

ОТЗЫВ

официального оппонента **Дворникова Максима Сергеевича** о диссертационной работе **Чудайкина Антона Сергеевича** «Модели многокомпонентной темной материи в космологии и астрофизике», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертация состоит из Введения, 3-х глав, и Заключения, а также содержит 25 рисунков и 4 таблицы. В списке литературы имеется 139 ссылок. Объем диссертации – 142 страницы текста. Материалы диссертации опубликованы в 4-х печатных работах, из них 3 статьи в рецензируемых научных журналах, в таких как Phys. Rev. D и JCAP. Результаты работы докладывались на 8-ми российских и международных конференциях.

Во **Введении** дан краткий обзор современного состояния экспериментальной космологии, физики стерильного нейтрино и исследований темной материи. Помимо этого, во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, а также представлены выносимые на защиту научные положения.

В **первой главе** диссертации изучается модель двухкомпонентной темной материи, одна часть которой состоит из нерелятивистских и полностью стабильных частиц, а другая распадается на невидимые ультрарелятивистские частицы. Показано, что в рамках этой модели можно разрешить ряд противоречий в интерпретации данных различных групп по экспериментальному изучению темной материи.

Во **второй главе** диссертации исследуется возможный вклад стерильных нейтрино в темную материю. Для этой цели используется модель правых майорановских стерильных нейтрино с ненулевой дираковской массой. В **разделе 2.2** изучено рождение таких стерильных нейтрино во время нового фазового перехода первого рода. Исследованы температуры такого фазового перехода в диапазоне от 0.05 до 100 МэВ. Кроме того, в данной главе найдена

область значений угла смешивания и массы стерильного нейтрино, совместная с современными астрофизическими и космологическими требованиями. Отмечено, что данная область может быть подвергнута прямой проверке на базе существующих экспериментов по поиску стерильных нейтрино. В **разделе 2.3** изучена модель многокомпонентной темной материи, состоящей из нейтрино и осциллирующего скалярного поля. Было показано, что при определенном подборе параметров данной модели можно получить плотность стерильных нейтрино во вселенной сравнимую с ограничениями прямого поиска темной материи.

В **третьей главе** диссертации рассмотрено рождение стерильных нейтрино в присутствии осциллирующего скалярного поля. В частности, в **разделе 3.2** рассмотрено рождение стерильных нейтрино за счет когерентных осцилляций между активными и стерильными нейтрино под действием периодически меняющегося (осциллирующего с частотой m_ϕ) потенциала скалярного поля. В формуле (3.52) было получено условие резонансного усиления осцилляций, в котором частота ω_{res} зависит от целого числа n . Данная зависимость характерна для параметрического резонанса в колебательных системах. Параметрический резонанс в нейтринных осцилляциях был всесторонне изучен в ряде предыдущих статей. Впервые данное явление было установлено в работе Ермиловой и др. (Кр. сообщения по физике т. 5, стр. 26 (1986)) для случая осцилляций нейтрино в веществе с периодически меняющейся плотностью. Впоследствии данное явление было изучено Ахмедовым (ЯФ, т. 47, стр. 475 (1988)) и Петковым (Phys. Lett. B, vol. 434 p. 321 (1998)), который обнаружил, что для эффективного усиления нейтринных осцилляций достаточно полутора периодов изменения плотности вещества. Параметрический резонанс в переменном электромагнитном поле был также исследован в нашей работе (Дворников и Студеникин, ЯФ, т. 67, стр. 741 (2004)). Однако в диссертации отсутствуют ссылки на основные работы, посвященные изучению параметрического резонанса в нейтринных осцилляциях, что является **недостатком** диссертации.

Тем не менее, автор развил свой оригинальный метод для описания нейтринных осцилляций в периодически меняющемся внешнем поле, что является **достоинством** диссертационной работы.

Рекомендуется применить разработанный формализм для изучения осцилляций нейтрино в различных внешних полях, зависящих от времени, и сравнить полученные результаты с ранее используемыми подходами.

На **странице 105**, при изучении эволюции открытой системы из активных и стерильных нейтрино в плазме автор ссылается на работу Сигла и Раффельта (1993) [126]. Было бы более уместным в этом месте сослаться на статью Стодольского (Phys. Rev. D vol. 36, p. 2273 (1987)), в которой впервые была рассмотрена динамика подобной системы. Это также является **недостатком** диссертации.

В **разделе 3.3** диссертации рассматривается рождение пар майорановских нейтрино внешним осциллирующим полем. В частности, в формуле (3.100) приведена дифференциальная вероятность рождения пар. Показатель экспоненты зависит только от квадрата импульса нейтрино. Таким образом, предсказывается значительная вероятность даже при малых импульсах, поскольку рассматриваются нерелятивистские нейтрино. Данный результат не согласуется с хорошо известным выражением для вероятности рождения пар фермионов внешним полем, полученным на рубеже 50-х и 60-х годов прошлого века (см., например, Никишов, ЖЭТФ, т. 57, стр. 1210 (1969)). В данном выражении показатель экспоненты зависит от квадрата полной энергии рожденного фермиона, т.е. от $p^2 + m^2$. Таким образом, даже для нерелятивистских частиц вероятность перехода оказывается подавленной.

В качестве **недостатка** работы я бы отметил отсутствие сравнения результатов, полученных автором в данном разделе диссертации, с основополагающими работами по рождению пар фермионов внешним полем за счет неустойчивости вакуума (см., например, Гитман и др., Квантовая электродинамика с нестабильным вакуумом, Москва, Наука, 1991).

Помимо отмеченных выше недостатков я бы отметил, что ряд ссылок в списке литературы является неполным (см., например, [11,12,48,68,93,96]), т.е. указаны только авторы, название и год. Кроме того, текст диссертации содержит большое число опечаток и жаргонных выражений типа «теплый спектр» и «холодный спектр». Также отмечу, что список сокращений на **странице 129** является неполным, т.к. отсутствует расшифровка понятий ТТ, ТЕ и ЕЕ.

Данные замечания также относятся к **недостаткам** работы.

В **Заключении** кратко перечислены результаты всех глав.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Тем не менее, в автореферате неверно указана должность одного из официальных оппонентов – М.С. Дворникова. Кроме того, аналогично диссертации, в автореферате содержатся многочисленные неполные ссылки: [1,13,26,32,45,51,52]. Эти замечания является **недостатками** автореферата.

Несмотря на перечисленные недостатки, полученные в диссертационной работе результаты имеют большую научную значимость. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, **Чудайкин Антон Сергеевич**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

18.04.2019

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник ИЗМИРАН

доктор физ.-мат. наук

М.С. Дворников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук,
Теоретический отдел.

ИЗМИРАН, Калужское шоссе, д. 4, 108840 г. Москва/г. Троицк.
Тел. +7-(495)-851-09-12, e-mail: maxdvo@izmiran.ru

Подпись д.ф.-м.н. Дворникова М.С. заверяю:

Ученый секретарь ИЗМИРАН, к.ф.-м.н.

А.И. Рез

Дворников Максим Сергеевич

Доктор физ.-мат. наук по специальности 01.04.02-
теоретическая физика.

Список основных публикаций по теме диссертации за последние
5 лет

1. **M. Dvornikov**, *Spin-flavor oscillations of Dirac neutrinos in matter under the influence of a plane electromagnetic wave*, Physical Review D **99**, 035027 (2019), doi: [10.1103/PhysRevD.99.035027](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.035027).
2. **M. Dvornikov**, *Spin-flavor oscillations of Dirac neutrinos in a plane electromagnetic wave*, Physical Review D **98**, 075025 (2018), doi: [10.1103/PhysRevD.98.075025](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.075025).
3. V. B. Semikoz and **M. Dvornikov**, *Generation of the relic neutrino asymmetry in a hot plasma of the early Universe*, International Journal of Modern Physics D **27**, 1841008 (2018), doi: [10.1142/S0218271818410080](https://doi.org/10.1142/S0218271818410080).
4. **M. Dvornikov** and V. B. Semikoz, *Influence of the turbulent motion on the chiral magnetic effect in the early universe*, Physical Review D **95**, 043538 (2017), doi: [10.1103/PhysRevD.95.043538](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.043538).
5. **M. Dvornikov** and V. B. Semikoz, *Nonconservation of lepton current and asymmetry of relic neutrinos*, Journal of Experimental and Theoretical Physics **124**, 731 – 739 (2017), doi: [10.1134/S1063776117050016](https://doi.org/10.1134/S1063776117050016).
6. **M. Dvornikov**, *Unruh effect for neutrinos interacting with accelerated matter*, Journal of High Energy Physics **08** (2015) 151, doi: [10.1007/JHEP08\(2015\)151](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2015)151).
7. **M. Dvornikov**, *Neutrino interaction with background matter in a non-inertial frame*, Modern Physics Letters A **30**, 1530017 (2015), doi: [10.1142/S0217732315300177](https://doi.org/10.1142/S0217732315300177).