

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Станкевич Константин Леонидович

Осцилляции и квантовая декогеренция нейтрино

Специальность 1.3.3. —
«Теоретическая физика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена на кафедре теоретической физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук
профессор А.И.Студеникин

Официальные оппоненты: **Наумов Дмитрий Вадимович**,
доктор физико-математических наук,
Лаборатория ядерных проблем имени
В.П.Джелепова ОИЯИ,
заместитель директора лаборатории по научной
работе

Рубцов Григорий Игоревич,
доктор физико-математических наук, профессор
РАН,
Институт ядерных исследований РАН,
заместитель директора по научной работе

Дворников Максим Сергеевич,
доктор физико-математических наук,
Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн имени Н.В.Пушкова
РАН,
заведующий теоретическим отделом, ведущий на-
учный сотрудник

Защита состоится 17 ноября 2022 года в 17 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.011.2 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, дом 1, строение 2, физический факультет, физическая аудитория им. Р.В.ХОХЛОВА.

E-mail: ff.dissovet@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:

<https://istina.msu.ru/dissertations/499039107/>

Автореферат разослан “___” октября 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.011.2,
д.ф.-м.н. профессор

П. А.Поляков

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Нейтрино - массивная элементарная частица со спином " $\frac{1}{2}$ ", которая была предсказана Вольфгангом Паули в 1930 году. В 1946 году Бруно Максимович Понтекорво предложил возможность детектировать нейтрино от солнца, реакторов или ускорителей заряженных частиц, используя процесс, обратный бета-распаду. Позднее на основе этих идей Фредерик Райнес и Клайд Коуэн экспериментально обнаружили электронное нейтрино от реакторов. Мюонное и тауонное нейтрино были открыты в 1961 и 2000 году в экспериментах под руководством Леона Ледермана, Мелвина Шварца и Джека Стейнбергера.

Всего за открытия в области физики нейтрино было присуждено четыре Нобелевские премии. Это является подтверждением того, что нейтрино всегда стояло на острие науки и все открытия в области нейтрино неразрывно связаны с развитием фундаментальной физики. В 2015 году Нобелевская премия была получена Такааки Кадзитой и Артуром Макдональдом за открытие нейтринных осцилляций - одному из наиболее значимых эффектов в физике нейтрино, который подтверждает наличие массы у нейтрино и не описывается в рамках Стандартной модели.

Значимость и важность исследований нейтринных осцилляций обусловлена не только тем, что существование осцилляций нейтрино "расширило" Стандартную модель, но и тем, что эти исследования могут позволить определить другие до сих пор неизвестные свойства нейтрино, такие как: иерархия масс, природа массы нейтрино, электромагнитные свойства нейтрино. Кроме того, осцилляции нейтрино могут служить ключом как к исследованию астрофизических объектов (сверхновых, аккреционных дисков черных дыр, пульсары и др.), так и к обнаружению новых частиц (например, частиц темной материи, аксионов, темных фотонов и др.). Помимо этого, исследования в области физики нейтрино могут помочь в объяснении барионной асимметрии и в построении Теории Великого Объединения. Важность и актуальность исследований осцилляций нейтрино также подтверждается строительством новых нейтринных детекторов класса «мегасайенс»: JUNO, Hyper-Kamiokande, Байкальский нейтринный телескоп и другие.

Объектом исследования диссертации является нейтрино. **Предметом** диссертации являются флейворные и спин-флейворные осцилляции нейтрино с учетом эффекта квантовой декогеренции нейтринных состояний и новых взаимодействий нейтрино.

Квантовая декогеренция нейтринных состояний может возникать при взаимодействии частицы с внешней средой и проявляется в подавлении флейворных, спин-флейворных и коллективных осцилляций нейтрино. Для описания эффекта квантовой декогеренции нейтринных

состояний был впервые развит формализм, основы которого восходят к квантовой электродинамике открытых систем.

Целью диссертационной работы является развитие теории осциллирующих нейтрино, поиск и учет новых эффектов в осцилляциях нейтрино.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**.

1. Обоснование и развитие нового подхода, который позволил описать квантовую декогеренцию нейтрино за счет радиационного распада нейтрино на безмассовую частицу.
2. Получение замкнутых аналитических выражения для параметров декогеренции и релаксации нейтрино.
3. Исследование влияния квантовой декогеренции на коллективные осцилляции нейтрино.
4. Исследование флейворных и спин-флейворных осцилляций нейтрино в астрофизических объектах с учетом зарядового радиуса и анапольного момента нейтрино.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Развитый формализм описания эволюции нейтрино во внешней среде на основе использования подхода, который ранее использовался в электродинамике открытых квантовых систем. Этот формализм позволил рассмотреть влияние распада нейтрино на более легкое состояние и безмассовые частицы (фотоны, темные фотоны, аксионы) и обратного процесса поглощения безмассовой частицы на осцилляции нейтрино. Важный результат диссертации состоит в полученном уравнении эволюции нейтрино в форме Линдблада с диссипативным членом, который учитывает квантовую декогеренцию, возникающую за счет распада нейтрино на безмассовую частицу и обратный процесс поглощения безмассовой частицы .
2. Аналитические выражения для параметров декогеренции и релаксации нейтрино, которые возникают за счет распада нейтрино на безмассовые частицы (фотоны, темные фотоны, аксионы) и обратного процесса поглощения безмассовой частицы.
3. При рассмотрении влияния квантовой декогеренции на коллективные осцилляции нейтрино показано, что квантовая декогеренция приводит к подавлению коллективных осцилляций. Получено новое условие существования биполярных коллективных осцилляций нейтрино, которое учитывает квантовую декогеренцию массовых состояний нейтрино.
4. При рассмотрении осцилляций нейтрино в астрофизических условиях с учетом взаимодействия нейтрино с электрическим током через зарядовый радиус и анапольный момент (с учетом как диагональных, так и недиагональных элементов) показано, что

взаимодействие нейтрино с внешним электрическим током через зарядовый радиус и анапольный момент нейтрино вызывает спиновые и спин-флейворные осцилляции. Получены новые вероятности флейворных и спин-флейворных осцилляций нейтрино и соответствующие резонансные условия, которые учитывают взаимодействие нейтрино через зарядовый радиус и анапольный момент нейтрино.

Научная новизна.

1. Для описания эволюции нейтрино во внешней среде впервые был предложен и развит метод, который ранее использовался только в электродинамике открытых квантовых систем. Это позволило впервые построить последовательную квантовую теорию влияния распада нейтрино на флейворные и спин-флейворные осцилляции нейтрино во внешней среде.
2. Впервые были получены аналитические выражения для параметров квантовой декогеренции нейтрино, соответствующие рассматриваемым в диссертации процессам.
3. Впервые получены условия возникновения биполярных коллективных осцилляций нейтрино в сверхновых, которые учитывают квантовую декогеренцию массовых состояний нейтрино.
4. Впервые рассмотрены флейворные и спин-флейворные осцилляции нейтрино с учетом взаимодействия нейтрино с внешней средой через диагональные и недиагональные зарядовый радиус и анапольный момент нейтрино. Впервые получены соответствующие вероятности осцилляций и резонансные условия.

Практическая ценность исследования обусловлена тем фактом, что эффекты квантовой декогеренции учитываются при анализе экспериментальных данных по потокам нейтрино от разных источников в рамках феноменологического описания. При этом до сих пор отсутствовал последовательный квантовый подход к описанию возникновения квантовой декогеренции нейтрино за счет взаимодействия нейтрино с внешней средой. Благодаря предложенной и развитой квантовой теории декогеренции нейтрино появилась возможность анализировать экспериментальные ограничения на параметры декогеренции, что в свою очередь позволяет обнаруживать или ограничивать физические явления не только в рамках Стандартной модели, но и за её пределами. Практическая ценность диссертации также заключается в том, что квантовая декогеренция массовых состояний нейтрино может влиять на спектр потоков нейтрино от астрофизических объектов (например, от сверхновых, аккреционных дисков черных дыр, квазаров).

Апробация результатов диссертационной работы.

Результаты неоднократно докладывались на международных российских и зарубежных конференциях (всего было сделано 16 докладов):

14я Международная школа по физике нейтрино и астрофизике (Россия, Саров, 18-23 июля, 2022); International Conference on High Energy Physics (Bologna, Italy, 6 – 13 July, 2022); 30th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Seoul, Korea, 2022); Astroneutrino Theory Workshop 2021, organized by the European Consortium for Astroparticle Theory (EuCAPT) (Prague, Czech Republic, September 20 - October 1, 2021); European Physical Society Conference on High Energy Physics (online conference, July 26-30, 2021); 17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (online conference, 26 August - 3 September, 2021); Сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН “Физика фундаментальных взаимодействий” (Новосибирск, Россия, 2020); The European Physical Society Conference on High Energy Physics (Ghent, Belgium, 2019); 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (Toyama, Japan, 2019); 39th International Conference on High Energy Physics (Seoul, Korea, 2018); 28th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Heidelberg, Germany, 2018); 15th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (Sudbury, Canada, 2017); European Physical Society Conference on High Energy Physics (Venice, Italy, 2017).

Публикации.

Основные результаты диссертации изложены в 13 опубликованных работах (в журналах, индексируемых в Scopus), список которых приводится в конце автореферата.

Структура работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, содержит два приложения, двенадцать рисунков и список цитируемой литературы, содержащего 98 наименований. Общий объем диссертации 74 страницы.

Содержание диссертации

Введение. Обсуждается роль нейтрино в истории развития физики элементарных частиц. Отмечается важность нейтрино как частицы, которая не описывается в рамках Стандартной модели, и которая может служить проводником в “новую физику”. Одним из наиболее значимых явлений в нейтринной физике являются флейворные и спин-флейворные осцилляции, которые являются предметом исследования диссертационной работы. Обсуждаются основные эффекты в осцилляциях нейтрино, а также современные состояния исследований по квантовой декогеренции массовых состояний нейтрино.

Глава 1. Физика нейтрино. В первой главе приведены основные свойства и характеристики нейтрино в минимально расширенной Стандартной модели. Рассматриваются электрослабые взаимодействия

нейтрино с другими частицами в рамках минимально расширенной Стандартной модели. Рассматриваются осцилляции нейтрино в вакууме и различных средах (неподвижная и движущаяся среда, магнитное поле). Рассмотрены коллективные осцилляции, которые возникают при движении нейтрино через плотный нейтринный газ.

Рассматривается подход к описанию эволюции и осцилляций нейтрино, основанный на уравнении Линдблада, который позволяет описать эволюцию нейтрино с учетом квантовой декогеренции нейтринных состояний.

Глава 2. Квантовая декогеренция нейтрино за счет распада нейтрино. Во второй главе представлены основные результаты диссертации по исследованию квантовой декогеренции нейтрино, возникающей за счет распада массивного нейтрино на более легкое состояние и безмассовую частицу (фотон, темный фотон и аксион), а также за счет обратного процесса поглощения безмассовой частицы. Указанные процессы протекают как по схеме Стандартной модели, так и в рамках ее обобщений. В диссертации предложен и развит новый формализм квантовой декогеренции нейтрино, который представляет собой существенно новое развитие подхода, который ранее использовался в электродинамике открытых квантовых систем.

Уравнение эволюции для системы “нейтрино” + “внешняя среда” в представлении взаимодействия записывается в виде

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho(t) = -i \int d^3x [H_{int}(x), \rho(t)], \quad (1)$$

где матрица плотности $\rho(t)$ описывает полную систему “нейтрино” + “внешняя среда”, $H_{int}(x)$ - гамильтониан взаимодействия. Рассмотрим распад нейтрино на произвольную безмассовую частицу, в качестве которой может выступать фотон, темный фотон или безмассовый аксион. Тогда Гамильтониан взаимодействия в общем виде можно записать как

$$H_{int}(x) = \sum_{\alpha} j_{\alpha}(x) a_{\alpha}(x), \quad (2)$$

где a_k - безмассовое поле, нейтринный ток выражается как $j_{\alpha} = \bar{\nu}(x)\Gamma_{\alpha}\nu(x)$, Γ_{α} - вершина взаимодействия, в которую входит константа взаимодействия.

В случае радиационного распада нейтрино вершина заменяется на общую электромагнитную вершину $\Gamma_{\alpha} \rightarrow \Gamma_{\mu}$, а поле заменяется на фотонное: $a_{\alpha}(x) \rightarrow A_{\mu}(x)$. В случае распада нейтрино на безмассовый аксион необходимо провести замену $a_{\alpha}(x) \rightarrow \phi(x)$, а вершинную функцию заменить $\Gamma_{\alpha} \rightarrow (g^s \mathbb{1} + ig^p \gamma^5)$ для описания скалярного и псевдоскалярного взаимодействия. Так как нас интересует эволюция только нейтрино, которая описывается с помощью редуцированной матрицы плотности

$\rho_\nu(t) = \text{tr}_a[\rho(t)]$, где след берется по всем степеням свободы внешнего окружения (безмассовому полю), то формальное решение для матрицы плотности может быть получено интегрированием уравнения (1):

$$\rho_\nu(t_f) = \text{tr}_a \left(\text{TE} \exp \left[\int_{t_i}^{t_f} d^4x [H_{\text{int}}(x), \rho(t_i)] \right] \right). \quad (3)$$

Для получения уравнения эволюции нейтрино необходимо взять след по степеням свободы внешнего поля. В результате было получено уравнение эволюции нейтрино, которое по структуре является уравнением типа Линдблада:

$$\frac{d\rho_\nu(t)}{dt} = -i [H_\nu(x), \rho_\nu(t)] + D[\rho_\nu(t)], \quad (4)$$

где диссипативный член записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} D[\rho_\nu(t)] = & \sum_k \left(A_k \rho_\nu(t) A_k^\dagger - \frac{1}{2} \{A_k A_k^\dagger, \rho_\nu(t)\} \right) + \\ & + \sum_k \left(B_k \rho_\nu(t) B_k^\dagger - \frac{1}{2} \{B_k B_k^\dagger, \rho_\nu(t)\} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Для операторов Линдблада A_k и B_k получены следующие выражения:

$$\begin{aligned} A_k &= \sum_{n: \{m_n < m_k\}} \sqrt{\Gamma_{kn}^d} |k\rangle \langle n|, \\ B_k &= \sum_{l: \{m_l > m_k\}} \sqrt{\Gamma_{kl}^i} |k\rangle \langle l|, \end{aligned} \quad (6)$$

где Γ_{kn}^d - ширина распада тяжелого нейтрино на более легкое состояние и безмассовую частицу ($\nu_k \rightarrow \nu_n + a$), Γ_{kn}^i - ширина процесса поглощения бесмассовой частицы ($\nu_k + a \rightarrow \nu_n$).

Следует отметить, что Γ^d и Γ^i - ширины процессов в присутствии внешней среды при конечной температуре, задаваемая выражением

$$\Gamma^d = [1 + N(E)] \Gamma_{vac}^d, \quad (7)$$

где Γ_{vac}^d ширина распада нейтрино в вакууме и $N(E)$ распределение Бозе-Эйнштейна для фотонов

$$N(E) = \frac{1}{e^{E/kT} - 1}, \quad (8)$$

где T - температура внешней среды. Операторы Линдблада A_k описывают процесс индуцированного излучения, операторы B_k - процесс индуцированного поглощения. В вакууме (то есть, при температуре внешней среды $T = 0$) операторы $B_k = 0$.

В диссертации в разделе 2.2 рассмотрен конкретный процесс, вызывающий квантовую декогеренцию нейтрино, а именно, процесс радиационного распада нейтрино в электронной среде. Гамильтониан взаимодействия такого распада записывается в виде

$$H_{int}(x) = j_\alpha(x)A^\alpha(x), \quad (9)$$

где A_α - электромагнитное поле, $j_\alpha(x)$ - нейтринный ток

$$j_\alpha(x) = \bar{\nu}_i(x)\Gamma_\alpha\nu_j(x). \quad (10)$$

Спинор $\nu_i(x)$ описывает эффективное массовое состояние нейтрино в среде m_i ($i, j = 1, 2, 3, 4$). Здесь также рассматривается стерильные состояние нейтрино ν_4 с массой порядка одного электронвольта. Электромагнитная вершина (10) имеет вид

$$\Gamma_\alpha = U_{ei}^*U_{ej}\tau_{\alpha\beta}\gamma^\beta L, \quad (11)$$

где U - матрица смешивания и $L = \frac{1}{2}(1 - \gamma_5)$. Предполагается, что электроны среды в среднем покоятся.

В случае нерелятивистских электронов (NR) константа $\tau_{\alpha\beta}$ может быть записана в форме

$$\tau_{\alpha\beta}^{NR} = \tau^{NR}P_{\alpha\beta} = -\sqrt{2}\frac{eG_F n_e}{m_e}P_{\alpha\beta}, \quad (12)$$

где e , m_e и n_e - заряд, масса и плотность электронов соответственно и

$$P_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} - \frac{k_\alpha k_\beta}{|\vec{k}|^2}. \quad (13)$$

В противоположном случае ультрарелятивистских электронов (когда температура электронов $T_e \gg m_e$) справедливо соотношение:

$$\tau_{\alpha\beta}^{ER} = \tau^{ER}P_{\alpha\beta} = -\frac{eG_F T^2}{2\sqrt{2}}P_{\alpha\beta}. \quad (14)$$

Для вырожденного электронного газа имеем:

$$\tau_{\alpha\beta}^{Deg} = \tau^{Deg}P_{\alpha\beta} = -\frac{\sqrt{2}eG_F}{4}\left(\frac{3n_e}{\pi}\right)^{2/3}P_{\alpha\beta}. \quad (15)$$

В дальнейшем будем использовать обозначение τ для одного из трех случаев: τ^{ER} , τ^{NR} или τ^{Deg} .

Для вероятности флейворных осцилляций нейтрино с учетом радиационного распада в электронной среде получено:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_l} = \sin^2 2\tilde{\theta}_{ij} \sin^2(\Delta_{ij}x) e^{-\kappa x/2} + \frac{1}{2} \left(1 - \sin^2 2\tilde{\theta}_{ij} e^{-\kappa x/2} - \cos^2 2\tilde{\theta}_{ij} e^{-\kappa x} \right), \quad (16)$$

где параметр декогеренции

$$\kappa = \frac{\Delta_{ij}}{\pi^2} \sin^2 2\tilde{\theta}_{ij} \tau^2 N(2\Delta_{ij}). \quad (17)$$

В случае распада нейтрино на темный фотон параметр декогеренции имеет вид:

$$\kappa_X = \frac{\Delta_{ij}}{\pi^2} \sin^2 2\tilde{\theta}_{ij} \tau_X N_X(2\Delta_{ij}). \quad (18)$$

Очевидно, что возможность прямого детектирования радиационного распада нейтрино в астрофизических объектах значительно затруднена из-за высокой светимости внешней среды. В то же время, в земных условиях вероятность радиационного распада нейтрино практически нулевая. Тем не менее, как показано в диссертации, радиационный распад нейтрино может влиять на осцилляции нейтрино, а значит, на спектр нейтрино от астрофизических объектов. Поэтому исследование спектров нейтрино от астрофизических объектов в будущих нейтринных экспериментах может позволить также изучать радиационный распад нейтрино. Такая задача является особенно актуальной, так как это может позволить обнаружить или ограничить электромагнитные свойства и нестандартные взаимодействия нейтрино.

Наиболее вероятно рассмотренный механизм квантовой декогеренции в нейтринных осцилляциях может проявиться в экстремальных астрофизических средах, которые характеризуются высокими температурами. В этом случае электромагнитное взаимодействие нейтрино с фотонами задается вершинами (11) и (14). Параметры декогеренции и релаксации, а также соответствующий эффект квантовой декогеренции существенно зависят от температуры электронного газа T . Достаточно высокие температуры возникают во время вспышек сверхновых, когда температуры электронов и фотонов могут достигать значений до 30 МэВ и 100 МэВ соответственно. Поэтому предложенный механизм квантовой декогеренции нейтрино может быть значительным именно в таких астрофизических средах.

Из полученного выражения для параметра декогеренции (17) видно, что эффект квантовой декогеренции нейтрино максимален в резонансных областях, т.е. там, где выполняются условия: $\sin^2(2\tilde{\theta}_{ij}) = 1$. Для нейтринных осцилляций между активным и стерильным состояниями $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ резонансная область лежит значительно ближе к центру взрыва сверхновой, где ожидаются самые высокие температуры. Для этого случая

максимальное значение параметра декогеренции достигает величины порядка $\Gamma_1 \sim 10^{-21}$ ГэВ в области резонанса. В случае осцилляций между активными состояниями нейтрино $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$ параметр существенно меньше ($\Gamma_1 \sim 10^{-31}$) ГэВ. Для сравнения, экспериментальные ограничения на параметр декогеренции нейтрино в реакторных экспериментах составляет $\Gamma_1 \sim 10^{-24}$ ГэВ, а в случае солнечных нейтрино $\Gamma_1 \sim 10^{-28}$ ГэВ.

Глава 3. Новые эффекты в осцилляциях нейтрино. В этой главе рассмотрены новые эффекты во флейворных и спин-флейворных осцилляциях нейтрино. В разделе 3.1 изучено влияние квантовой декогеренции на коллективные осцилляции. В расчетах используется приближение двух флейворных нейтрино, то есть рассматриваются осцилляции нейтрино между двумя состояниями ν_e и ν_l , где ν_l является мюонным или тауонным нейтрино (ν_μ или ν_τ). Использована модель сверхновой, в которой все нейтрино рождаются возле нейтриносферы с одинаковой энергией. В данном разделе диссертации не рассматривается конкретный механизм возникновения квантовой декогеренции нейтрино и используется уравнение Линдблада в общем виде

$$\frac{\partial P_k(t)}{\partial t} \sigma_k = 2\epsilon_{ijk} H_i P_j(t) \sigma_k + D_{kl} P_l(t) \sigma_k, \quad (19)$$

где матрица плотности была разложена по матрицам Паули $\rho(t) = \frac{1}{2} (1 + \vec{\sigma} \vec{P})$. Диссипативная матрица D_{kl} имеет вид

$$D_{ll} = -diag\{\Gamma_1, \Gamma_1, 0\}. \quad (20)$$

В результате получено уравнение на собственные значения, которое описывает возможность существования биполярных коллективных осцилляций. В общем виде оно имеет вид:

$$(\omega - i\Gamma_1) \begin{pmatrix} \rho'_{12} \\ \bar{\rho}'_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{12} & B_{12} \\ \bar{B}_{21} & \bar{A}_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho'_{12} \\ \bar{\rho}'_{21} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

где в правой части равенства введена матрица стабильности. Если собственные значения принимают мнимое значение, то недиагональные элементы матрицы плотности начинают экспоненциально расти, что приводит к нестабильности системы. В результате возникают биполярные коллективные осцилляции нейтрино. Таким образом, биполярные коллективные осцилляции возникают, если выполняются следующие условия:

$$\begin{cases} (A_{12} - \bar{A}_{21})^2 + 4B_{12}\bar{B}_{21} < 0, \\ \text{Im} \left(\sqrt{(A_{12} - \bar{A}_{21})^2 + 4B_{12}\bar{B}_{21}} \right) > \Gamma_1. \end{cases} \quad (22)$$

Первое условие совпадает с условием, полученным ранее в работах других авторов. Второе условие существования коллективных биполярных

осцилляций является новым, ранее оно не рассматривалось. Видно, что квантовая декогеренция препятствует экспоненциальному росту недиагональных элементов матрицы плотности, что приводит к подавлению коллективных осцилляций. В явном виде для рассмотренной в диссертации модели сверхновой условия (23) можно представить в виде:

$$\begin{cases} n_\nu^2[1 - (1 - \beta)(\alpha - \beta)] + n_\nu \frac{\delta m^2}{E}(1 - \beta) + \left(\frac{\delta m^2}{2E}\right)^2 < 0, \\ \mathcal{I}m \left(\sqrt{n_\nu^2[1 - (1 - \beta)(\alpha - \beta)] + n_\nu \frac{\delta m^2}{E}(1 - \beta) + \left(\frac{\delta m^2}{2E}\right)^2} \right) > \Gamma_1, \end{cases} \quad (23)$$

где β ($\bar{\beta}$) означает начальную асимметрию между электронными нейтрино (антинейтрино) и ν_l -нейтрино (антинейтрино), α - отношение электронных антинейтрино и электронных нейтрино, n_e и n_ν - плотность электронов и нейтрино соответственно.

В диссертации также проведено численное моделирование коллективных осцилляций нейтрино при взрыве сверхновой, которые подтверждают полученные аналитические результаты.

Другим новым эффектом, который рассмотрен в разделе 3.2, являются спиновые и спин-флейворные осцилляции нейтрино во внешней среде с учетом взаимодействия нейтрино с электрическим током через зарядовый радиус и анапольный момент нейтрино. Отметим, что рассматриваются как диагональные, так и недиагональные электромагнитные форм-факторы нейтрино. Исследование выполнено в приближении двух флейворов нейтрино с двумя возможными спиральностями. Взаимодействие нейтрино с внешним электрическим полем введено с помощью эффективной электромагнитной вершины

$$\Lambda_\mu^{ki}(q) = (q^2 \gamma_\mu - q_\mu \gamma_\nu q^\nu) \left[\frac{\langle r^2 \rangle^{ki}}{6} + f_A^{ki} \gamma_5 \right], \quad (24)$$

где $f_A^{ki}(q^2)$ - анапольный момент нейтрино и $\langle r^2 \rangle$ - зарядовый радиус нейтрино в массовом базисе. В диссертации получены гамильтонианы взаимодействия нейтрино с продольной и перпендикулярной компонентами электрического тока $\mathbf{J}^{EM} = \mathbf{J}_\parallel^{EM} + \mathbf{J}_\perp^{EM}$ за счет зарядового радиуса и анапольного момента

Для гамильтониана, который отвечает за взаимодействие с продольной компонентой электрического тока, получено следующее выражение:

$$H_{J_{\parallel}}^{(f)} = 2J_{\parallel}^{EM} \begin{pmatrix} \frac{\langle r^2 \rangle^{ee}}{6} - f_A^{ee} & \frac{\langle r^2 \rangle^{el}}{6} - f_A^{el} & 0 & 0 \\ \frac{\langle r^2 \rangle^{el}}{6} - f_A^{el} & \frac{\langle r^2 \rangle^{ll}}{6} - f_A^{ll} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\langle r^2 \rangle^{ee}}{6} + f_A^{ee} & \frac{\langle r^2 \rangle^{el}}{6} + f_A^{el} \\ 0 & 0 & \frac{\langle r^2 \rangle^{el}}{6} + f_A^{el} & \frac{\langle r^2 \rangle^{ll}}{6} + f_A^{ll} \end{pmatrix}, \quad (25)$$

где введены эффективные значения для зарядового радиуса и анапольного момента нейтрино во флейворном базисе:

$$\begin{aligned} \langle r^2 \rangle^{ee} &= \langle r^2 \rangle^{11} \cos^2 \theta + \langle r^2 \rangle^{22} \sin^2 \theta + \langle r^2 \rangle^{12} \sin 2\theta, \\ \langle r^2 \rangle^{ll} &= \langle r^2 \rangle^{11} \sin^2 \theta + \langle r^2 \rangle^{22} \cos^2 \theta - \langle r^2 \rangle^{12} \sin 2\theta, \\ \langle r^2 \rangle^{el} &= \langle r^2 \rangle^{12} \cos 2\theta + \frac{1}{2} (\langle r^2 \rangle^{22} - \langle r^2 \rangle^{11}) \sin 2\theta, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} f_A^{ee} &= f_A^{11} \cos^2 \theta + f_A^{22} \sin^2 \theta + f_A^{12} \sin 2\theta, \\ f_A^{ll} &= f_A^{11} \sin^2 \theta + f_A^{22} \cos^2 \theta - f_A^{12} \sin 2\theta, \\ f_A^{el} &= f_A^{12} \cos 2\theta + \frac{1}{2} (f_A^{22} - f_A^{11}) \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (27)$$

Важно отметить, что продольная компонента электрического тока $\mathbf{J}_{\parallel}^{EM}$ изменяет только флейворные осцилляции нейтрино, но никак не влияет на спиновые осцилляции.

Гамильтониан, который отвечает за взаимодействие с поперечной компонентой электрического тока \mathbf{J}_{\perp}^{EM} , можно записать в блочном виде

$$H_{J_{\perp}}^{(f)} = \begin{pmatrix} 0 & \tilde{H}_{J_{\perp}}^{(f)} \\ \tilde{H}_{J_{\perp}}^{(f)\dagger} & 0 \end{pmatrix}, \quad (28)$$

где недиагональные элементы равны

$$\tilde{H}_{J_{\perp}}^{(f)} = 2J_{\perp}^{EM} \begin{pmatrix} \left(\frac{f_A}{\gamma} \right)_{ee} & \left[\tilde{\gamma}_{12}^{-1} \frac{\langle r^2 \rangle^{12}}{6} + \left(\frac{f_A}{\gamma} \right)_{el} \right] \\ \left[-\tilde{\gamma}_{12}^{-1} \frac{\langle r^2 \rangle^{12}}{6} + \left(\frac{f_A}{\gamma} \right)_{el} \right] & \left(\frac{f_A}{\gamma} \right)_{ll} \end{pmatrix}. \quad (29)$$

Здесь введены обозначения:

$$\begin{aligned} \left(\frac{f_A}{\gamma} \right)_{ee} &= \frac{f_A^{11}}{\gamma_{11}} \cos^2 \theta + \frac{f_A^{22}}{\gamma_{22}} \sin^2 \theta + \frac{f_A^{12}}{\gamma_{12}} \sin 2\theta, \\ \left(\frac{f_A}{\gamma} \right)_{ll} &= \frac{f_A^{11}}{\gamma_{11}} \sin^2 \theta + \frac{f_A^{22}}{\gamma_{22}} \cos^2 \theta - \frac{f_A^{12}}{\gamma_{12}} \sin 2\theta, \\ \left(\frac{f_A}{\gamma} \right)_{el} &= \frac{f_A^{12}}{\gamma_{12}} \cos 2\theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f_A^{22}}{\gamma_{22}} - \frac{f_A^{11}}{\gamma_{11}} \right) \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (30)$$

Отметим, что взаимодействие нейтрино через зарядовый радиус и анапольный момент с поперечной компонентой электрического тока порождает спиновые осцилляции нейтрино.

С использованием выражений для гамильтонианов (25), (28) и (29), учитывающих взаимодействие нейтрино с внешним электрическим током $\mathbf{J}^{EM} = \mathbf{J}_{\parallel}^{EM} + \mathbf{J}_{\perp}^{EM}$ за счет зарядового радиуса и анапольного момента, получены вероятности флейворных и спин-флейворных осцилляций нейтрино в общем виде.

В результате, обнаружено новое резонансное условие для вероятности спиновых осцилляций нейтрино $P_{\nu_e^L \nu_e^R}$ с учетом магнитного поля и движущейся среды, которое возникает только при наличии взаимодействия нейтрино с продольной компонентой электрического тока через анапольный момент нейтрино:

$$\left[\frac{G_F}{\sqrt{2}} (2n_e - n_n) (1 - v_{\parallel}) + 2 \left(\frac{\mu}{\gamma} \right)_{ee} B_{\parallel} - 4J_{\parallel}^{EM} f_A^{ee} \right] = 0. \quad (31)$$

Также в диссертации была получена в явном виде вероятность перехода из электронного левого нейтрино в правое стерильное состояние нейтрино:

$$P_{\nu_e^L \nu^R} = P_{\nu_e^L \nu_e^R} + P_{\nu_e^L \nu_t^R}, \quad (32)$$

где для вероятности переходов получено:

$$P_{\nu_e^L \nu_e^R} = \frac{\left[2J_{\perp}^{EM} \left(\frac{f_A}{\gamma} \right)_{ee} \right]^2}{\left[2J_{\perp}^{EM} \left(\frac{f_A}{\gamma} \right)_{ee} \right]^2 + \left[2J_{\parallel}^{EM} f_A^{ee} \right]^2}, \quad (33)$$

$$P_{\nu_e^L \nu_t^R} = \frac{4 (J_{\perp}^{EM})^2 \left[\tilde{\gamma}_{12}^{-1} \frac{\langle r^2 \rangle^{12}}{6} + \left(\frac{f_A}{\gamma} \right)_{el} \right]^2}{4 (J_{\perp}^{EM})^2 \left[\tilde{\gamma}_{12}^{-1} \frac{\langle r^2 \rangle^{12}}{6} + \left(\frac{f_A}{\gamma} \right)_{el} \right]^2 + \tilde{\Delta}^2}, \quad (34)$$

где введена эффективная разница энергий

$$\tilde{\Delta} = \left[J_{\parallel}^{EM} \left(\frac{\langle r^2 \rangle^{ee}}{6} - \frac{\langle r^2 \rangle^{ll}}{6} + f_A^{ee} + f_A^{ll} \right) - \frac{\delta m^2 \cos 2\theta}{4E} \right] \quad (35)$$

В формулах (32)-(35) не учитывались взаимодействия с внешним магнитным полем и движущейся средой.

Как следует из формул (32)-(35), характер зависимости вероятности спиновых осцилляций нейтрино от анапольного момента и зарядового радиуса различный. Напомним, что в экспериментах по рассеянию нейтрино

вклады от зарядового радиуса и анапольного момента неразличимы, поэтому одним из важных результатов диссертации заключается в том, что впервые показана принципиальная возможность различить в эксперименте эффекты от зарядового радиуса и анапольного момента.

Заключение. Перечислены полученные результаты и кратко сформулированы основные выводы диссертации.

Основные результаты работы.

1. В диссертации предложен и разработан новый теоретический подход, использовавшийся ранее только в квантовой электродинамике открытых систем, для описания эволюции нейтрино с учетом эффекта квантовой декогеренции нейтрино. В рамках данного подхода был рассмотрен новый механизм возникновения квантовой декогеренции нейтрино. Впервые показано, что квантовая декогеренция нейтрино может быть вызвана распадом нейтрино на безмассовую частицу или обратным эффектом (поглощением безмассовой частицы с переходом нейтрино из более легкого состояния в более тяжелое). Показано, что параметры декогеренции пропорциональны ширине распада нейтрино.

2. Рассмотрен пример возникновения квантовой декогеренции нейтрино за счет радиационного распада нейтрино. Показано, что квантовая декогеренция может быть вызвана радиационным распадом нейтрино на фотоны, а также на темные фотоны в электронной среде. Для обоих случаев найдены аналитические выражения для параметров декогеренции и сделаны численные оценки параметров декогеренции для реальных астрофизических условий, а именно для взрыва сверхновой.

3. Показано, что квантовая декогеренция массовых состояний нейтрино приводит к подавлению коллективных осцилляций нейтрино. Получены новые условия на существование биполярных коллективных осцилляций. Проведено численное моделирование и получены вероятности выживания электронного нейтрино и антинейтрино при взрыве сверхновых с одновременным учетом коллективных осцилляций и квантовой декогеренции массовых состояний нейтрино.

4. Рассмотрены флейворные и спин-флейворные осцилляции нейтрино с учетом взаимодействия нейтрино с электрическим током через зарядовый радиус и анапольный момент. Показано, что взаимодействие с перпендикулярной компонентой электрического тока вызывает спиновые осцилляции нейтрино, а взаимодействие с продольной компонентой модифицирует флейворные нейтринные осцилляции. Получены вероятности флейворных и спин-флейворных осцилляций нейтрино. Также получены новые условия резонансного усиления спин-флейворных осцилляций нейтрино.

Основное содержание диссертации и результаты выполненных исследований опубликованы в следующих работах.

[1] K. Stankevich, A. Studenikin. Neutrino quantum decoherence engendered by neutrino radiative decay // *Phys. Rev. D.* — 2020. — Vol. 101, no. 5. — P. 056004 (Impact Factor WoS: 5,407).

[2] A. Lichkunov, K. Stankevich, A. Studenikin, M. Vyalkov. Neutrino decay processes and flavour oscillations // *PoS.* — 2022. — Vol. EPS-HEP2021. — P. 202 (SJR: 0.116).

[3] A. Lichkunov, K. Stankevich, A. Studenikin, M. Vyalkov. Neutrino quantum decoherence engendered by neutrino decay to photons, familons and gravitons // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2021. — Vol. 2156. — P. 012240 (SJR: 0,210).

[4] K. Stankevich, A. Studenikin. Neutrino quantum decoherence due to entanglement with magnetic field // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2020. — Vol. 1342, no. 1. — P. 012131 (SJR: 0,210).

[5] K. Stankevich, A. Studenikin. Neutrino evolution and quantum decoherence // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2020. — Vol. 1468, no. 1. — P. 012148 (SJR: 0,210).

[6] K. Stankevich, A. Studenikin. The effect of neutrino quantum decoherence // *PoS.* — 2020. — Vol. EPS-HEP2019. — P. 424 (SJR: 0.116).

[7] K. Stankevich, A. Studenikin. Neutrino decoherence due to radiative decay // *PoS.* — 2019. — Vol. ICHEP2018. — P. 925 (SJR: 0.116).

[8] K. Stankevich, A. Studenikin. Neutrino quantum decoherence due to entanglement with a magnetic field // *PoS.* — 2018. — Vol. EPS — HEP2017. — P. 645 (SJR: 0.116).

[9] K. Stankevich, A. Studenikin. Collective neutrino oscillations accounting for neutrino quantum decoherence // *PoS.* — 2021. — Vol. ICHEP2020. — P. 216 (SJR: 0.116).

[10] V.Shakhov, K.Stankevich, A.Studenikin. Spin and spin-flavor oscillations due to neutrino charge radii interaction with an external environment // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2021. — Vol. 2156. — P. 012241 (SJR: 0,210).

[11] K. Kouzakov, F. Lazarev, V. Shakhov, K. Stankevich, A. Studenikin. Astrophysical neutrino oscillation accounting for neutrino charge radii // *PoS.* — 2021. — Vol. ICHEP2020. — P. 217 (SJR: 0.116).

[12] Z. Chen, K. Kouzakov, Y.-F. Li, V. Shakhov, K. Stankevich, A. Studenikin. Collective neutrino oscillations in moving and polarized matter // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2021. — Vol. 2156, no. 1. — P. 012180 (SJR: 0,210).

[13] K. Kouzakov, Y.-F. Li, V. Shakhov, K. Stankevich, A. Studenikin, Z. Yuan. Interplay of Neutrino Flavor, Spin and Collective Oscillations in Supernovae // *PoS.* — 2021. — Vol. ICHEP2020. — P. 206 (SJR: 0.116).

Подписано к печати 06.10.2022 г.
Тираж 100 экз. Заказ № 86.
Отпечатано в отделе оперативной печати
Физического факультета МГУ