

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

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ И ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**«Поиск возможностей повышения чувствительности экспериментального  
исследования спектра бета-распада молекулярного трития к оценке  
эффективной массы электронного антинейтрино.»**

Выполнил студент  
408 группы  
Зубрилин Кирилл Васильевич

---

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н. Свешников Константин Алексеевич

---

Научный консультант:  
к.ф.-м.н. Титов Никита Андреевич

Допущена к защите  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_

МОСКВА

2022

# Содержание

1	Введение	3
2	Обзор задачи	6
3	Основная часть	7
4	Выводы	7
5	Заключение	7
6	Список литературы	8

# 1 Введение

Нейтрино являются весьма особенными для науки частицами, которые снова и снова приводили к неожиданным и невероятным открытиям, ряд из которых отмечен Нобелевскими премиями. Нейтрино были теоретически введены в 1930 году Паули для выполнения закона сохранения энергии-импульса, а их первое экспериментальное обнаружение состоялось в 1956 году группой Рейнеса и Коуэна на реакторе электростанции Savannah River. Позже оказалось, что существует три аромата нейтрино, что снова стало важным открытием. Затем были зарегистрированы осцилляции солнечных нейтрино по пути их распространения к Земле, что является квантовомеханическим эффектом, обычно проявляющимся лишь в атомных масштабах. Было обнаружено, что нейтрино имеют очень маленькую массу, что до сих пор является единственным значимым свидетельством существования физики элементарных частиц за пределами Стандартной модели. Есть множество других областей, где уже признано, что нейтрино играют важную роль, но есть очень серьезные поводы полагать, что в будущем могут появиться еще более удивительные результаты. Нейтрино — это безмассовые частицы в Стандартной модели. Прямое расширение СМ для введения масс нейтрино, аналогичных массам заряженных лептонов, заключается в добавлении правых (синглетных) нейтринных полей; в этом случае взаимодействия Юкавы будут свидетельствовать о наличии дираковских масс нейтрино после нарушения электрослабой симметрии. Однако это предположение не считается удовлетворительным сообществом теории нейтрино по двум причинам: а) не объясняет, почему абсолютная шкала массы нейтрино по крайней мере в миллион раз меньше, чем массы других фермионов СМ, и б) симметрии СМ не запрещают другие, так называемые Массовые члены Майораны для недавно введенных правых полей нейтрино. Эти массы не ограничены сверху средним значением вакуума Хиггса и, следовательно, должны принимать много большие значения, чем масса  $t$ -кварка. Принимая во внимание массовые члены Майораны, мы получим эффективные массы легких майорановских нейтрино в абсолютной шкале масс нейтрино  $m_\nu \simeq m_D^2/M_R$ ; здесь  $m_D$  и  $M_R \geq 10^{14}$  ГэВ величины элек-

трослабого нарушения симметрии и тяжелых майорановских нейтрино соответственно. Этот механизм установлен как механизм качелей типа I [1] [2]; это интересно, так как дает описание малости массы нейтрино, имеет потенциальную связь с лептогенезом и может даже подразумевать отношение к шкале, объединяющей электрослабое и сильное взаимодействия. Тогда массы легких нейтрино появляются как собственные значения массовой матрицы Майорана, а матрица Понтекорво-Маки-Накагава-Саката (далее ПМНС)  $U$  получается из относительного вращения полей левых заряженных лептонов и нейтрино (с которыми связан заряженный ток).

Вспомним, что абсолютные массы нейтрино появляются в теории как собственные состояния матрицы эффективных масс легких нейтрино. Хотя эксперименты с нейтринными осцилляциями способны измерять расщепление квадрата массы среди них и даже упорядочение масс, они не могут дать абсолютную шкалу масс нейтрино. Осцилляции нейтрино дают нижнюю оценку суммы масс нейтрино 0,06 эВ и 0,10 эВ для нормального и обратного порядков соответственно, в то время как текущие верхние границы, полученные различными методами,  $\simeq 1$  эВ. Если сумма масс нейтрино близка к нижней границе, мы говорим об иерархической схеме, где масса легкого нейтрино ближе к нулю по сравнению с расщеплениями масс. Если она близка к верхней границе, то речь уже идет о вырожденных массах нейтрино, поскольку расщепления  $|\Delta m^2| \ll m^2$  малы по сравнению с массами. Порядок масс нейтрино и масштаб шкалы являются важными параметрами для теоретических моделей, потому что устройство аромата в лагранжиане, описывающем массу нейтрино будет сильно различаться в нормальном иерархическом, обратном иерархическом и вырожденном случаях.

В значительной степени независимым способом получить абсолютную шкалу масс нейтрино являются точные кинематические эксперименты по изучению слабых взаимодействий. Сегодня основные усилия направлены на исследования процессов в двух нуклидах: бета-распад трития ( $^3\text{H}$ ) и захват электрона гольмием ( $^{163}\text{Ho}$ ). Что интересно, данные методы позволяют независимо получить массы электронных нейтрино и антинейтрино, которые должны быть равны при СРТ инвариантности. Особенность данных

методов состоит в том, что напрямую измеряются квадраты масс нейтрино, что накладывает некоторые трудности в получении дополнительного порядка точности по отношению непосредственно к массе.

Для тритиевых экспериментов используются спектрометры с электростатическим замедлением для получения максимального углового разрешения (так называемые МАС-Е фильтры) [3] [4]. Проект КАТРИН в полной мере использует данную технологию, что на сегодняшний день позволило получить значение верхней границы массы нейтрино 0.8 эВ (при 90% доверительном уровне) [5]. КАТРИН продолжит набор статистики для достижения заложенной чувствительности на уровне 0.2 эВ.

В данной же работе будут исследоваться способы повышения чувствительности исследования к оценке массы электронного антинейтрино.

## 2 Обзор задачи

Для определения массы нейтрино необходимо сопоставить экспериментальные данные с теоретическим предсказанием, полученным с помощью аналитической формулы  $\beta$ -распада и экспериментальной функции отклика.

$$T(E, U) = \int_0^{\theta_{max}} \mathcal{T}(E, \theta, U) \cdot \sin \theta \, d\theta = \quad (1)$$

$$\begin{cases} 0 & , \epsilon \leq 0 \\ 1 - \sqrt{1 - \frac{E - qU}{E} \frac{B_{source}}{B_{ana}} \frac{2}{\gamma + 1}} & , 0 \leq E - qU \leq \Delta E \\ 1 - \sqrt{1 - \frac{B_{source}}{B_{max}}} & , E - qU \geq \Delta E \end{cases} \quad (2)$$

3 Основная часть

4 Выводы

5 Заключение

## 6 Список литературы

- [1] P. Minkowski. « $\mu \rightarrow e\gamma$  at a Rate of One Out of  $10^9$  Muon Decays?» B: *Phys. Lett.* B67 (1977), с. 421.
- [2] Murray Gell-Mann, Pierre Ramond и Richard Slansky. *Complex Spinors and Unified Theories*. 2013. arXiv: 2105.08533.
- [3] V. Lobashev и P. Spivak. «A METHOD FOR MEASURING THE ANTI-ELECTRON-NEUTRINO REST MASS». B: *Nucl. Instrum. Meth.* A 240 (1985), с. 305.
- [4] A. Picard et al. «A solenoid retarding spectrometer with high resolution and transmission for kev electrons». B: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 63 (1992), с. 345.
- [5] M. Aker et al. *First direct neutrino-mass measurement with sub-eV sensitivity*. 2021. arXiv: 2105.08533.