

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Громенко Екатерина Сергеевна

**Сечения нейтринных взаимодействий для
различных энергий нейтрино**

КУРСОВАЯ РАБОТА 2 КУРСА

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. О. Б. Самойлов

Москва 2026

Содержание

1	Введение	2
2	Взаимодействие нейтрино с веществом	3
2.1	Классификация взаимодействий нейтрино с веществом	3
2.2	Сечения взаимодействия в различных энергетических диапазонах . . .	4
3	Обзор экспериментов	6
3.1	Эксперименты лаборатории Ферми	6
3.2	Осцилляционные эксперименты в Японии	7
3.3	Эксперименты в CERN	7
4	Генераторы нейтринных событий	8
5	Сравнение данных эксперимента NOvA с результатами Монте-Карло симуляции	9
5.1	Моделирование	9
5.2	Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования .	10
6	Заключение	13

1 Введение

Нейтрино – электрически нейтральный лептон. Различают нейтрино трех ароматов: *электронное* ν_e , *мюонное* ν_μ , *тау-нейтрино* ν_τ . Вместе с *электроном* e^- , *мюоном* μ^- и *тау-лептоном* τ^- нейтрино соответствующих ароматов образуют три поколения лептонов.

Изучение сечений взаимодействия нейтрино с ядрами в различных энергетических областях необходимо для проверки предсказаний Стандартной Модели, для анализа данных осцилляционных экспериментов с целью уменьшения систематических ошибок и для астрофизических приложений.

В работе приводится обзор основных каналов взаимодействия нейтрино с веществом в широком диапазоне энергий, обзор ускорительных экспериментов, проводится сравнение данных эксперимента NOvA по сечениям взаимодействия нейтрино с ядрами через заряженный ток с результатами моделирования, выполненного в модели бегущей аксиальной массы нуклона.

2 Взаимодействие нейтрино с веществом

Сечение взаимодействия нейтрино с веществом сильно зависит от энергии налетающего нейтрино. В зависимости от переданной нейтрино энергии и импульса оно может взаимодействовать с ядром как с целым, с нуклоном внутри ядра или с кварками внутри нуклона.

2.1 Классификация взаимодействий нейтрино с веществом

В зависимости от объектов, с которыми взаимодействует нейтрино и продуктами взаимодействия можно выделить следующие типы взаимодействия [1]:

- **Упругое рассеяние на нуклоне:** нейтрино обменивается Z -бозоном с нуклоном в ядре. В результате – то же нейтрино и нуклон в основном состоянии:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow \nu_l(\bar{\nu}_l) + N$$

- **Квазиупругое рассеяние на нуклоне:** нейтрино обменивается W^\pm -бозоном с нуклоном в ядре. Образуется заряженный лептон того же аромата, что нейтрино, и нуклон вылетает из ядра:

$$\nu_l + n \rightarrow l^- + p$$

$$\bar{\nu}_l + p \rightarrow l^+ + n$$

- **Многонуклонное взаимодействие:** нейтрино взаимодействует с парой связанных нуклонов в ядре посредством, например обмена виртуальным мезоном (мезон-обменное взаимодействие), выбивая оба из ядра:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + NN \rightarrow l^\pm + N + N$$

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + NN \rightarrow \nu_l(\bar{\nu}_l) + N + N$$

- **Резонансное рассеяние на нуклоне:** нейтрино взаимодействует с нуклоном. Нуклон переходит в возбужденное состояние. Резонанс затем распадается, преимущественно на пион и нуклон:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow l^\pm + N^* \rightarrow l^\pm + \pi + N'$$

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow \nu_l(\bar{\nu}_l) + N^* \rightarrow \nu_l(\bar{\nu}_l) + \pi + N'$$

- **Глубокоупругое рассеяние на нуклоне:** нейтрино взаимодействует с кварком в нуклоне, в результате образуется лептон того же аромата, что нейтрино, происходит адронизация:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow l^\pm + X$$

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow \nu_l(\bar{\nu}_l) + X$$

- **Когерентное рассеяние на ядре:** процессы, в которых конечное ядро остается в основном состоянии. Простейший пример – упругое когерентное рассеяние на ядре:

$$\nu_l + A \rightarrow \nu_l + A$$

Другими примерами являются процессы когерентного рождения мезонов и фотонов:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + A \rightarrow l^\mp + m^\pm + A$$

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + A \rightarrow \nu_l(\bar{\nu}_l) + m^0 + A$$

- **Дифракционное рассеяние на нуклоне:** нейтрино взаимодействует с нуклоном, в результате рождается мезон или фотон, а нуклон остается в основном состоянии:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow l^\mp + m^\pm + N$$

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow \nu_l(\bar{\nu}_l) + m^0 + N$$

* В качестве частного случая квази-упругого рассеяния можно выделить процесс **обратного нейтринного захвата:**

$$\nu_e + n \rightarrow e^- + p$$

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

2.2 Сечения взаимодействия в различных энергетических диапазонах

Удобно выделить несколько диапазонов энергии нейтрино, в каждом из которых наибольший вклад в полное сечение взаимодействия вносят определенные типы:

- **Область $E_\nu < 100$ МэВ**

Основной процесс - когерентное упругое рассеяние на ядре. Является фоновым во многих экспериментах по поиску темной материи. В ускорительных экспери-

ментах, где энергии нейтрино достигают \sim ГэВ, не вносит значительного вклада в полное сечение. При энергиях 1-5 МэВ также используется процесс обратного нейтринного захвата при регистрации $\bar{\nu}_e$ в реакторных экспериментах;

- **Область $E_\nu \approx 0.1-1$ ГэВ**

Основным процессом является квазиупругое рассеяние и многонуклонные взаимодействия. На практике выделить чистое квазиупругое рассеяние в детекторе невозможно из-за ядерных эффектов в конечном состоянии, поэтому в экспериментах квазиупругие события выделяют по наблюдаемой в детекторе топологии "1 лептон и 0 пионов" ($CC0\pi$), из-за чего вклад в статистику вносят не только "истинные" квазиупругие события.

Исторически анализ данных эксперимента MiniBooNE показал значительное превышение измеренного сечения над предсказаниями модели релятивистского Ферми-газа (модель ядра, использующаяся для описания квазиупругих событий). Первоначально расхождение было предложено компенсировать путем завышения значения аксиальной массы нуклона M_A (параметр в зависимости аксиального форм-фактора нуклона от q^2). Позже стало ясно, что проблемой был неучет многонуклонных взаимодействий, также удовлетворяющих топологии $CC0\pi$ [1];

- **Область $E_\nu \approx 0.5-3$ ГэВ**

В данном диапазоне большой вклад в сечение вносит резонансное взаимодействие. Главную сложность представляют ядерные эффекты. Пион, родившийся внутри ядра, проходит сквозь плотную ядерную среду, где подвергается взаимодействиям в конечном состоянии. Пион может изменить знак заряда или полностью поглотиться ядром. В случае поглощения пиона наблюдаемое событие удовлетворяет топологии $CC0\pi$ и становится фоном для квазиупругого взаимодействия;

- **Область $E_\nu \approx 3-5$ ГэВ**

Сложная для описания и моделирования переходная область между областями доминирования резонансного и глубоко неупругого взаимодействий. Иногда называется областью полунклюзивного глубоконеупругого рассеяния (SIDIS). Для описания применяется гипотеза кварк-адронной дуальности [1];

- **Область $E_\nu > 5$ ГэВ**

Основной тип взаимодействия – глубоко неупругое. Сечение глубоко неупругого рассеяния через заряженный ток линейно зависит от энергии нейтрино.

3 Обзор экспериментов

Нейтринные эксперименты можно классифицировать по типу используемого в них источника нейтрино: солнечные, атмосферные, геонейтрино, реакторные, ускорительные, астрофизические. Далее рассмотрим некоторые ускорительные эксперименты.

3.1 Эксперименты лаборатории Ферми

- **MINERVA (Main Injector Neutrino Experiment to study ν -A interactions) [2]** – эксперимент, проводившийся с 2009 по 2019 год. Использовал пучок NuMI. Основная задача – измерение сечений рассеяния мюонных нейтрино на различных ядерных мишенях (H_2O , He, C, Fe, Pb) в энергетическом диапазоне 1-10 ГэВ;
- **NO ν A (NuMI Off-axis ν_e Appearance) [3]** – действующий длиннобазный осцилляционный эксперимент, использующий пучок NuMI. Основной рабочий энергетический диапазон – 1-5 ГэВ. Длина базы составляет 810 км – ближний детектор находится в лаборатории Ферми, дальний – в Миннесоте. Главные задачи эксперимента – измерение параметров осцилляций, изучение иерархии масс нейтрино, поиск CP-нарушения в лептонном секторе. Также изучает сечения взаимодействия с ядрами электронных и мюонных нейтрино;
- **MicroBooNE (Micro Booster Neutrino Experiment) [4]** – завершивший набор данных в 2021 году эксперимент. Представлял собой жидкоаргоновую время-проекционную камеру (LArTPC) и использовал пучок Booster Neutrino Beam (BNB). Главные задачи – проверка аномалии MiniBooNE (избыток событий с электронными нейтрино в области низких энергий), поиск стерильных нейтрино. Набрал большую статистику по сечениям взаимодействия электронных и мюонных нейтрино с аргоном, которые понадобятся для DUNE;
- **DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) [5]** – будущий длиннобазный осцилляционный эксперимент, использующий интенсивный нейтринный пучок, создаваемый комплексом LBNF (Long-Baseline Neutrino Facility). Основной рабочий энергетический диапазон – от сотен МэВ до нескольких ГэВ с пиком \approx 2-3 ГэВ. Длина базы составит 1300 км – ближний детектор находится в FermiLab, дальний с жидкоаргоновой время-проекционной камерой (LArTPC) – в лаборатории Сэнфорд (SURF). Основные цели эксперимента – прецизионное изучение нейтринных осцилляций, поиск распада протона и изучение нейтрино от сверхновых. Также DUNE будет детально изучать сечения взаимодействия нейтрино с аргоном;

- **DONUT (Direct observation of the nu tau) [6]** – эксперимент, проводивший набор данных в 1997 году. Главной целью была регистрация тау-нейтрино – последнего не обнаруженного на то время лептона, через взаимодействия, проходящие через заряженный ток. В 2000 году объявлено об обнаружении 4 событий с участием тау-нейтрино, в 2007 уже о 9. Эксперимент впервые измерил инклюзивные сечения взаимодействия тау нейтрино через заряженный ток.

3.2 Осцилляционные эксперименты в Японии

- **T2K (Tokai to Kamioka) [7]** – действующий длиннобазный осцилляционный эксперимент, использующий пучок от ускорительного комплекса J-PARC. Основной рабочий энергетический диапазон – от сотен МэВ до 1 ГэВ с пиком 0.6 ГэВ. Длина базы составляет 295 км: ближний детектор ND280 расположен в J-PARC, дальний – Super-Kamiokande (водный черенковский детектор) в Камиоке;
- **Hyper-Kamiokande [8]** – будущий длиннобазный прецизионный осцилляционный эксперимент, работающий в том же энергетическом диапазоне, что T2K, но использующий дальний детектор в 8 раз большего рабочего объема по сравнению с Super-Kamiokande.

3.3 Эксперименты в CERN

- **NOMAD (Neutrino Oscillation Magnetic Detector) [6]** – эксперимент, проведенный в CERN с 1995 по 1998 год, главной целью которого являлся поиск нейтринных осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. Проводился в широком энергетическом диапазоне – от нескольких ГэВ до 300-400 ГэВ. В эксперименте были изучены сечения рассеяния мюонных нейтрино во многих процессах, включая процессы с рождением странных и очарованных адронов и процесс когерентного рождения нейтральных пионов;
- **FASER (ForwArd Search ExpeRiment) [6]** – действующий с 2022 года эксперимент, нацеленный на поиск легких слабовзаимодействующих частиц и на изучение сечений взаимодействия нейтрино с ядрами при высоких энергиях – от сотен ГэВ до \sim ТэВ.

4 Генераторы нейтринных событий

Монте-Карло генераторы нейтринных событий широко используются в современных нейтринных экспериментах для оценки практической реализации и актуальности новых предлагаемых проектов, оптимизации конструкции детекторов, анализа экспериментальных данных и оценки систематических ошибок.

Главной задачей любого генератора является моделирование событий в широкой кинематической области по различным каналам взаимодействия, включая моделирование ядерных эффектов и эффектов в конечном состоянии. Стоит отметить исключительную важность Монте-Карло симуляций в физике нейтрино. Энергия нейтрино, попадающего в детектор, неизмерима прямо и вычисляется косвенно – по кинематическим характеристикам частиц, зарегистрированных в детекторе. Полная реконструкция события жестко зависит от выбора *ядерной модели* – теоретического комплексного описания взаимодействия, включающего в себя описание зависимости эксклюзивных сечений реакций от энергии нейтрино, ядерных эффектов (Ферми-движение нуклонов, энергия связи нуклонов в ядре, ядерное экранирование, Паули-блокирование) и эффектов в конечном состоянии. В процессе реконструкции генерируются события с использованием выбранной ядерной модели, результаты симуляции затем сопоставляются с наблюдениями в детекторе, после чего делаются выводы о соответствии модели данным [1]. Таким образом, в физике нейтрино для анализа экспериментальных данных использование генераторов необходимо и стало общепринятым.

На данный момент наиболее распространенными генераторами являются:

- **GENIE** [9] – используется в ускорительных экспериментах *NOvA*, *MINERVA*, *MicroBooNE*, *ICARUS*, *DUNE*. Поддерживает генерацию событий в энергетическом диапазоне от ~ 100 МэВ до нескольких сотен ГэВ, а также полное описание геометрии детекторов и пучков нейтрино;
- **NEUT** [10] – разработан в 1980-х годах для эксперимента *Kamiokande*. Поддерживает генерацию событий в энергетическом диапазоне от 100 МэВ до нескольких ТэВ. Используется в экспериментах *Super-Kamiokande*, *T2K*, *Hyper-Kamiokande*;
- **GiBUU** [11] – разработан в Гисенском университете. Использует транспортную модель на основе уравнения Больцмана–Уэлинга–Уленбека для моделирования эффектов в конечном состоянии (в отличие от каскадной модели в других генераторах). Рабочий энергетический диапазон: от ~ 100 МэВ до десятков ГэВ;
- **NuWro** [12] – разработан в 2006 году во Вроцлавском университете. Отличается плавным переходом от резонансной области к глубоко неупругому рассеянию. Поддерживает описание геометрии детекторов и пучков.

5 Сравнение данных эксперимента NOvA с результатами Монте-Карло симуляции

Рассмотрим сравнение экспериментальных данных с теоретическими модельными предсказаниями на примере данных эксперимента NOvA по сечениям взаимодействия мюонных нейтрино с ядрами через заряженный ток [13] и теоретического расчета, выполненного в модели бегущей аксиальной массы нуклона (более детальный анализ приведен в работе [14]).

5.1 Моделирование

Моделирование выполнено с помощью генератора GENIE, поддерживающего пользовательскую настройку через конфигурационные файлы, включающими в себя набор определенных моделей различных типов взаимодействия нейтрино с веществом – “комплексные модельные конфигурации (СМС)”. Также доступно использование “тюнов” – наборов моделей с подгонкой параметров под данные определенных экспериментов (в данном моделировании не используется).

В версии GENIE 3.4.0 реализована модель бегущей аксиальной массы нуклона – феноменологическая модель, предложенная для расчета сечений квазиупругого взаимодействия нейтрино с ядрами. В рамках данной модели токовая аксиальная масса нуклона M_A – параметр, использующийся в дипольной параметризации зависимости аксиального форм-фактора нуклона от квадрата переданного 4-импульса

$$F_A(Q^2) = \frac{F_A(0)}{\left(1 + \frac{Q^2}{M_A^2}\right)^2},$$

заменяется функцией от энергии нейтрино, которую в лабораторной системе отсчета можно параметризовать зависимостью:

$$M_A^{run} = M_0 \left(1 + \frac{E_0}{E_\nu}\right),$$

где $M_0 = 1.008 \pm 0.025$ ГэВ, $E_0 = 331_{-54}^{+57}$ МэВ

Константы M_0 и E_0 найдены из глобального фита имеющихся на 2013 г. данных ускорительных экспериментов по сечениям квазиупругих и квазиупругоподобных взаимодействий. Модель хорошо описывает существующие данные экспериментов T2K ND280, MINERVA, MiniBooNE [14].

Использованные в расчете элементный состав ближнего детектора NOvA и энергетический спектр нейтрино с $E_\nu < 20$ ГэВ можно найти в [13].

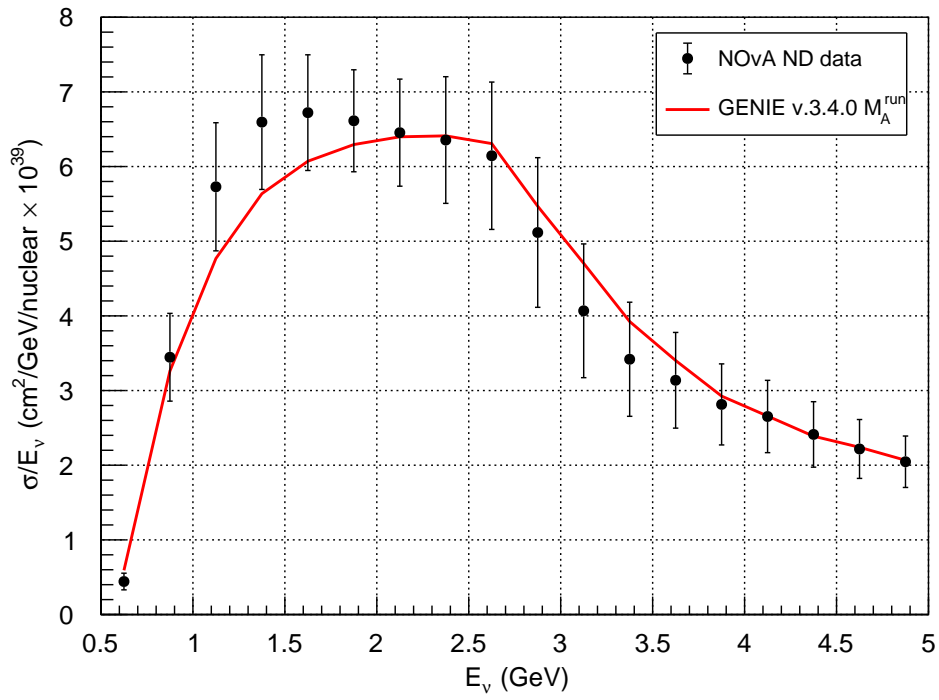
5.2 Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования

В результате моделирования получены значения полного сечения взаимодействия для $E_\nu < 5$ ГэВ, приведенные в таблице 1. По полученным значениям построен

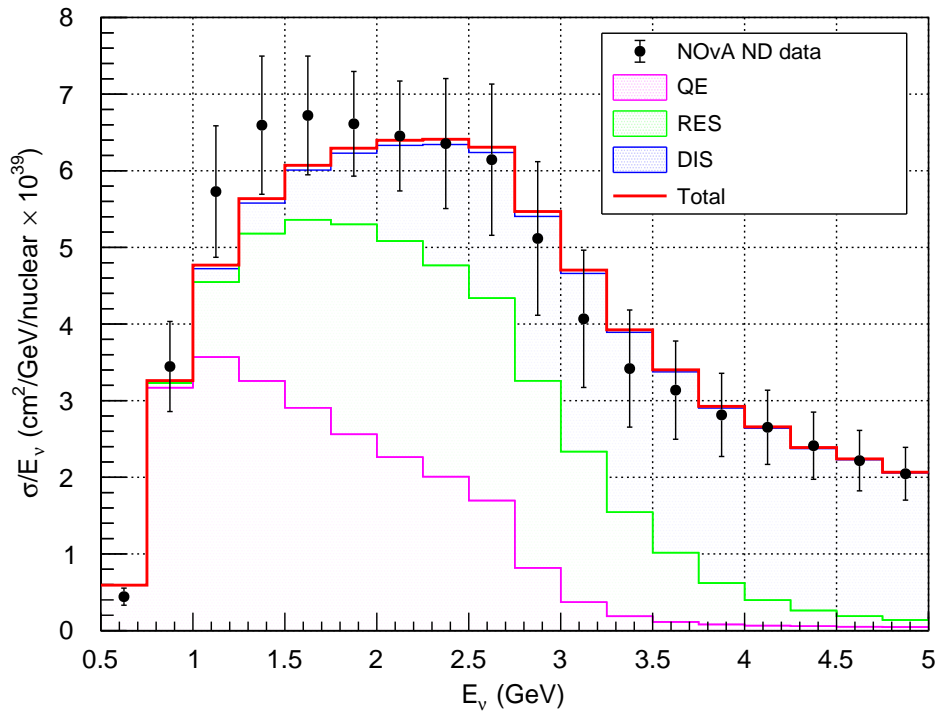
Таблица 1: Отношение полного сечения взаимодействия нейтрино к энергии нейтрино

Энергия нейтрино E_ν , ГэВ	Модельные предсказания σ_{tot}/E_ν , $\frac{\text{см}^2}{\text{ГэВ} \times 10^{-39}}$	Данные NOvA σ_{tot}/E_ν , $\frac{\text{см}^2}{\text{ГэВ} \times 10^{-39}}$	Ошибка данных σ , $\frac{\text{см}^2}{\text{ГэВ} \times 10^{-39}}$
0.6250	0.5925	0.4422	0.1115
0.8750	3.2620	3.4458	0.5878
1.1250	4.7689	5.7288	0.8579
1.3750	5.6363	6.5949	0.9017
1.6250	6.0712	6.7219	0.7747
1.8750	6.2945	6.6129	0.6829
2.1250	6.3981	6.4539	0.7171
2.3750	6.4110	6.3550	0.8482
2.6250	6.3074	6.1446	0.9868
2.8750	5.4684	5.1167	1.0022
3.1250	4.7039	4.0680	0.8957
3.3750	3.9243	3.4189	0.7641
3.6250	3.4024	3.1373	0.6409
3.8750	2.9255	2.8142	0.5428
4.1250	2.6582	2.6523	0.4842
4.3750	2.3886	2.4122	0.4384
4.6250	2.2402	2.2175	0.3943
4.8750	2.0662	2.0464	0.3444

график по точкам (см. Рис. 1 (а)) зависимости $\frac{\sigma_{tot}}{E_\nu}(E_\nu)$, а также гистограммы полного сечения и сечений квазиупругого, резонансного и глубоко-неупругого (в таблице 1 не приведены) взаимодействий через заряженный ток (см. Рис.1 (b)). Вклады в полное сечение от взаимодействий по другим каналам относительно малы и на Рис.1 не показаны.



(a)



(b)

Рис. 1: График зависимости отношения полного сечения взаимодействия нейтрино через заряженный ток к энергии нейтрино (а) и гистограммы сечений по различным каналам взаимодействия (b)

В качестве метода оценки согласия данных с теоретическими расчетами используем критерий хи-квадрат:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(E_i - T_i)^2}{\sigma_i^2},$$

где E_i – экспериментальное значение; T_i – теоретическое значение; σ_i – стандартное отклонение экспериментального значения E_i .

Удобно также использовать нормированный хи-квадрат

$$\chi_{res}^2 = \frac{\chi^2}{N_{df}},$$

где N_{df} – число степеней свободы, равное 18 в рассматриваемом случае.

По значениям из таблицы 1 получены значения $\chi^2 = 6.54$ и $\chi_{res}^2 = 0.36$. Значение $\chi_{res}^2 \ll 1$, что может свидетельствовать о завышении ошибок экспериментальных данных или о необходимости учета корреляции между данными.

6 Заключение

Современные ускорительные эксперименты преследуют несколько направлений:

1. Прецизионное изучение осцилляций нейтрино при средних энергиях, для чего детальное изучение сечений взаимодействия необходимо;
2. Проекты с высокими энергиями в CERN для изучения тау-нейтрино, процессов рождения и сечения тяжелых кварков и изучения структуры нуклона.

Проведенное сравнение данных NOvA с предсказаниями в модели бегущей аксиальной массы нуклона показывает, что модель можно использовать для удовлетворительного теоретического описания сечений и в дальнейшем, например для сравнения с данными NOvA для электронных нейтрино. Анализ также можно расширить, путем учета корреляций и построения других распределений – дифференциального и дважды дифференциального сечений.

Список литературы

- [1] L. Alvarez-Ruso *et al.* [NuSTEC], *Prog. Part. Nucl. Phys.* **100** (2018), 1-68
doi:10.1016/j.pnnp.2018.01.006 [arXiv:1706.03621 [hep-ph]].
- [2] MINERvA Collaboration, “MINERvA: Bringing neutrinos into sharp focus,” n.d.
URL: <https://minerva.fnal.gov/>
- [3] NOvA Collaboration, “NOvA Experiment,” n.d.
URL: <https://novaexperiment.fnal.gov/>
- [4] MicroBooNE Collaboration, “MicroBooNE,” n.d. URL: <https://microboone.fnal.gov/>
- [5] DUNE Collaboration, “Deep Underground Neutrino Experiment,” n.d.
URL: <https://lbnf-dune.fnal.gov/>
- [6] R. Mammen Abraham, J. Alvarez-Muñiz, C. A. Argüelles, A. Ariga, T. Ariga, A. Aurisano, D. Autiero, M. Bishai, N. Bostan and M. Bustamante, *et al.* *J. Phys. G* **49** (2022) no.11, 110501 doi:10.1088/1361-6471/ac89d2 [arXiv:2203.05591 [hep-ph]].
- [7] T2K Collaboration, “T2K Experiment,” n.d. URL: <https://t2k-experiment.org/>
- [8] Hyper-Kamiokande Collaboration, “Physics,” n.d. URL: <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/hk/about/research/>
- [9] C. Andreopoulos [GENIE], *Acta Phys. Polon. B* **40** (2009), 2461-2475
- [10] Y. Hayato and L. Pickering, *Eur. Phys. J. ST* **230** (2021) no.24, 4469-4481
doi:10.1140/epjs/s11734-021-00287-7 [arXiv:2106.15809 [hep-ph]].
- [11] O. Buss, T. Gaitanos, K. Gallmeister, H. van Hees, M. Kaskulov, O. Lalakulich, A. B. Larionov, T. Leitner, J. Weil and U. Mosel, *Phys. Rept.* **512** (2012), 1-124
doi:10.1016/j.physrep.2011.12.001 [arXiv:1106.1344 [hep-ph]].
- [12] T. Golan, C. Juszczak and J. T. Sobczyk, *Phys. Rev. C* **86** (2012), 015505
doi:10.1103/PhysRevC.86.015505 [arXiv:1202.4197 [nucl-th]].
- [13] NOvA Collaboration, “Data releases,” 2024. URL:
<https://novaexperiment.fnal.gov/data-releases/> 16
- [14] Какорин И.Д., Наумов В.А., Самойлов О.Б. ”Проверка модели “бегущей аксиальной массы” на данных по рассеянию мюонных нейтрино на ядрах в ближнем детекторе NOvA” // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2024. - Т. 119. - №11-12. - С. 785-795.
doi:[10.31857/S1234567824110016](<https://doi.org/10.31857/S1234567824110016>)