

## ОТЗЫВ

Барвинского Андрея Олеговича, официального оппонента диссертации Фархтдинова Булата Ринатовича "Процессы многочастичного рождения в квантовой теории поля", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – "Теоретическая физика".

Диссертационная работа Фархтдинова Булата Ринатовича посвящена изучению процессов многочастичного рождения в квантовой теории поля современными численными методами. Эта работа является продолжением пионерских исследований в этой области, начатых в стенах ИЯИ РАН академиком В.А.Рубаковым с сотрудниками, и принадлежит очень важному и перспективному направлению в современной физике элементарных частиц. Это направление становится особенно актуальным в последние годы, когда после открытия бозона Хиггса была выдвинута идея хиггсовского "взрыва" (Higgspllosion), возможно способная быть положенной в основу изучения этой частицы в процессах ее множественного рождения на современных ускорителях. Важность и актуальность применения именно численных методов на современных компьютерах обосновывается тем, что даже при малых константах взаимодействия теория возмущений может оказаться бессильной, а используемый автором непертурбативный метод сингулярных решений В.А.Рубакова и Д.Т.Шона требует для анализа этих решений применения компьютерных методов.

Диссертационная работа Б.Р. Фархтдинова состоит из Введения, трех Глав, Заключения и одного приложения. Объем текста составляет 118 страниц, включает в себя 32 рисунка. В списке литературы 77 наименований.

Во Введении обосновывается актуальность исследования процессов многочастичного рождения в квантовой теории поля и степень разработанности этой темы, формулируются цели и задачи проведенных исследований, аргументируется их научная новизна и практическая значимость полученных результатов, описывается используемая методология. В разделе представляются выносимые на защиту научные положения, сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации.

В Главе 1 описано численное исследование, в котором процессы многочастичного рождения изучались при помощи методов классической

теории поля. А именно, рассматривались процессы рассеяния классических волновых пакетов в ненарушенной теории действительного скалярного поля с четвертичным самодействием. Такому рассеянию можно сопоставить траектории в функциональном интеграле квантовой теории, которым соответствуют переходы между когерентными состояниями с большими числами частиц при заданном значении энергии. Эти переходы составляют классически разрешенную область в конфигурационном пространстве, и их вероятности не являются экспоненциально подавленными. Находя классически разрешенную область для различных значений энергии можно определить, насколько близко к ней расположены процессы многочастичного рождения. Если они близки к классически разрешенным, то это является аргументом в пользу отсутствия подавления вероятностей таких процессов. В противном случае, нахождение этих процессов вдали от классически разрешенной области говорит в пользу экспоненциального подавления их вероятностей. Классически разрешенные области искались численно. Процессы многочастичного рождения оказались расположенными глубоко в классически запрещенной области при всех рассмотренных энергиях, что является указанием на экспоненциальное подавление их вероятностей, подтвержденное в дальнейших исследованиях, представленных в работе.

В Главе 2 описывается численная реализация квазиклассического метода сингулярных решений Д.Т. Шона, который позволяет вычислять инклюзивную вероятность многочастичного рождения частиц в главном экспоненциальном приближении. Вероятность в этом методе дается значением функционала на решении граничной задачи для классического уравнения поля в присутствии источника, причем физическому ответу соответствует предел источника, равного нулю. В этом пределе решение становится сингулярным, что и дает название этому методу. Метод был применен к теории действительного скалярного поля с четвертичным самодействием. В Главе описывается сам метод, его численная реализация, а также приводится сравнение аналитических свойств решений уравнения поля с их аналогами, полученными численно.

В Главе 3 рассказывается о численных результатах, полученных при помощи метода, описанного в Главе 2. В частности, приводится успешное сравнение численно полученных вероятностей при малых значениях чисел заполнения с данными, известными из литературы, что верифицирует используемый численный метод. Также в Главе представлены вероятности, полученные в противоположном пределе при различных значениях энергии.

Эти вероятности были получены впервые и имели интересные особенности. В частности, при достаточно больших значениях чисел заполнения вероятность при любой фиксированной средней кинетической энергии убывала экспоненциально, причем показатель экспоненты хорошо описывался линейной функцией. Наклон этой линейной зависимости был отрицательным для всех ее рассмотренных значений. Вероятности при промежуточных значениях чисел заполнения интерполируют между двумя описанными ранее режимами. Кроме того, экстраполяция численных данных демонстрирует, что наклон показателя экспоненты вероятности при большой множественности частиц отрицателен при любых значениях энергии, что указывает на экспоненциальное подавление вероятностей многочастичного рождения при произвольной энергии.

В приложении описаны детали численной реализации метода сингулярных решений Д.Т. Шона.

**Следует отметить,** что диссертация Булата Фархтдинова в целом написана ясно, она адекватно освещает цели, методы и результаты проделанной работы, а сами результаты являются новыми. Работа отражает высокую квалификацию диссертанта как в области физики частиц и математической физики, так и в области компьютерных методов. Недостатки носят чисто презентационный характер в части терминологии современных численных методов (в частности, таких терминов как "отжиг"). Из числа технических вопросов по тексту диссертации, хотелось бы получить объяснение специального выбора оператора (2.3), моделирующего начальное состояние с ненулевыми числами заполнения с помощью экспоненциального функционала от источника и полевого оператора. Казалось бы, при малом начальном числе частиц это должен быть оператор полиномиальный, а не экспоненциальный, по оператору рождения. Также, правильное ли это понимание, что в методе Шона сингулярный характер решений происходит от того, что начальное состояние моделируется в виде дельта-образного по времени импульса внешнего источника? Последний вопрос носит более концептуальный характер. Как кажется, результаты диссертации опровергают идею хиггсовского "взрыва". Можно ли сказать, что это так, или же остаются другие возможности для его реализации?

Сделанные замечания не снижают качества диссертации и не влияют на общую высокую оценку работы. Диссертация Фархтдинова Б. Р. является законченной научно-квалификационной работой и соответствует специальности 1.3.3 - теоретическая физика. Она вносит существенный вклад

в физику множественного рождения частиц в нелинейных полевых моделях и существенно развивает метод Шона его описания.

Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, неоднократно докладывались автором на международных семинарах, конференциях и школах. Содержание диссертации полно и точно отражено в автореферате.

Достоверность и степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений.

Диссертация "Процессы многочастичного рождения в квантовой теории поля", удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 - теоретическая физика.

22.09.2023

Высококвалифицированный ведущий научный сотрудник  
Лаборатории теории фундаментальных взаимодействий  
Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Физический институт им. П. Н. Лебедева  
Российской академии наук, доктор физико-математических  
наук по специальности 1.3.3- теоретическая физика.

\_\_\_\_\_ Барвинский Андрей Олегович

barvin@lpi.ru, +7(499) 132-60-49  
119991, ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53

Подпись А.О.Барвинского «удостоверяю»

Ученый секретарь ФИАН,  
к.ф.-м.н.

А.В. Колобов

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. **Barvinsky A. O.** Heat kernel expansion for higher order minimal and nonminimal operators / A. O. Barvinsky, W. Wachowski // Phys. Rev. D, 2022. – Vol. 105. – No. 6. – P. 065013. – DOI: 10.1103/PhysRevD.105.065013
2. **Barvinsky A. O.** Beta functions of (3+1)-dimensional projectable Hořava gravity / A. O. Barvinsky, A. V. Kurov, S. M. Sibiryakov // Phys.Rev.D, 2022. – Vol. 105 – No. 4 – P. 044009. – DOI: 10.1103/PhysRevD.105.044009
3. **Barvinsky A. O.** Heat kernel for higher-order differential operators and generalized exponential functions / A. O. Barvinsky, P. I. Pronin, W. Wachowski // Phys. Rev. D, 2019. – Vol. 100. – No. 10. – P. 105004. – DOI: 10.1103/PhysRevD.100.105004
4. **Barvinsky A. O.** Towards the renormalization group flow of Horava gravity in (3+1) dimensions / A. O. Barvinsky, M. Herrero-Valea, S. M. Sibiryakov // Phys.Rev.D, 2019. – Vol. 100. – No. 2. – P.026012. – DOI: 10.1103/PhysRevD.100.026012
5. **Barvinsky A. O.** Renormalization of gauge theories in the background-field approach / A. O. Barvinsky, D. Blas, M. Herrero-Valea, S. M. Sibiryakov, C. F. Steinwachs // JHEP, 2018. – Vol. 07. – P.035. – DOI: 10.1007/JHEP07(2018)035