

## Отзыв ведущей организации

Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований  
на диссертационную работу Попова Артема Романовича  
**«Осцилляции нейтрино в астрофизических магнитных полях и средах»**,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.3 — теоретическая физика.

### Актуальность темы диссертации.

Диссертационная работа А. Р. Попова посвящена изучению электромагнитных свойств нейтрино. На сегодняшний день электромагнитные свойства нейтрино являются одной из наиболее актуальных тем в физике элементарных частиц и астрофизике. Их исследованию посвящено множество экспериментальных и теоретических работ. Поскольку величины электромагнитных характеристик нейтрино, таких как магнитные моменты, чрезвычайно малы, они могут проявиться лишь в экстремально сильных и/или крупномасштабных магнитных полях, которые возникают в астрофизических условиях.

В диссертации рассмотрены астрофизические нейтрино низких энергий (десятки МэВ), возникающих во взрывах сверхновых и высоких энергий (от десятков ТэВ до десятков ПэВ), которые предположительно возникают в далёких (в основном внегалактических) астрофизических объектах («космических ускорителях»), таких как активные ядра галактик, галактики со вспышкой звездообразования, молодые остатки сверхновых, и т.п. Ожидается, что при взрыве сверхновой в нашей Галактике, эксперименты JUNO, Hyper-Kamiokande и DUNE смогут в сумме зарегистрировать десятки тысяч событий. Наблюдение нейтрино высоких энергий, в частности идентификация их источников, является основной целью экспериментов IceCube, Baikal-GVD, KM3NeT, а так же планируемых установок следующего поколения (IceCube-Gen2, ONC и др.). Таким образом, теоретическое описание эволюции нейтрино от сверхновых и нейтрино высоких энергий является актуальной задачей. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для анализа данных современных и будущих нейтринных телескопов для установления ограничений на электромагнитные характеристики нейтрино.

Открытым вопросом является также наличие или отсутствие CP-нарушения в лептонном секторе. Данные нейтринных экспериментов с длинной базой T2K и NOvA позволили ограничить возможный диапазон значений CP-нарушающей фазы Дирака, но точность этих экспериментов не позволяет сделать достоверные выводы о её величине. Стоит отметить, что особенности CP-нарушения в лептонном секторе зависят от того, является ли нейтрино дираковской или майорановской частицей: в майорановском случае (в стандартном случае трёх поколений лептонов) появляются две дополнительные CP-нарушающие фазы. В диссертации рассмотрены возможные проявления CP-нарушения как для дираковских, так и для майорановских нейтрино в астрофизических условиях.

В пользу актуальности проведённых исследований говорит неплохое цитирование работ соискателя другими авторами.

Таким образом, все затронутые в диссертации вопросы являются интересными и актуальными для нейтринной физики и астрофизики.

### **Структура и содержание диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 119 страниц, включает в себя 15 рисунков. В списке литературы 201 наименование.

Во **Введении** сформулированы цели и задачи диссертационной работы. Изложены выносимые на защиту положения и научная новизна.

**Первая глава** носит вводный характер. В ней приведён обзор некоторых избранных вопросов физики нейтрино.

**Вторая глава** посвящена проблеме флейворных и спиновых осцилляций нейтрино в магнитном поле. Вычислены вероятности осцилляций дираковских нейтрино, обладающих только диагональными магнитными моментами, в магнитном поле. Показано, что эти вероятности являются комбинацией гармоник на частотах вакуумных осцилляций и гармоник на частотах, зависящих от величины магнитного поля. Данная закономерность проиллюстрирована на примере осцилляций нейтрино сверхвысоких энергий в магнитном поле Галактики.

В **третьей главе** диссертации рассматриваются CP-нарушающие эффекты нейтринных осцилляций в магнитном поле при взрывах сверхновых. Рассмотрены случаи дираковских и майорановских нейтрино. Показано, что в случае майорановских нейтрино при наличии ненулевых CP-нарушающих фаз могут возникать новые резонансные переходы, в частности между  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_\tau$ . Обсуждается возможность реализации резонансного усиления данных переходов и их влияние на флейворный состав потока нейтрино от взрыва сверхновой.

**Четвёртая глава** посвящена рассмотрению осцилляций нейтрино высоких энергий в магнитном поле Галактики. Получено уравнение эволюции волнового пакета нейтрино в магнитном поле. На его основе вычислены вероятности осцилляций в магнитном поле с учётом эффекта декогеренции. Показано, что для гармоник осцилляций на частотах, зависящих от силы магнитного поля, длины когерентности пропорциональны третьей степени среднего импульса нейтрино. Получены возможные флейворные составы по току нейтрино высоких энергий из центра Галактики с учётом взаимодействия нейтрино с галактическим магнитным полем.

В **Заключении** кратко сформулированы результаты диссертационной работы.

**Научная новизна** данной работы заключается в следующем:

- Показано, что вероятности флейворных осцилляций в магнитном поле представляются в виде суммы гармоник на двух типах частот: 1) частотах вакуумных осцилляций и 2) частотах, пропорциональных величине магнитного поля.
- Впервые рассмотрены осцилляции майорановских нейтрино в магнитном поле с учётом майорановских CP-нарушающих фаз. Показано, что их наличие может приводить к возникновению новых резонансов в  $\nu - \bar{\nu}$  осцилляциях.
- Осцилляции нейтрино в магнитном поле впервые рассмотрены с использованием волновых пакетов. Показано, что длина когерентности для гармоник нейтринных осцилляций с частотой, зависящей от величины магнитного поля, пропорциональна кубу среднего импульса нейтрино.

Полученные результаты имеют безусловную **теоретическую и практическую значимость**. Они могут быть использованы для анализа данных будущих нейтринных телескопов, в частности, для ограничения значений электромагнитных характеристик нейтрино.

**Личный вклад автора.** Все результаты, представленные в диссертации, получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии.

**Апробация результатов работы и публикации.** Основные результаты диссертации отражены в 10–ти научных публикациях, в журналах рекомендованных ВАК. Результаты диссертации неоднократно докладывались на международных и российских конференциях.

### Замечания.

**Стр. 16, ф-ла (1.7).** Здесь нужно заменить  $U_{\alpha i}$  на  $U_{\alpha i}^*$ .

**Стр. 20, после ф-лы (1.21).** Нужно заменить  $\Delta m_{ik}^2/2E$  на  $\Delta m_{ik}^2 L/2E$ .

**Стр. 66, ф-ла (3.46).** Очевидно в условии адиабатичности перепутан знак неравенства: вместо  $\gg$  стоит  $\ll$ . В самом деле, параметр адиабатичности (левая часть неравенства) становится бесконечным при постоянной плотности ( $dn_e/dx = 0$ ).

**Стр. 84, ф-ла (4.11).** Нет спинора  $v_i(p, t)$  после закрывающей скобки в правой части уравнения.

**Стр. 86, перед ф-лой (4.21)** пишется «Поскольку время распространения нейтрино от источника к детектору  $t$  не является измеримой величиной, выполним интегрирование по нему, чтобы получить окончательное выражение для вероятностей осцилляций ней-трино...» Но интеграл от безразмерной функции (4.19) – величина размерности времени, т.е. не вероятность.<sup>1</sup> Для получения вероятности требуется усреднить (4.19) по  $t$ , а не просто проинтегрировать и результат будет, вообще говоря, зависеть от интервала усреднения, например, от времени экспозиции детектора. Поэтому происхождение формулы (4.21)<sup>2</sup> требует пояснений.

Замеченные мелкие опечатки:

**Стр. 9.** «межзвёзном» (нужно «межзвёздном»).

**Стр. 59.** «взаимодейтвие» (нужно «взаимодействие»),  
«майораносвких» (нужно «майорановских»)

**Стр. 63.** «гамильнониана» (нужно «гамильтониана»).

**Стр. 65.** «гамильнотиана» (нужно «гамильтониана»).

**Стр. 66.** «флейвонные» (нужно «флейворные»).

**Стр. 70.** «майрановских» (нужно «майорановских»).

**Стр. 88.** «значть» (нужно «знать»).

**Стр. 100.** «межзвёзных» (нужно «межзвёздных»).

<sup>1</sup>Так, при интегрировании экспоненты в (4.19) в бесконечных пределах получаем размерное выражение

$$\simeq \sqrt{2\pi} \sigma_x \exp \left[ -i\omega_{ij}^s \sigma - \left( v_i^s - v_j^s \right)^2 L^2 / (8\sigma_x^2) \right].$$

<sup>2</sup>и знака тильды ( $\sim$ ) в (4.19)...

**Заключение.** Диссертация А. Р. Попова является законченным научным исследованием. Материалы диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация А. Р. Попова на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор безусловно **заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук** по специальности 1.3.3 – теоретическая физика. Результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на семинаре лаборатории теоретической физики ОИЯИ 13 марта 2024 года.

Дата: 30 мая 2024 года

Отзыв составил  
старший научный сотрудник,  
начальник сектора «Нейтринная физика»  
лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова,  
кандидат физико-математических наук

\_\_\_\_\_ В. А. Наумов

Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)  
141980, Дубна, ул. Жолио Кюри 6, ЛТФ  
e-mail: vnaumov@theor.jinr.ru  
Тел: +7(496)2162319

Подпись В. А. Наумова удостоверяю,  
Учёный секретарь  
лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова

\_\_\_\_\_ А. В. Андреев

Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)  
141980, Дубна, ул. Жолио Кюри 6, ЛТФ  
e-mail: andreev@theor.jinr.ru  
Тел.: +7(496)2165088

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Наумов В. А., Шкирманов Д. С. Virtual neutrino propagation at short baselines // Eur. Phys. J. C, 2022. — № 82. — 736.
2. Какорин И. Д., Кузьмин К. С., Наумов В. А. Running axial mass of the nucleon as a phenomenological tool for calculating quasielastic neutrino–nucleus cross sections // Eur. Phys. J. C, 2021. — № 81. — 1142.
3. Наумов В. А., Шкирманов Д. С. Reactor antineutrino anomaly reanalysis in context of inverse-square law violation // Universe, 2021. — № 7. — 246.
4. Наумов Д. В., Наумов В. А., Шкирманов Д. С. Rephasing invariant for three-neutrino oscillations governed by a non-Hermitian Hamiltonian // Symmetry, 2020. — № 12. — 1285.
5. Наумов Д. В., Наумов В. А. Квантово-полевая теория нейтринных осцилляций // ЭЧАЯ, 2020. — № 51. — 5–209.

Список удостоверяю,

Учёный секретарь

лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова

\_\_\_\_\_ А. В. Андреев

Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)  
141980, Дубна, ул. Жолио Кюри 6, ЛТФ  
e-mail: andreev@theor.jinr.ru  
Тел.: +7(496)2165088