

УТВЕРЖДАЮ
Первый заместитель директора
Центра по науке
Ю.А. ДЬЯКОВА

« 26 » сентября 2023 г.

**Отзыв ведущей организации
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"**

на диссертационную работу Фархтдинова Булата Ринатовича «**Процессы многочастичного рождения в квантовой теории поля**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа Б.Р. Фархтдинова посвящена процессам многочастичного рождения, — переходам в состояние с числом частиц много большим единицы в результате столкновения малого числа высокоэнергичных частиц. В частности, в приведенных исследованиях рассматривается многочастичное рождение в теории действительного скалярного поля $\lambda\phi^4$. Исторически, процессы многочастичного рождения в столкновениях частиц в скалярных теориях изучаются уже довольно давно. Теоретический интерес к ним связан с тем, что стандартный метод расчетов в квантовой теории поля — теория возмущений, перестает работать при большом числе частиц n в конечном состоянии, что связано с факториальным ростом числа диаграмм Фейнмана, дающих вклад в амплитуду соответствующего процесса. Существуют основанные на унитарности аргументы, что вероятности процессов многочастичного рождения в двухчастичных столкновениях должны оставаться экспоненциально подавленными в слабо связанных теориях при сколь угодно больших конечных числах частиц. Однако недавно в литературе появились теоретические предсказания того, что при достаточно больших множественностях вероятность многочастичного рождения может быть не подавленной. В частности, такое поведение предсказывает сценарий так называемого «Хиггсовского взрыва» — не подавленного многочастичного рождения бозонов Хиггса в высокоэнергичных столкновениях глюонов. По этой причине получение надежных предсказаний для вероятностей многочастичного рождения является актуальной научной задачей. Вскоре после обнаружения проблем с применимостью теории возмущений было предложено описывать процессы многочастичного рождения квазиклассическими методами. Два таких подхода: анализ классического рассеяния волновых пакетов и метод сингулярных решений Д.Т. Шона, используются в диссертационной работе для изучения вероятности многочастичного рождения при произвольно больших n и энергиях. Все затронутые в диссертации вопросы, безусловно, являются **актуальными** для квантовой теории поля и физики элементарных частиц.

Исследование рассеяния классических волновых пакетов в теории $\lambda\phi^4$ является косвенным способом оценить, подавлены ли вероятности процессов экспоненциально. Классическому рассеянию волновых пакетов соответствует квантовый переход между когерентными состояниями со средними числами

частиц n_i и n_f при энергии E . Такие классически разрешённые процессы происходят с вероятностью, не подавленной экспоненциально. Поэтому, если рассеяние $n_i \sim 1$ и $n_f \gg 1$ может быть реализовано при помощи решения классического уравнения поля, то вероятности процессов многочастичного рождения не являются экспоненциально малыми. В противном случае, ожидается, что такие процессы экспоненциально подавлены. Такое исследование было численно проведено в диссертации.

Метод сингулярных решений Д.Т. Шона позволяет вычислять главную квазиклассическую экспоненту многочастичного рождения, которая в этом случае является функционалом на решении классического уравнения поля с источником и специальными граничными условиями. Вычисления эти являются достаточно сложными, поэтому аналитический ответ известен только в пределе малого значения параметра λl и вблизи кинематического порога. Также в литературе были численно получены вероятности многочастичного рождения при малом λl и больших энергиях. В диссертационной работе метод сингулярных решений был реализован численно без использования большого количества дополнительных предположений, что позволило применить метод к случаям промежуточных и больших λl и произвольной энергии, и позволило получить надежные результаты для вероятностей многочастичного рождения в главном квазиклассическом приближении.

Успешная численная реализация квазиклассического метода сингулярных решений в теории $\lambda\phi^4$ с ненарушенным потенциалом открывает возможность его применения к изучению многочастичного рождения в других теориях. Здесь наиболее интересной представляется теория скалярного поля с потенциалом хиггсовского типа — в этом случае можно будет применить квазиклассические вычисления в феноменологических задачах. Это обуславливает **значимость** исследований, проведенных в диссертационном исследовании.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 118 страниц, включает в себя 32 рисунка. В списке литературы 77 наименований.

Во Введении обоснована актуальность работы, представлен краткий обзор предыстории и текущего состояния исследуемых вопросов, определены цели и задачи диссертационной работы, показана ее научная новизна и приведены положения, выносимые на защиту. Также во Введении описаны теоретическая и практическая значимость работы, дана информация об апробации результатов, приведен список публикаций по теме диссертации и описан личный вклад автора в работу.

Первая глава диссертации посвящена численному исследованию рассеяния классических волновых пакетов в теории действительного скалярного поля $\lambda\phi^4$. Описывается методология исследования и приводятся полученные численные результаты. Исходя из них, процессы многочастичного рождения лежат глубоко в классически запрещенной области, что указывает на экспоненциальное подавление их вероятностей.

Вторая глава посвящена описанию численной реализации метода сингулярных решений Д.Т. Шона. Также в ней приводятся результаты успешной проверки разработанного численного метода с аналитическими предсказаниями, известными из литературы.

Третья глава посвящена анализу вероятностей многочастичного рождения, полученных при помощи численного метода, описанного во второй главе. В частности, приводится успешное сравнение численных данных с вероятностями при малых значениях λn , которые известны из литературы. Затем анализируются результаты для вероятностей при промежуточных и больших значениях λn и различных энергиях. Оказывается, что при фиксированной средней кинетической энергии на частицу и достаточно большом λn вероятность многочастичного рождения падает экспоненциально, причем показатель экспоненты хорошо описывается линейной функцией от n . Анализ наклонов этой линейной функции в сочетании с промежуточной областью $\lambda n \sim 1$ и известными из литературы данными позволили сделать вывод об экспоненциальном подавлении вероятностей многочастичного рождения в рассмотренной теории при произвольных энергиях и $n \gg 1$.

В Заключение суммируются основные результаты проведенных исследований и рекомендации по их практическому использованию.

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

- (i) Впервые были определены границы классически разрешенной области многочастичного рассеяния и найдены классические полевые конфигурации, которые приводят к максимальному изменению числа частиц в процессах рассеяния классических волновых пакетов в теории $\lambda\phi^4$. Это исследование показало, что в данной теории процессы многочастичного рождения находятся глубоко в классически запрещенной области.
- (ii) Впервые разработан численный алгоритм, реализующий квазиклассический метод сингулярных решений Д.Т. Шона нахождения экспоненты подавления вероятности процессов многочастичного рождения.
- (iii) Разработанный численный метод позволил впервые надежно получить вероятности многочастичного рождения для ранее не изученного интервала $\lambda n \gtrsim 1$ и набора значений средней кинетической энергии. В том числе были впервые получены результаты в пределе $\lambda n \rightarrow +\infty$.
- (iv) Впервые было непосредственно продемонстрировано экспоненциальное подавление вероятностей многочастичного рождения в теории $\lambda\phi^4$ с ненарушенной Z_2 симметрией, а также получена зависимость экспоненты вероятности от параметров процесса.

Положения диссертационной работы состоят в следующем:

1. Проведено численное моделирование процессов классического рассеяния волновых пакетов в теории с потенциалом $\lambda\phi^4$ и ненарушенной Z_2 симметрией. Соответствующие классические решения характеризуются энергией E , а также начальным n_i и конечным n_f числами частиц. Разработан алгоритм численного нахождения классически разрешенной области пространства параметров E , n_i и n_f , найдена её граница для ряда значений начального числа частиц n_i и изучены свойства классических решений вблизи этой границы. Численно продемонстрировано существование нетривиального минимального начального числа частиц n_i при фиксированных E и n_f , причём $n_i \sim n_f$, что указывает на экспоненциальное подавление процессов многочастичного рождения в

столкновениях малого числа частиц.

2. Разработан и реализован численный алгоритм, позволяющий находить вероятности многочастичного рождения для произвольных энергии и числа частиц конечного состояния с помощью квазиклассического метода сингулярных решений Д.Т. Шона в скалярных теориях поля.

3. Вычислена экспонента подавления вероятности многочастичного рождения в теории с потенциалом $\lambda\phi^4$ и ненарушенной Z_2 симметрией для числа 9 частиц в конечном состоянии $n \gtrsim \lambda^{-1}$. Показано, что процессы многочастичного рождения в этой теории остаются экспоненциально подавленными при произвольно больших n и фиксированной средней кинетической энергии на частицу. Численно получена асимптотика экспоненты подавления при $\lambda n \rightarrow +\infty$.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием известных численных методов, согласованием результатов друг с другом, с аналитическими предсказаниями и с литературой, а также тем, что результаты были опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Выводы и положения диссертации полностью обоснованы.

Полученные результаты имеют **безусловную теоретическую и практическую значимость**. Развитые в диссертации методы определения классически разрешенной области для многочастичного рассеяния, основанные на анализе рассеяния волновых пакетов в теории $\lambda\phi^4$, могут использоваться для анализа многочастичного рассеяния в других теориях. Численные алгоритмы анализа сингулярных квазиклассических решений, использованные в диссертации для анализа скалярной теории с Z_2 симметрией являются достаточно общими и обобщаются на теории с нарушенной Z_2 симметрией. Результаты представляют интерес для исследований в области астрофизики, физики элементарных частиц и теоретической физики.

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

Апробация результатов работы и публикации. Основные результаты диссертации отражены в 6 научных публикациях, 3 из которых изданы в журналах рекомендованных ВАК. Результаты диссертации неоднократно докладывались на международных и российских конференциях.

Замечания. Существенных недостатков представленная диссертация не содержит. Тем не менее, по диссертации имеются замечания и некоторые пожелания:

1. В обзоре литературы, на наш взгляд, следовало бы отразить результаты, касающиеся множественного рождения, связанного с подбарьерным переходом и рождением частиц с тепловым спектром. См., например, "Thermal Emission from Semi-classical Dynamical Systems", Takeshi Morita, Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 10, 101603, e-Print: 1902.06940 [hep-th].
2. Введенные в первой главе энергия и числа частиц с тильдой усложняют восприятие результатов из-за скрытого в них деления на 4π .
3. На некоторых рисунках сравнения, как, например, на Рис. 1.5 и 1.6

сложно отличить один график от другого при черно-белой печати.

Высказанные замечания не являются принципиальными и ни в какой мере не умаляют высокого уровня работы и полученных результатов.

Заключение. Диссертация Б.Р. Фархтдинова является законченным научным исследованием. Полученные автором результаты имеют существенное значение для астрофизики, физики элементарных частиц и фундаментальной физики. Материалы диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. **Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.**

Диссертация Б.Р. Фархтдинова на соискание ученой 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 ее автор **заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук** по специальности 1.3.3 - теоретическая физика.

Результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на семинаре «Теоретическая физика и физика экстремального состояния вещества» Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики (ККТЭФ) НИЦ «Курчатовский институт» 7 сентября 2023 года.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании Научно-технического совета Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт». Присутствовало на заседании 13 чел., из них докторов наук 6 чел., кандидатов наук 7 чел. Результаты голосования: «за» 13 чел., «против» 0 чел., «воздержалось» 0 чел., протокол № 3 от «07» сентября 2023 г.

Отзыв подготовил д.ф.-м.н.,
Главный научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт»

В.И. Захаров

И.о. руководителя ККТЭФ,
Председатель НТС ККТЭФ

В.Ю. Егорычев

Ученый секретарь ККТЭФ,
учёный секретарь НТС ККТЭФ

В.В. Васильев

Подписи В.И. Захарова, В.Ю. Егорычева и В.В. Васильева подтверждаю

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»

К.Е. Борисов

НИЦ «Курчатовский институт»
123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1
Телефон: +7 (499) 196-95-39
e-mail: nrcki@nrcki.ru

Сведения о ведущей организации

по защите диссертации Фархтдинова Б.Р. «Процессы многочастичного рождения в квантовой теории поля» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – Теоретическая физика

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Ведомственная принадлежность	Правительство Российской Федерации
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	НИЦ «Курчатовский институт»
Подразделение	Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики (ККТЭФ)
Почтовый индекс, адрес организации	123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1
Веб-сайт	http://www.nrcki.ru
Телефон	+7 (499) 196-95-39; факс 7 (499) 196-17-04
Адрес электронной почты	nrcki@nrcki.ru

Список основных публикаций работников ведущей организации по тематике, близкой или смежной тематике защищаемой диссертации, в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Z. Ge, T. Eronen, K. S. Tyrin, J. Kotila, J. Kostensalo, D. A. Nesterenko, O. Beliuskina, R. de Groote, A. de Roubin, S. Geldhof, W. Gins, M. Hukkanen, A. Jokinen, A. Kankainen, A. Koszorus, M. I. Krivoruchenko, S. Kujanpaa, I. D. Moore, A. Raggio, S. Rinta-Antila, J. Suhonen, V. Virtanen, A. P. Weaver, and A. Zadvornaya, 159Dy Electron-Capture: A New Candidate for Neutrino Mass Determination. *Phys. Rev. Lett.* 127, 272301 (2021).
2. K. Blaum, S. Eliseev, F. A. Danevich, V. I. Tretyak, Sergey Kovalenko, M. I. Krivoruchenko, Yu. N. Novikov, and J. Suhonen. Neutrinoless double-electron capture. *Rev. Mod. Phys.* 92, 045007 (2020).
3. V.A. Gani, A. Moradi Marjaneh, K. Javidan, Exotic final states in the ϕ^8 multi-kink collisions, *European Physical Journal C* 81, 1124 (2021).
4. M.I. Krivoruchenko. Gauge Invariance of Quantum Electrodynamics of Multi-Electron Atoms. *Physics of Atomic Nuclei* 86, 153–164 (2023).
5. M. S. Lukashov and Yu. A. Simonov. Scalar mesons in a chiral theory with quark degrees of freedom. *Phys. Rev. D* 101, 094028 (2020).

6. A. M. Badalian, M. S. Lukashov, and Yu. A. Simonov. Relativistic Cornell-type mechanism of exotic scalar resonances. *Phys. Rev. D* 102, 094012 (2020).
7. E. Belendryasova, V.A. Gani, K.G. Zloshchastiev. Kink solutions in logarithmic scalar field theory: Excitation spectra, scattering, and decay of bions. *Physics Letters B* 823, 136776 (2021).
8. Meng-Lin Du, Vadim Baru, Xiang-Kun Dong, Arseniy Filin et al. Coupled-channel approach to T_{cc}^+ including three-body effects. *Phys. Rev. D* 105, 014024 (2022).
9. Z. Ge, T. Eronen, A. de Roubin, K.S. Tyrin, L. Canete, S. Geldhof, A. Jokinen, A. Kankainen, J. Kostensalo, J. Kotila, M.I. Krivoruchenko, I.D. Moore, D.A. Nesterenko, J. Suhonen, M. Vilén. High-precision electron-capture Q value measurement of ^{111}In for electron-neutrino mass determination. *Physics Letters B* 2022, 137226 (2022).
10. X-K.Dong, V.Baru, F.-K.Guo, Ch. Hanhart, A.Nefediev, Coupled-channel interpretation of the LHCb double- J/ψ spectrum and hints of a new state near J/ψ threshold, *Phys. Rev. Lett.* 127, 11 (2021).
11. W.J. Briscoe, Alexander E. Kudryavtsev, Igor I. Strakovsky, Vladimir E. Tarasov and Ron L. Workman, On the Photoproduction Reactions $\gamma d \rightarrow \pi NN\bar{N}$ The European Physical Journal A 58, 23 (2022).
12. G.Yu. Prokhorov , O.V. Teryaev V.I. Zakharov, Hydrodynamic Manifestations of Gravitational Chiral Anomaly" *Phys.Rev.Lett.* 129 (2022) 15, 151601
13. G.Yu. Prokhorov O.V. Teryaev , V.I. Zakharov, Chiral vortical effect in extended Rarita-Schwinger field theory and chiral anomaly, *Phys.Rev.D* 105 (2022) 4, L041701
14. Georgy Yu. Prokhorov, Oleg V. Teryaev , Valentin I. Zakharov, Gravitational chiral anomaly and anomalous transport for fields with spin 3/2. *Phys.Lett.B* 840 (2023) 1378396.
15. V.G. Bornyakov, N.V. Gerasimeniuk, V.A. Goy, A.A. Korneev, Numerical study of the Roberge-Weiss transition, *Phys.Rev.D* 107 (2023) 1, 014508

И.О. руководителя ККТЭФ

В.Ю. Егорычев

Подпись В.Ю. Егорычева подтверждаю

Главный учёный секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»

К.Е. Борисов