



### Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов.

Автор непосредственно участвовал во всех работах, результаты которых вошли в диссертацию. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

### Степень достоверности результатов.

1. Результаты развитой теории релятивистского волнового пакета сводятся в нерелятивистском пределе к известным результатам теории нерелятивистского волнового пакета.
2. В плосковолновом пределе S-матричная теория с релятивистскими волновыми пакетами в качестве начальных и конечных состояний сводится к стандартной S-матричной теории.
3. Формула для осцилляций нейтрино, полученная в квантово-полевой теории в модели релятивистского волнового пакета сводится к известным результатам в соответствующих приближениях, что подробно обсуждается в тексте диссертации.
4. Результаты измерения  $\sin^2 2\theta_{13}$  и разницы квадратов масс  $\Delta m_{32}^2$  находятся в согласии с результатами, полученными с большими неопределенностями, в экспериментах RENO, Double-Chooz, T2K, MINOS, NOvA, IceCube.
5. Результаты измерения энергетического спектра реакторных антинейтрино находятся в согласии с результатами, полученными с большими неопределенностями, в экспериментах RENO и Double-Chooz.

### Основные новые результаты диссертационной работы.

1. Впервые разработана теория релятивистского волнового пакета.
2. Разработанная теория применена для вычисления сечения рассеяния релятивистских волновых пакетов в квантовой теории поля.
3. Вычислена вероятность процесса, нарушающего лептонное число, с релятивистскими волновыми пакетами, соответствующими частицам в начальном и конечном состоянии, нейтрино в виртуальном состоянии, источником и детектором нейтрино, разделенными макроскопическим расстоянием.
4. Впервые получена формула для вероятности осцилляций нейтрино в модели релятивистского волнового пакета с учетом пространственной дисперсии эффективного волнового пакета нейтрино и конечных интервалов активности “источника” и “детектора”.
5. Впервые измерено отличное от нуля значение  $\theta_{13}$ , в эксперименте Daya Bay на уровне достоверности, превышающем 25 стандартных отклонений.
6. Впервые в реакторных экспериментах измерено значение  $\Delta m_{32}^2$ .
7. Впервые достигнута рекордная точность измерения  $\theta_{13}$ ,  $\Delta m_{32}^2$ .

Для публичной защиты будут выдвинуты следующие положения:

1. Теория релятивистского волнового пакета. Исследование свойств релятивистского волнового пакета.
2. Вычисление сечения рассеяния релятивистских волновых пакетов в квантовой теории поля.
3. Доказательство того, что пространственная дисперсия волнового пакета в плоскости, перпендикулярной направлению его движения, приводит к подавлению вида  $1/4\pi x^2$  плотности потока, проинтегрированного по времени, на расстоянии  $|x|$  от источника рождения волнового пакета.
4. Метод и результат вычисления вероятности процесса, нарушающего лептонное число, с релятивистскими волновыми пакетами, соответствующими частицам в начальном и конечном состояниях, нейтрино в виртуальном состоянии, источником и детектором нейтрино, разделенными макроскопическим расстоянием.
5. Метод макроскопического усреднения квантово-полевой вероятности процесса с участием волновых пакетов.
6. Формула для вероятности осцилляций нейтрино в модели релятивистского волнового пакета с учетом пространственной дисперсии эффективного волнового пакета нейтрино и конечных интервалов активности “источника” и “детектора”.
7. Методика измерения осцилляционных параметров в реакторном эксперименте и создание комплекса компьютерных программ анализа экспериментальных данных эксперимента Daya Bay.
8. Методика измерения энергетического спектра реакторных антинейтрино.
9. Результат измерения параметра смешивания нейтрино  $\sin^2 2\theta_{13}$ .
10. Результат измерения разницы квадратов масс  $\Delta m_{32}^2$ .
11. Результат измерения энергетического спектра реакторных антинейтрино.

Практическая ценность

1. Разработанная теория релятивистского волнового пакета положена в основу вычисления вероятности осцилляций нейтрино в рамках квантовой теории поля. Анализ сечения рассеяния частиц в рамках квантово-полевой теории релятивистских волновых пакетов предоставляет возможность измерения фазы соответствующего матричного элемента; измерения формы волновой функции сталкивающихся частиц; исследования осцилляций нейтрино, рожденных в ускорителях частиц, в реакторах, в атмосфере и в других источниках.
2. Полученная общая формула для вероятности осцилляций нейтрино применена для анализа данных экспериментов Daya Bay, KamLAND, для

- оценки чувствительности новых экспериментов (JUNO, RENO-50) к величине дисперсии волнового пакета нейтрино.
3. Обнаруженное ненулевое значение  $\sin^2 2\theta_{13}$  открыло путь к измерению иерархии масс нейтрино и фазы, ответственной за нарушение CP-инвариантности, что используется в ряде экспериментов (T2K, NOvA) и при подготовке новых экспериментов (JUNO, RENO-50, T2HK, DUNE и др.).
  4. Прецизионные измерения  $\sin^2 2\theta_{13}$  и  $\Delta m_{32}^2$  уменьшают систематическую неопределенность в определении иерархии масс нейтрино и параметра лептонной матрицы смешивания - фазы  $\delta$ , ответственной за нарушение CP-инвариантности.
  5. Измеренный энергетический спектр реакторных антинейтрино положен в основу будущих прецизионных измерений с реакторными антинейтрино.

Научная специальность, которой соответствует диссертация.

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 01.04.16 в части “физика атомного ядра и элементарных частиц”.

Полнота изложения материалов в работах, опубликованных соискателем ученой степени.

Основные положения диссертации получили полное отражение в текстах автореферата и диссертации. Результаты диссертации широко представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе лично Наумовым Д.В. в докладах на 13 международных конференциях, из которых 11 докладов были пленарными, а также на 17 научных семинарах в ведущих российских и зарубежных институтах. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа представляет собой законченное исследование по актуальной проблеме физике ядра и элементарных частиц. Полученные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых журналах с высоким индексом цитирования, входящих в список ВАК. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений. Представленные в работе результаты принадлежат Наумову Д.В.; они оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью.

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых российских журналах из перечня, рекомендованного ВАК

1. Bednyakov V. A., Naumov D. V., Smirnov O. Y. Neutrino physics and JINR // Phys. Usp. — 2016. — Т. 59, No 3. — С. 225—253.
2. Naumov D. A short review of most interesting recent results in neutrino physics // Phys.Part.Nucl.Lett. — 2012. — Т. 9. — С. 691—695.
3. Naumov D. Introduction to neutrino physics // Phys.Part.Nucl.Lett. — 2011.—Т. 8. — С. 717—742.
4. Naumov D. On the theory of wave packets // Phys.Part.Nucl.Lett. — 2013. —Т. 10. — С. 642—650.
5. Naumov D. V., Naumov V. A. Relativistic wave packets in a field theoretical approach to neutrino oscillations // Russ.Phys.J. — 2010. — Т. 53. — С. 549—574.

Научные статьи, опубликованные в зарубежных научных журналах и изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и SCOPUS и включенных в список ВАК

6. Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment / F. P. An [и др.] // Phys. Rev. — 2017. — Т. D95. — С. 072006. — arXiv: 1610.04802 [hep-ex].
7. New measurement of  $\theta_{13}$  via neutron capture on hydrogen at Daya Bay / F. P. An [и др.] // Phys. Rev. — 2016. — Т. D93. — С. 072011. — arXiv: 1603.03549 [hep-ex].
8. Improved Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay / F. P. An [и др.] // Chin. Phys. — 2016. — Т. C2017. — С. 41. — arXiv:1607.05378 [hep-ex].
9. Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay / F. P. An [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Т. 116, No 6. — С. 061801. — arXiv:1508.04233 [hep-ex].
10. New Measurement of Antineutrino Oscillation with the Full Detector Configuration at Daya Bay / F. P. An [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2015. —Т. 115, No 11. — С. 111802. — arXiv: 1505.03456 [hep-ex].
11. The Detector System of The Daya Bay Reactor Neutrino Experiment / F. P. An [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. — 2016. — Т. A811. — С. 133—161. — arXiv:1508.03943 [physics.ins-det].
12. The muon system of the Daya Bay Reactor antineutrino experiment / F. P. An [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. — 2015. — Т. A773. — С. 8—20. — arXiv:1407.0275 [physics.ins-det].
13. Independent measurement of the neutrino mixing angle  $\theta_{13}$  via neutron capture on hydrogen at Daya Bay / F. P. An [и др.] // Phys. Rev. — 2014. — Т. D90, No 7. — С. 071101. — arXiv: 1406.6468 [hep-ex].
14. Naumov D., Naumov V. A Diagrammatic treatment of neutrino oscillations // J.Phys.G. — 2010. — Т. G37. — С. 105014. — arXiv: 1008.0306 [hep-ph].

15. Spectral measurement of electron antineutrino oscillation amplitude and frequency at Daya Bay / F. An [и др.] // Phys.Rev.Lett. — 2014. — Т. 112. — С. 061801. — arXiv: 1310.6732 [hep-ex].
16. Improved Measurement of Electron Antineutrino Disappearance at Daya Bay / F. An [и др.] // Chin.Phys. — 2013. — Т. C37. — С. 011001. — arXiv: 1210.6327 [hep-ex].
17. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay / F. An [и др.] // Phys.Rev.Lett. — 2012. — Т. 108. — С. 171803. — arXiv: 1203.1669 [hep-ex].
18. A side-by-side comparison of Daya Bay antineutrino detectors / F. An [и др.] // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. — 2012. — Т. A 685. — С. 78—97. — arXiv: 1202.6181 [physics.ins-det].

Тезисы докладов, опубликованные в сборниках трудов научных конференций

19. Naumov D. V. Neutrino Physics program at the JINR // Proc. of the 4th South Africa - JINR Symposium. Few to Many Body Systems: Models, Methods and Applications, edited by F. Simkovic and conveners of session. — 2016.
20. Results from the Daya Bay Reactor Neutrino Experiment / K. Tsang [и др.] // Nucl.Phys.Proc.Suppl. — 2014. — Т. 246—247. — С. 18—22.
21. Naumov D. V. Recent results from Daya Bay experiment // EPJ Web Conf. — 2015. — Т. 95. — С. 04043. — arXiv: 1412.7806 [hep-ex].
22. Naumov D. V. Recent results in neutrino physics // Odessa Astron. Pub. — 2011. — Т. 24. — С. 27. — arXiv: 1111.2042 [physics.pop-ph].

Диссертация «Измерение  $\theta_{13}$ ,  $\Delta m_{32}^2$  и ковариантная квантово-полевая теория нейтринных осцилляций» характеризуется новыми научными результатами как в экспериментальной, так и в теоретической физике, логичностью построения, аргументированностью основных научных положений и выводов, а также четкостью изложения.

Работа, представленная в диссертации, отмечена самой крупной премией в науке “Прорыв в фундаментальной физике 2016 года”, а также премиями ОИЯИ. Наумов Д.В. - автор 65 опубликованных работ с общим количеством цитирований выше 5000, и индексом Хирша - 28. Основные результаты по теме диссертации изложены в 22 печатных изданиях, 18 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

С учетом актуальности, научной новизны и практической значимости работы, а также ее соответствия требованиям п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к подобным работам, диссертация на тему: «Измерение  $\theta_{13}$ ,  $\Delta m_{32}^2$  и ковариантная квантово-полевая теория нейтринных осцилляций» рекомендуется к защите на соискание ученой

степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16  
“физика атомного ядра и элементарных частиц”.

Отзыв на диссертацию, подготовленный д.ф.-м.н. Полухиной Н.Г.,  
рассмотрен и одобрен на заседании Ученого совета Отделения ядерной физики и  
астрофизики ФИАН 20 июня 2017 г., протокол № 57.

Отзыв составил

Заведующая лабораторией элементарных частиц ОЯФА ФИАН,  
д.ф.-м.н.

Н.Г.Полухина

Председатель Ученого совета

Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН,  
д.ф.-м.н., профессор

О.Д. Далькаров

Секретарь Ученого совета

Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН,  
к.ф.-м.н.

Н.П. Топчиев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, [Ленинский проспект, д.53](#), ФИАН  
Телефон: 8(499)135-42-64  
Факс: 8(499)135-78-80  
e-mail: [postmaster@lebedev.ru](mailto:postmaster@lebedev.ru)

Список работ сотрудников Физического института им.П.Н. Лебедева Российской академии наук по теме диссертации.

1. An optimal energy estimator to reduce correlated noise for the EXO-200 light readout JOURNAL OF INSTRUMENTATION Davis, C. G.; Hall, C.; Albert, J. B.; Barbeau, P. S.; Beck, D.; Belov, V.; Breidenbach, M.; Brunner, T. 2016г. т. 11
2. First search for Lorentz and CPT violation in double beta decay with EXO-200. PHYSICAL REVIEW D. Albert, J. B.; Barbeau, P. S.; Beck, D.; Belov, V.; Breidenbach, M.; Brunner, T.; Burenkov, A.; Cao, G. F. 2016г. т. 93 номер 7
3. Sensitivity of the DANSS detector to short range neutrino oscillations. NUCLEAR AND PARTICLE PHYSICS PROCEEDINGS. Danilov, Mikhail. 2016г. т. 273 номер стр.. 1055-1058
4. Measurement of the lepton forward-backward asymmetry in  $B \rightarrow X(s)l^{(+)}l^{(-)}$  decays with a sum of exclusive modes. PHYSICAL REVIEW D. Sato, Y.; Ishikawa, A.; Yamamoto, H.; Abdesselam, A.; Adachi, I.; Adamczyk, K.; Aihara, H.; Asner, D. M. 2016г. т. 93 номер 3
5. Measurement of the differential cross section and charge asymmetry for inclusive  $pp \rightarrow W^{+/-} + X$  production at  $\sqrt{s}=8$  TeV. EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C. Khachatryan, V. y; Sirunyan, A. M.; Tumasyan, A.; Adam, W.; Asilar, E.; Bergauer, T.; Brandstetter, J. 2016г. т. 76 номер 8
6. Phenomenological MSSM interpretation of CMS searches in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s}=7$  and 8 TeV. JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS. Khachatryan, V.; Sirunyan, A. M.; Tumasyan, A.; Adam, W.; Asilar, E.; Bergauer, T.; Brandstetter, J. 2016г. т. номер 10
7. Search for lepton flavour violating decays of heavy resonances and quantum black holes to an  $e \mu$  pair in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV. EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C. Khachatryan, V.; Sirunyan, A. M.; Tumasyan, A.; Adam, W.; Asilar, E.; Bergauer, T.; Brandstetter, J. 2016г. т. 76 номер 6
8. Search for supersymmetry in electroweak production with photons and large missing transverse energy in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s}=8$ TeV. PHYSICS LETTERS B. Khachatryan, V.; Sirunyan, A. M.; Tumasyan, A.; Adam, W.; Asilar, E.; Bergauer, T.; Brandstetter, J. 2016г. т. 759

9. Search for third-generation scalar leptoquarks in the  $t$  tau channel in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV (vol 7, 042, 2015). JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS. Khachatryan, V.; Sirunyan, A. M.; Tumasyan, A.; Adam, W.; Asilar, E.; Bergauer, T.; Brandstetter, J. 2016г. т. номер 11
10. Improved measurement of the  $2\nu\beta\beta$  half-life of Xe-136 with the EXO-200 detector. PHYSICAL REVIEW C. Albert, J. B.; Auger, M.; Auty, D. J.; Barbeau, P. S.; Beauchamp, E.; Beck, D.; Belov, V.; Benitez-Medina, C. 2014г. т. 89 номер 1
11. Search for Majorana neutrinos with the first two years of EXO-200 data. NATURE. Albert, J. B.; Auty, D. J.; Barbeau, P. S.; Beauchamp, E.; Beck, D.; Belov, V.; Benitez-Medina, C. 2014г. т. 510 номер 7504 стр.. 229-234
12. Search for Majoron-emitting modes of double-beta decay of Xe-136 with EXO-200. PHYSICAL REVIEW D. Albert, J. B.; Auty, D. J.; Barbeau, P. S.; Beauchamp, E.; Beck, D.; Belov, V.; Benitez-Medina, C. 2014г. т. 90 номер 9
13. The Physics of the B Factories. EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C. Bevan, A. J.; Golob, B.; Mannel, Th.; Prell, S.; Yabsley, B. D.; Abe, K.; Aihara, H.; Anulli, F.; Arnaud, N. 2014г. т. 74 номер 11 стр.. I-898
14. Prospects for observation of neutrino-nuclear neutral current coherent scattering with two-phase Xenon emission detector. JOURNAL OF INSTRUMENTATION. Akimov, D. Yu.; Alexandrov, I. S.; Aleshin, V. I.; Belov, V. A.; Bolozdynya, A. I.; Burenkov, A. A. 2013г. т. 8
15. Registration of reactor neutrinos with the highly segmented plastic scintillator detector DANSSino. JOURNAL OF INSTRUMENTATION. Belov, V.; Brudanin, V.; Danilov, M.; Egorov, V.; Fomina, M.; Kobyakin, A.; Rusinov, V.; Shirchenko, M. 2013г. т. 8