 1) $\nu = qP/M = E - E'$ - это часть энергии начального лептона, переданная нуклону (в системе покоя нуклона);
- 2) $Q^2 = -q^2$ - квадрат переданного 4-х импульса лептона нуклону;
- 3) $W^2 = (q + P)^2$ - квадрат массы адронной системы;
- 4) $s = (k + P)^2$ - квадрат энергии в системе центра масс;
- 5) $x = \frac{Q^2}{2M\nu}$ - в кварк-партонной модели x аппроксимирует долю импульса нуклона, переносимую кварком, на котором происходит рассеяние;
- 6) $y = \frac{\nu}{E}$ - доля энергии налетающего лептона в лабораторной системе, потерянная в результате взаимодействия.

Взаимодействие нейтрино с нуклоном может происходить за счет заряженного и нейтрального токов. В заряженном токе происходит превращение нейтрино в другой лептон. В нейтральном же токе продуктом взаимодействия является все так же нейтрино и адронная струя. Такое нейтрино «перерассеивается» на нуклоне или «регенерирует». Диаграммы Фейнмана, описывающие данные процессы показаны на рис. 3 (заряженный ток CC) и рис. 4 (нейтральный ток, NC).

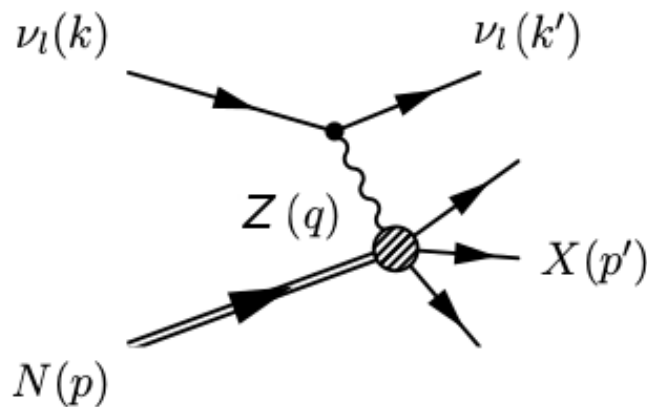


Рис. 4: Лептон-нуклонное взаимодействие через нейтральный ток

1.4 Кварк-партонная модель

В 1964 году независимо друг от друга М. Гелл-Манн и Дж. Цвейг выдвинули гипотезу существования кварков, маленьких элементарных частиц, из которых состоят все адроны. В последствии было установлено, что барионы состоят из трех кварков различных цветов, а мезоны из пары кварк-антикварк. Примеры внутреннего строения адронов показаны в табл. 3.

Таблица 3: Кварковая структура адронов

Адрон	p	n	π^+	π^-	π^0	K^+	K^-
Структура	uud	udd	ud	$d\bar{u}$	$u\bar{u} - d\bar{d}$	$u\bar{s}$	$s\bar{u}$

В 1967 году в Стенфорде в экспериментах по глубоко неупругому электроррождению было обнаружено, что при больших Q^2 сечение не зависит от Q^2 и ν , а зависит только от безразмерных величин $x = \frac{Q^2}{2M\nu}$ и $y = \frac{\nu}{E}$. Это означало, что большой импульс передается некоторым точечным частицам внутри нуклона. В 1969 году знаменитым физиком Р. Фейнманом этим частицам было дано название «партоны», которое сейчас означает общее определение для кварков и глюонов.

Но каким образом упругое лептон - партонное рассеяние приводит к неупругому лептон - нуклонному рассеянию? Лептон рассеивается на кварке и в конечном состоянии у нас снова кварк. Но в силу конфайнмента, наш рассеянный кварк начинает рождать новые кварк - антикварковые пары. Эти кварки формируют адроны. Таким образом рождается адронная струя.

1.5 Атмосферные тау-нейтрино

Из различных уголков Вселенной на Землю приходят космические лучи – поток положительно заряженных ядер, в основном протонов, а также электроны, античастицы, рентгеновское, гамма-излучение и нейтрино.

При взаимодействии с атмосферой Земли частицы первичных космических лучей (ПКЛ) порождают в атмосфере ядерно-электромагнитный каскад вторичных частиц – широкий атмосферный ливень (ШАЛ) [8]. Эти процессы отражены на рис.5.

Компоненты ШАЛ – адронная (около 85% пионы и около 15% каоны), проникающая (мюоны и нейтрино), электронно-фотонная, черенковское и флуоресцентное излучение, радиоизлучение.

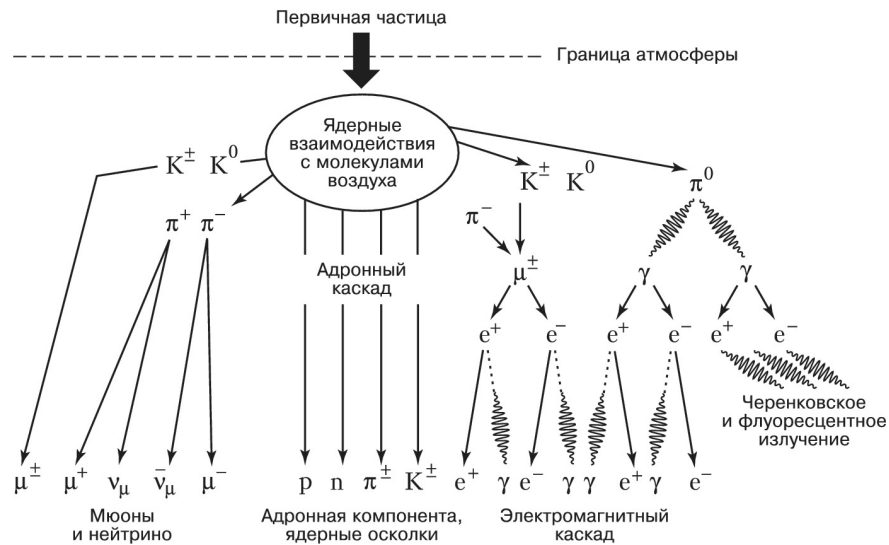
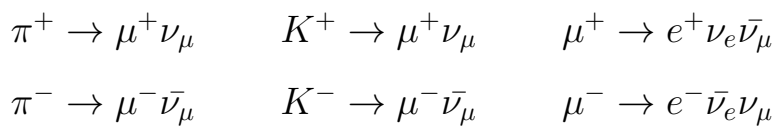


Рис. 5: Широкий атмосферный ливень

Ниже показаны реакции, приводящие к рождению атмосферных нейтрино [3].



В процессе распадов каонов и пионов образуются мюоны и мюонные нейтрино, а при распаде мюона - электронные нейтрино. Существуют и другие каналы генерации атмосферных нейтрино. Но вероятность их меньше.

Из реакций видно, что мюонных нейтрино образуется приблизительно в 2 раза больше, чем электронных.

При очень высоких энергиях необходимо учесть также рождение и распад очарованных частиц, в которых образуются нейтрино всех трех типов: ν_μ, ν_e, ν_τ .

Распады пионов и каонов дают основной вклад в общий поток атмосферных нейтрино до энергий 10-100 ТэВ. При больших энергиях длина пробега до распадов каонов становится настолько большой, что они успевают провзаимодействовать с атомами атмосферы. Интенсивность этого источника нейтрино уменьшается с ростом энергии. И всю большую роль начинает играть распад очарованных частиц [3].

Таким образом, атмосферные тау-нейтрино образуются в основном за счет распада очарованных частиц :

$$D_s^\pm \rightarrow \tau^\pm + \nu_\tau(\bar{\nu}_\tau) \quad (2)$$

Такие нейтрино называются нейтрино "быстрой генерации" или "прямые" нейтрино [2].

Также вклад в поток тау нейтрино дают нейтринные осцилляции. Мюонные и электронные нейтрино, рождаясь в атмосфере, могут перейти в тау-нейтрино. Но если поток нисходящий и энергии нейтрино высокие, то этот вклад невелик. Еще одна цепочка реакций играет роль в расчете

потока тау-нейтрино:

$$\mu \rightarrow \tau \rightarrow \nu_\tau$$

Последние два канала рождения тау-нейтрино конкурируют друг с другом в разных областях энергий и в разных направлениях движения частиц. Но в обоих случаях потоки ниже, чем потоки тау-нейтрино от распадов очарованных частиц [2].

2 Z-фактор

Поток нейтрино, падающий на Землю, изменяется, проходя через толщу вещества. Одни нейтрино поглощаются средой, другие рождаются при взаимодействии космических лучей с атмосферой. Поэтому задача по нахождению потока нейтрино является актуальной и очень непростой. Необходимо знать, какое примерное количество нейтрино пройдет через наблюдательную установку, чтобы можно было правильно анализировать экспериментальные данные.

Z-фактор - это функция, с помощью которой можно относительно просто рассчитать энергетический спектр нейтрино после прохождения через среду любой толщины.

Метод расчета спектра нейтрино с помощью Z-фактора описан в статье [1].

Рассмотрим этот метод.

Для начала введем одномерное уравнение переноса с граничным условием (3):

$$\frac{\partial F_\nu(E, x)}{\partial x} = \frac{1}{\lambda_\nu(E)} \left(-F_\nu(E, x) + \int_0^1 \Phi_\nu(y, E) F_\nu(E_y, x) \frac{dy}{1-y} \right) \quad (3)$$

Граничное условие:

$F_\nu(E, x = 0) = F_\nu^0(E)$ – поток нейтрино на поверхности Земли

$x = \int_0^L \rho(L') dL'$ – эффективная глубина в единицах измерения $[g/cm^2]$

$F_\nu(E, x)$ – поток нейтрино на произвольной глубине x

$\lambda_\nu(E)$ – длина взаимодействия нейтрино

$\Phi_\nu(y, E)$ – функция регенерации

$E_y = \frac{E}{1-y}$, где E – начальная энергия, y – бьеркеновская переменная – доля энергии налетающего лептона, потерянная в результате взаимодействия.

Определим поток нейтрино на произвольной глубине через эффективный пробег поглощения нейтрино $\Lambda_\nu(E, x)$ по формуле (4):

$$F_\nu(E, x) = F_\nu^0(E) \exp\left(-\frac{x}{\Lambda_\nu(E, x)}\right) \quad (4)$$

Из уравнения (3) можно видеть, что $\Lambda_\nu(E, x) > \lambda_\nu(E)$. Поэтому введем Z -фактор, установив тем самым соответствие между $\Lambda_\nu(E, x)$ и $\lambda_\nu(E)$ по формуле (5).

$$\Lambda_\nu(E, x) = \frac{\lambda_\nu(E)}{1 - Z_\nu(E, x)} \quad (5)$$

Таким образом, если мы знаем Z -фактор, то несложно посчитать поток нейтрино на произвольной глубине через уравнение (4).

К вычислению Z -фактора и сводится данный метод. С помощью него легко вычислить эффективный пробег поглощения, а далее, и энергетический спектр.

3 Байкальский нейтринный телескоп Baikal-GVD

3.1 Задачи нейтринной астрофизики

Нейтринная астрофизика — молодой раздел физики и астрофизики. К настоящему времени имеется два значительных результата - это регистрация нейтринного потока от Солнца и детектирование нейтринного импульса от сверхновой SN 1987A.

Нейтринная астрофизика высоких энергий решает следующие вопросы [3]:

- Какие астрофизические объекты являются источниками нейтрино высоких энергий;
- Какова природа источников гигантского энерговыделения, наблюдаемого в активных ядрах галактик;
- Каковы механизмы ускорения частиц в источниках;
- Какие процессы происходят с нейтрино на пути от источника к Земле;
- Исследование свойств нейтрино: массы, сечения взаимодействия.

Нейтрино представляет большой интерес для астрофизиков, так как оно почти не взаимодействует с веществом. А это значит, что частица может дойти до Земли нетронутой. Она не отклоняется магнитными полями, практически сохраняя направление на источник. Нейтрино несут информацию о разных стадиях коллапса массивных звезд, позволяя исследовать вещество при очень больших давлениях и температурах.

С ростом энергии, сечение взаимодействия нейтрино с веществом

возрастает, поэтому зарегистрировать частицу становится проще. На сегодняшний день гипотетическими источниками нейтрино являются сверхновые; активные ядра галактик: квазары, блазары; двойные системы; сталкивающиеся галактики [7].

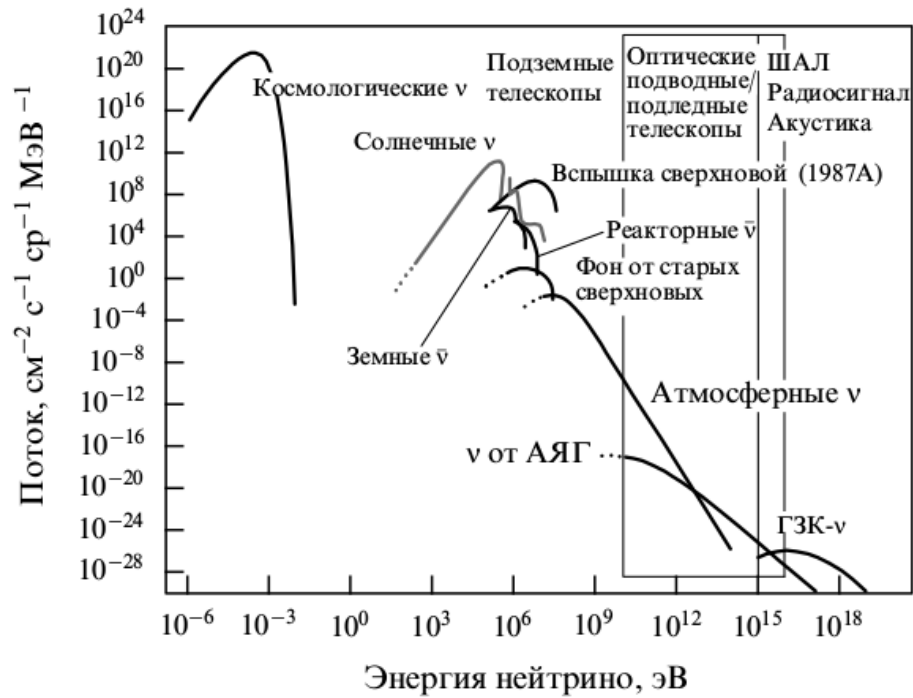


Рис. 6: Спектр нейтрино различного происхождения

На рис.6 показан спектр нейтрино. Различные диапазоны энергий отвечают различным источникам нейтрино. Эксперимент Baikal-GVD регистрирует атмосферные и астрофизические нейтрино.

3.2 Принцип работы нейтринного телескопа

Нейтринные телескопы нацелены на обнаружение нейтрино от удаленных источников. Такие нейтрино имеют очень высокие энергии и фоном для них служат атмосферные нейтрино.

Детекторы для изучения дальнего космоса строятся в естественных

средах. Телескопы находятся либо во льду, либо в воде. Так, Baikal-GVD и ANTARES расположены в озере Байкал и Средиземном море соответственно, а кластеры обсерватории IceCube заморожены в лед на Южном полюсе. Дело в том, что исследуемые частицы при взаимодействии с рабочим телом установки (со льдом, либо с водой) рождают мюон или ливень частиц, которые движутся со скоростью большей, чем скорость света в данной среде. Из-за этого появляется черенковский свет, который детектор и регистрирует.

Таким образом, основным элементом нейтринного телескопа являются фотодетекторы. Которые находятся на достаточно больших расстояниях друг от друга (десятки и сотни метров). Чем больше энергия нейтрино, тем больше размер световой вспышки. Для астрофизических нейтрино с энергией 1 ПэВ она достигает сотни метров. Поэтому и размеры рабочего тела установки гигантские.

Оптическая система регистрирует черенковский свет вторичных мюонов либо электромагнитных или адронных ливней. Излучение от ливней формируется фотонами, испускаемыми заряженными частицами ливней, в основном, электронами и позитронами.

В силу большой проникающей способности вторичного мюона нейтринный телескоп фиксирует в рабочем теле установки черенковский свет от него. Энергия мюонного нейтрино может быть определена по результатам восстановления энергий мюона и ливня, генерируемого в вершине нейтринного взаимодействия.

На рис. 7 можно видеть мюонный трек и конус черенковского излучения, который регистрируют оптические модули телескопов.

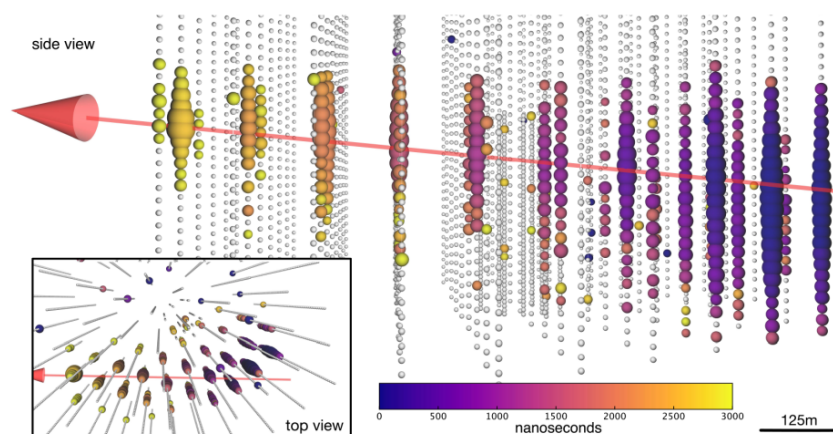


Рис. 7: Мюонный трек и конус черенковского излучения

Исследование природных потоков электронных и тау-нейтрино, составляющих две трети от полного потока, в экспериментах на нейтринных телескопах возможно лишь посредством регистрации вторичных ливней, генерируемых в водной мишени. Адронные ливни образуются во взаимодействиях всех типов нейтрино с ядрами по каналам заряженных (CC) и нейтральных (NC) токов [7].

Преимущество водных детекторов заключается в хорошей точности восстановления угла прихода нейтрино, пространство для водных телескопов менее изотропно, чем для ледяных. Недостатками являются наличие природной биолюминесценции и достаточно высокого фона.

3.3 Baikal-GVD

Байкальский нейтринный телескоп Baikal-GVD находится на озере Байкал примерно в 4 км от берега, на глубине около 1 км.

Baikal-GVD состоит из 8 кластеров, которые оформлены в виде цилиндров. Каждый кластер включает в себя 8 стрингов. 7 из них расставлены по кругу на расстоянии 60 м друг от друга и 300 м от центра. На

каждый стринг приходится по 36 оптических модулей (ОМ). К 2022 году планируется разместить уже 9 кластеров. Планируемый объем 1.5 km^2 с 27 кластерами.

По конструкции телескоп наиболее чувствителен к восходящим или горизонтальным нейтрино и энергиям в диапазоне от 0.1 ТэВ до 100 ПэВ [10]. Угловое разрешение составляет около 0.25° .

Важным преимуществом Байкальского нейтринного телескопа является возможность менять конфигурацию детектора с февраля по апрель, когда на озере образуется устойчивый ледяной покров.

На рис. 8 показано примерное расположение телескопа и его устройство.

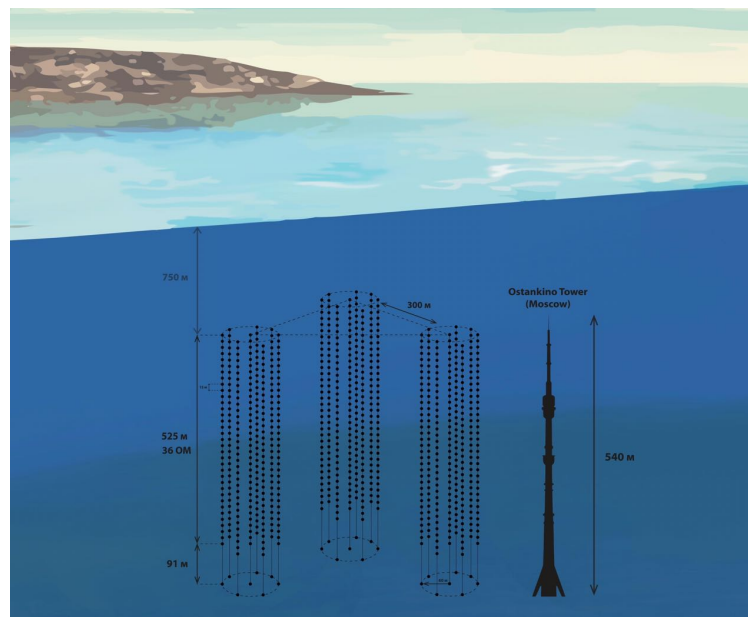


Рис. 8: Baikal-GVD

4 Экспериментальная часть

Целью данной работы является расчет Z-фактора для атмосферных тау-нейтрино. Z-фактор поможет смоделировать поток тау-нейтрино на конкретной глубине Земли, в том числе на глубине, на которой находится телескоп Baikal-GVD.

В второй главе было выписано уравнение переноса (3), в которое можно подставить выражения (4) и (5). Интегрируя по частям, получим следующее уравнение для Z-фактора (6) :

$$Z_\nu(E, x) = \frac{1}{x} \int_0^x \int_0^1 \eta_\nu(y, E) \Phi_\nu(y, E) \exp[-x' D_\nu(E, E_y, x')] dx' dy \quad (6)$$

$E_y = \frac{E}{1-y}$, где E – начальная энергия, y – бьеркеновская переменная – доля энергии налетающего лептона, потерянная в результате взаимодействия.

Через $D_\nu(E, E_y, x)$ обозначен обобщенный коэффициент поглощения, зависящий от $Z_\nu(E, x)$:

$$D_\nu^n(E, E_y, x) = \frac{1 - Z_\nu^n(E_y, x)}{\lambda_\nu(E_y)} - \frac{1 - Z_\nu^n(E, x)}{\lambda_\nu(E)} \quad (7)$$

Функция регенерации определяется через уравнение (8):

$$\sum_T N_T \frac{d\sigma_{\nu T \rightarrow \nu X}(y, E_y)}{dy} = \Phi_\nu(y, E) \sum_T N_T \sigma_{\nu T}^{tot}(E) \quad (8)$$

Суммирование проводится по нуклонам ($T = p, n$), а дифференциальное сечение рассчитывается только для нейтрального тока. Сечение вза-

имодействия, использованное в расчетах, показано на рис. 9.

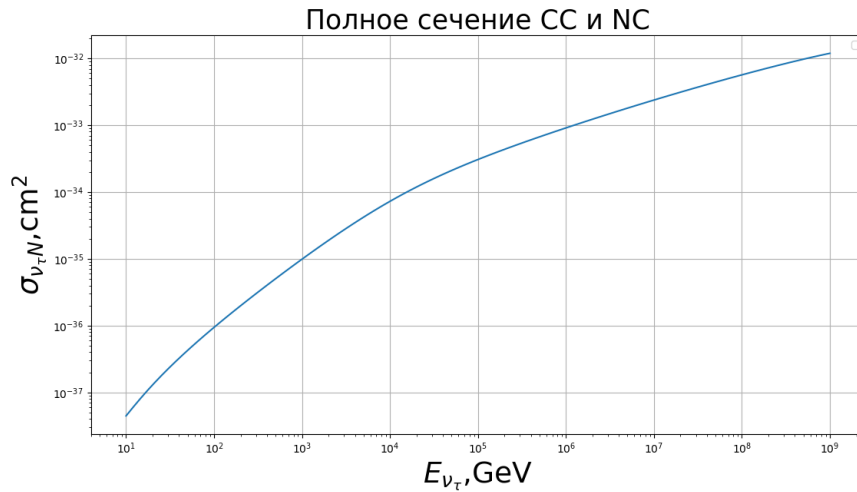


Рис. 9: Полное сечение взаимодействия нейтрино с нуклоном

Функция $\eta_\nu(y, E)$ задается формулой (9) :

$$\eta_\nu(y, E) = \frac{F_\nu^0(E_y)}{F_\nu^0(E)(1 - y)} \quad (9)$$

Графики функций регенерации и $\eta_\nu(y, E)$ показаны на рис. 10 и 11.

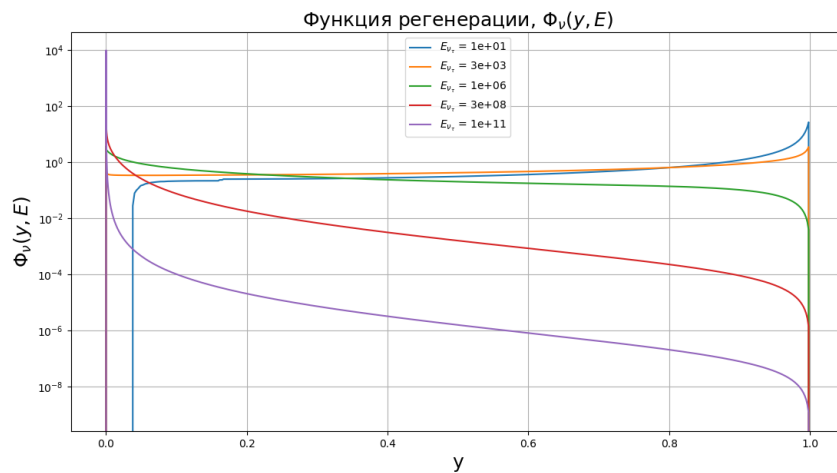


Рис. 10: Функция регенерации

Z-фактор удовлетворяет условию $0 < Z_\nu(E, x) \leq 1$

Вычислим Z-фактор методом итераций (разложение по малому па-

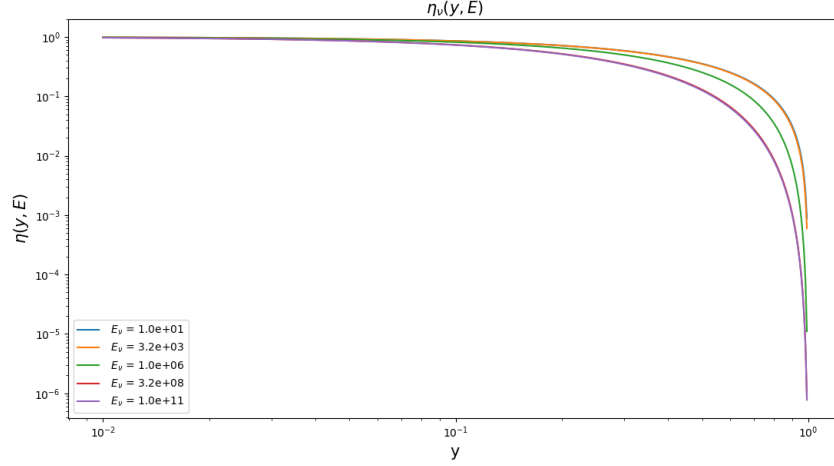


Рис. 11: Функция $\eta_\nu(y, E)$

раметру $x D_\nu(E, E_y, x)$):

$$Z_\nu(E, x) = Z_\nu(E, 0) + \delta Z_1 + \delta Z_2 + \dots$$

Нулевой порядок: $Z_\nu(E, 0) = Z_\nu^0(E)$ на поверхности при $x=0$.

Первый порядок: $Z_\nu^1(E, x) = Z_\nu^0(E) + \delta Z_1$.

С учетом тонкого поглотителя мы можем записать нулевой порядок следующим образом, уравнение (10) :

$$Z_\nu^0(E) = \int_0^1 \eta_\nu(y, E) \Phi_\nu(y, E) dy \quad (10)$$

Уравнение (11) для потока тау-нейтрино $F_\nu^0(E)$ при $x = 0$ было взято из статьи [2]. Из графика на рис. 12 видно, что поток представляет из себя непрерывную убывающую по степенному закону функцию.

$$F_\nu^0(E) = \frac{1 \times 10^{-7} E^{0.5} (GeV cm^2 srs)^{-1}}{(E/GeV)^3} \times \frac{1}{1 + (E/10^6)^{0.7} + (E/(4 * 10^6))^{1.5}} \quad (11)$$

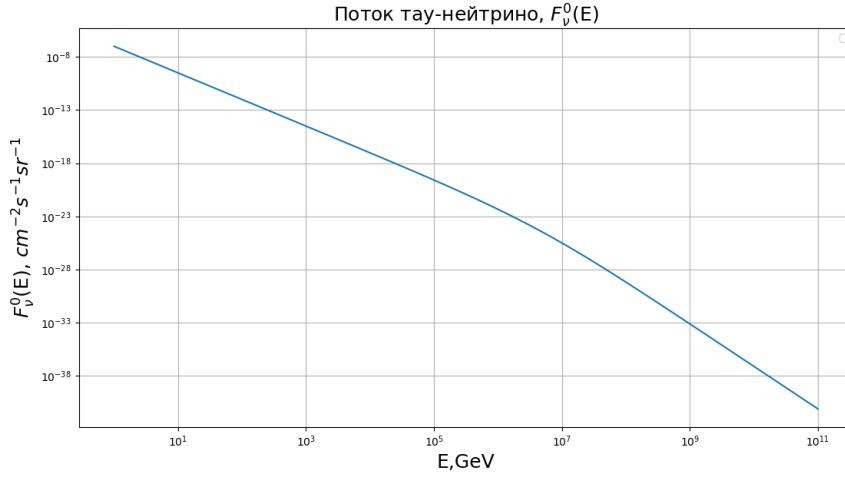


Рис. 12: Поток тау-нейтрино

Далее, перейдем к вычислению первого порядка Z-фактора для произвольной глубины. Для этого полагаем, что $Z_\nu^0 = 0$.

$$Z_\nu^1(E, x) = \int_0^1 \eta_\nu(y, E) \Phi_\nu(y, E) \left[\frac{1 - e^{-x D_\nu(E, E_y)}}{x D_\nu(E, E_y)} \right] dy \quad (12)$$

$$\text{Где } D_\nu(E, E_y) = \frac{1}{\lambda_\nu(E_y)} - \frac{1}{\lambda_\nu(E)}$$

Первый порядок Z-фактора вычислен по формуле (12) и построен на рис. 13.

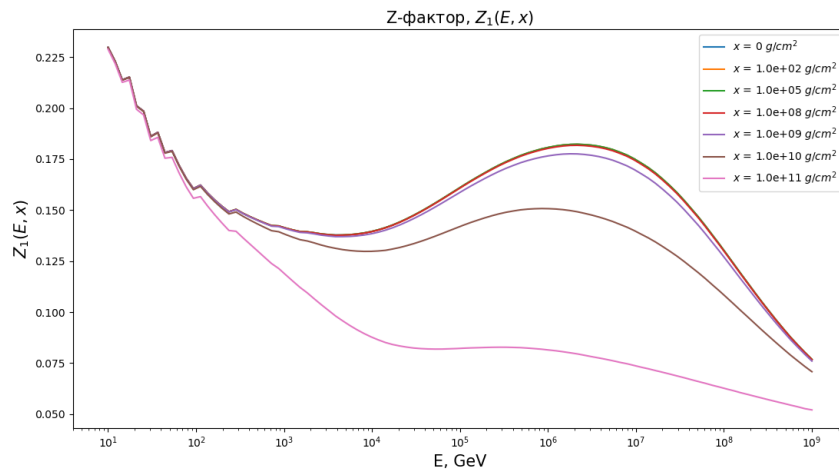


Рис. 13: Z-фактор

С помощью полученного распределения Z-фактора по энергиям и глубине, мы можем рассчитать поток нейтрино по формуле (13) :

$$F_\nu(E, x) = F_\nu^0(E) \exp\left(-\frac{x}{\Lambda_\nu(E, x)}\right) = F_\nu^0(E) \exp\left(-\frac{x}{\lambda_\nu(E)} + \frac{Z_1(E, x)x}{\lambda_\nu(E)}\right) \quad (13)$$

$$F_\nu(E, x) = F_\nu^0(E) P_{absorb} P_{reg} \quad (14)$$

В формулу (14) для потока входят два фактора, отвечающие за перерасеяние и поглощение нейтрино. P_{absorb} – это вероятность поглощения нейтрино посредством заряженного тока. P_{reg} – это вероятность перерасеяния нейтрино на нуклоне через нейтральный ток. В этой вероятности и участвует найденный Z - фактор. На рис. 14 приведен график фактора регенерации - вероятности перерасеяния.

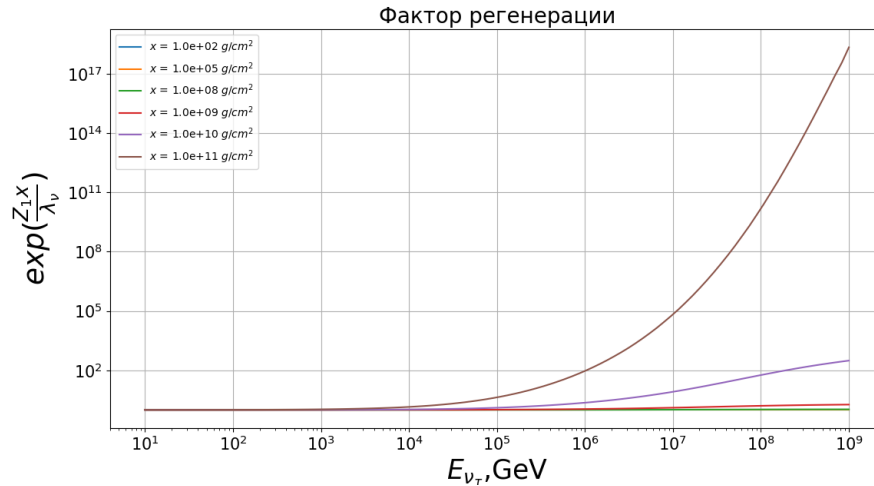


Рис. 14: Вероятность перерасеяния нейтрино на нуклоне

Из рис.14 видно, что при увеличении пройденного пути и энергии нейтрино, увеличивается вероятность перерасеяния нейтрино на нуклоне.

Поглощение нейтрино происходит через заряженный ток. В этом про-

цессе при взаимодействии нейтрино с нуклоном рождается другой лептон и адронная струя. Процесс нейтрального тока отвечает перерасеянию нейтрино на нуклоне. Это значит, что в реакции взаимодействия нейтрино с веществом через обмен Z-бозоном продуктом взаимодействия является все так же нейтрино. Оно не исчезает, а продолжает жить. Нейтрино "регенерирует".

Таким образом, вклад в общую вероятность фактора регенерации нейтрино велик при больших энергиях и большом пройденном пути и нельзя в расчете потока нейтрино пренебрегать процессами нейтрального тока и учитывать лишь заряженный ток, то есть поглощение. Рис. 15 подтверждает огромный вклад процесса перерасеяния в общую вероятность, разница между поглощением и общей вероятностью составляет примерно 18 порядков.

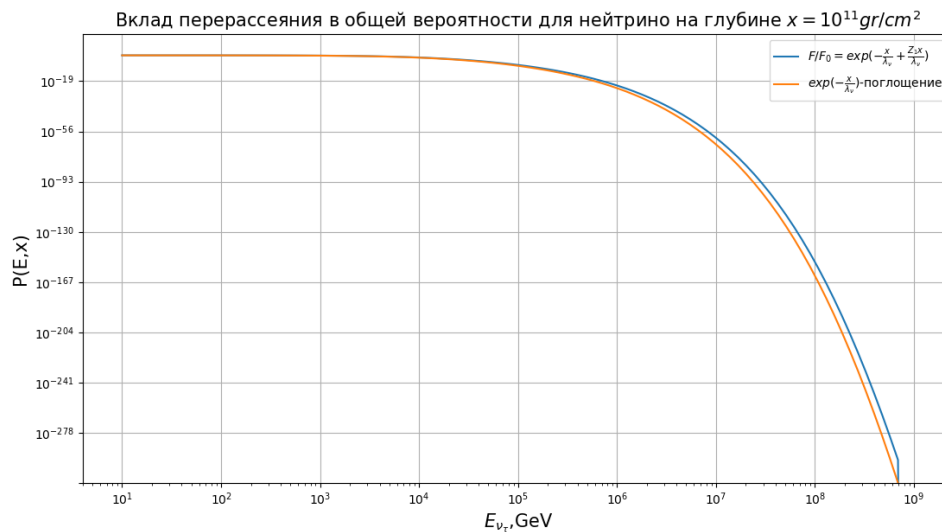


Рис. 15: Вклад перерасеяния при $x = 10^{11} gr/cm^2$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании был проведен обзор литературы по физике нейтрино: взаимодействию нейтрино с веществом, основам стандартной модели, образованию атмосферных нейтрино, рассмотрены диаграммы Фейнмана. Также в работе было рассказано о современном и перспективном эксперименте Baikal-GVD. В рамках этого проекта удалось поработать и автору данной работы.

Коллаборация Baikal-GVD разрабатывает множество программных пакетов для моделирования процессов важных для анализа экспериментальных данных. Таким пакетом является генератор NuProp, в котором и были проведены описанные расчеты. Генератор NuProp тестировался в течение нескольких месяцев, были проведены подготовительные работы, которые понадобились в конечной задаче по нахождению Z -фактора.

В ходе работы был разобран метод решения уравнения переноса нейтрино, т.е. метод нахождения потока нейтрино на произвольной глубине, который был придуман в 1999 году физиками В. Наумовым и Л. Перроне. В этом методе учитываются процессы перерассеяния и поглощения нейтрино. Решение этого интегро-дифференциального уравнения переноса сводится к расчету Z -фактора разложением его по малому параметру. Но важно знать начальный поток нейтрино на поверхности Земли.

Т.к. в генераторе NuProp уже был реализован расчет Z -фактора для мюонных нейтрино, мы занимались атмосферными тау-нейтрино.

Итогом работы является написание программного кода для расчета Z -фактора. Сделан вывод, что упрощенное представление о поглощении

нейтрино средой неверно при больших энергиях и большом пройденном пути нейтрино. При таких параметрах активную роль начинают играть процессы нейтрального тока, регенерации нейтрино, которые дают положительный вклад в потоки нейтрино. Т.е. поток атмосферных нейтрино становится больше, чем в упрощенной модели поглощения нейтрино, когда учитываются лишь процессы заряженного тока.

Материалы работы по моделированию взаимодействия нейтрино в генераторе NuProP были опубликованы в журнале *Symmetry* 26 февраля 2021 года в статье «High-Energy Neutrino Astronomy—Baikal-GVD Neutrino Telescope in Lake Baikal», <https://doi.org/10.3390/sym13030377>

В заключение хочется выразить большую благодарность научному сотруднику ОИЯИ, Владимиру Аллахвердянцу, за активную помощь в работе с генератором NuProP, автором которого он является.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Naumov V. A. Neutrino Propagation Through Matter / V. A. Naumov, L. Perrone // *Astropart. Phys.* – 1999. – V. 10. – P. 239-252.
2. Bulmahn A. Secondary atmospheric tau neutrino production / A. Bulmahn, M. Reno // *Physical review D: Particles and fields.* – 2010. – V. 82. – I. 5. – 057302 – pp. 4.
3. Синеговский С. И. Космические нейтрино высоких энергий : методические указания / С. И. Синеговский. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2009. – 60 с.
4. Окунь Л. Б. Лептоны и кварки / Л. Б. Окунь. – М. : Наука, 1990. – 346 с.
5. Кобякин А. С. Введение в физику элементарных частиц: учебно- методическое пособие. — А. С. Кобякин. — М.: МФТИ, 2018. — 19 с.
6. Емельянов В. М. Стандартная модель и ее расширения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 584 с.
7. Джилкибаев Ж. – А. М. Черенковские детекторы в нейтринной астрофизике высоких энергий/ Ж. – А. М. Джилкибаев, Г. В. Домогацкий, О. В. Суворова // *Успехи физических наук.* – 2015. – Том. 185, No 5. – с. 531-539
8. Панасюк М. И. Радиоактивная Вселенная. — Фрязино: Век 2. 2019. — 272 с.
9. Кузьмичев Л. А. Нейтринная астрофизика [Электронный ресурс] / Л. А. Кузьмичев // *Ядерная физика в интернете: сайт.* – URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru>

10. Stasielak J. High-Energy Neutrino Astronomy—Baikal-GVD Neutrino Telescope in Lake Baikal/ J. Stasielak 1, P. Malecki, D. Naumov, V. Allakhverdian, A. Karnakova, K. Kopański, W. Noga and on behalf of the Baikal-GVD Collaboration // *Symmetry*. – 2021. – V. 13. – I. 3. – 377 – pp. 18.