

ОТЗЫВ

официального оппонента Годунова Сергея Ивановича
на диссертационную работу Маслова Василия Евгеньевича
«Солитоны и осциллоны в скалярных теориях поля»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.3 – теоретическая физика

Диссертация Маслова В. Е. посвящена классическим локализованным решениям в скалярных теориях поля – солитонам и осциллонам. Особое внимание уделено влиянию неинтегрируемости на свойства (статических) солитонов, и построению описания осциллонов (долгоживущих осциллирующих полевых конфигураций) в обширном классе скалярных теорий.

Следует отметить несомненную **актуальность темы** диссертационного исследования. Скалярные полевые конфигурации с конечной энергией представляют огромный интерес для космологии. Одним из активно изучаемых объектов являются скалярные доменные стенки – гипотетические топологические дефекты (солитоны), которые могли существовать в ранней Вселенной и влиять на её эволюцию. В частности, в последнее время были предложены сценарии, в которых доменные стенки приводят к наблюдаемой барионной асимметрии в видимой части Вселенной. Интересным с теоретико-полевой точки зрения при этом является вопрос, изученный в рассматриваемой диссертации, о том, как меняются свойства таких солитонов при добавлении малого неинтегрируемого возмущения в теорию. Параллельно с этим большое внимание в последнее десятилетие начало уделяться осциллонам – солитоноподобным долгоживущим сгусткам поля, численно обнаруженным во многих скалярных теориях, и потому также способным своим появлением влиять на эволюцию ранней Вселенной. При этом универсального описания осциллонов, которое объясняло бы их долговечность, до сих пор известно не было. Построением в диссертации эффективной теории для осциллонов большого размера автор делает важный шаг в этом направлении.

Диссертационная работа В. Е. Маслова состоит из Введения, четырёх глав, Заключение и трёх приложений. Полный объём текста составляет 112 страниц и включает в себя 29 рисунков. Список литературы содержит 106 наименований.

Во **Введении** обосновывается актуальность диссертационного исследования, даётся обзор современного состояния проблемы. Сформулированы цели и задачи диссертации и кратко обозначены используемые методы исследования. Сформулированы основные результаты диссертации, выносимые на защиту. Обсуждается их научная новизна, достоверность, а также высокая теоретическая и практическая значимость в контексте применения в космологии, а также физике конденсированного состояния вещества. Приводятся сведения о публикациях автора по результатам диссертации и сведения об апробации последних на конференциях и семинарах.

Первая глава посвящена изучению свойств солитонов при наличии неинтегрируемости, и значит, динамического хаоса, в статических уравнениях поля. Более конкретно, автор рассматривает модель синус-Гордона во внешнем пространственно периодическом потенциале. Отдельно автором отмечено, что такой выбор обеспечивает применимость результатов главы к большому классу систем в физике конденсированного

состояния вещества, описываемых моделью синус-Гордона. Первым результатом главы является установление (и численно, и аналитически) экспоненциального роста количества разнообразных статических солитонов с их длиной при наличии пространственной модуляции. Это существенно отличается от интегрируемого случая (имеющего место при постоянном в пространстве внешнем потенциале), где существует всего два статических солитона: кинк и антикинк. Следующим результатом главы является наглядная демонстрация приближённого самоподобия множества стабильных солитонов. Автор показывает, что значения поля солитонов на плоскости начальных данных образуют фрактальную структуру и аналитически оценивает снизу её фрактальную размерность, доказывая, что она нецелая, а также находит указанную размерность численно для различных значений параметра неинтегрируемости. Ещё одним интересным результатом главы является демонстрация связи характеристик хаоса, метрической и топологической энтропий, в статических уравнениях поля с параметрами множества стабильных солитонов.

Во **второй главе** автор переходит к изучению осциллонов и последовательно строит модельно-независимую эффективную теорию поля, описывающую осциллоны большого радиуса и, что важно, произвольной амплитуды. В качестве параметра разложения выступает обратный радиус полевой конфигурации, или, если быть точнее, градиентный член в действии. Построенная теория во всех порядках обладает глобальной $U(1)$ симметрией, а значит, и сохраняющимся нётеровским зарядом. Таким образом, она описывает осциллоны как нетопологические солитоны. Автором были получены критерии существования и стабильности осциллонов в эффективной теории. Также автор обсуждает условия долговечности осциллонов и классы теорий, им удовлетворяющие. На примере модели с плоским потенциалом предсказания эффективной теории (для профилей, энергий, зарядов осциллонов) сравниваются с результатами численных симуляций осциллонов в полной теории. Также построенное эффективное описание было сопоставлено с пертурбативным разложением по амплитуде поля.

В **третьей главе** автор рассматривает предельный случай нулевой пространственной размерности и показывает, что в нём существуют точно периодические решения полевых уравнений. Все интегральные характеристики таких решений сосредоточены в их центре, и потому точно предсказываются ранее построенной эффективной теорией. Трактруя их как «ноль-мерные осциллоны», автор предлагает с их помощью объяснять не только наблюдавшееся во второй главе улучшение точности предсказаний эффективной теории при уменьшении размерности пространства, но и большую распространённость осциллонов в низкоразмерных моделях.

Четвёртая глава посвящена осциллонам в теориях с близкими к квадратичным потенциалам, и в частности, моделях монодромии. Такие модели удовлетворяют полученному в главе 2 критерию на долговечность осциллонов, и, действительно, из литературы известно, что в них наблюдаются исключительно долго живущие осциллоны. При этом автор отмечает, что непосредственное применение разработанного описания к таким моделям затруднительно, поскольку невозможно получить аналитические выражения для формфакторов эффективной теории. Для обхода этой трудности автором был разработан метод корректного выделения слабой нелинейности потенциала при произвольной амплитуде поля. Основная идея этого метода состоит во введении зависящей от амплитуды «эффективной массы» линейного приближения. Последующая эффективная теория для осциллонов была, таким образом, построена как разложение не только по градиентному члену, но и по малой нелинейности. Автор сравнивает предсказания построенной теории с результатами численных симуляций осциллонов, равно как и с существующими в

литературе методами описания осциллонов. Также автор исследует, как точность предложенного способа зависит от амплитуды колебаний поля и от нелинейности потенциала.

В **заключении** подводятся итоги диссертационному исследованию и перечисляются его основные результаты. Технические детали используемых методов исследования, равно как и теоретических выводов, приведены в **трёх приложениях**.

Текст диссертации соответствует положениям, выносимым на защиту.

В диссертации были получены следующие **новые научные результаты**, которые были опубликованы в **трёх статьях** в престижных международных журналах и неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и семинарах. Во-первых, на примере модели синус-Гордона во внешнем потенциале был описан новый класс статических солитонов, возникающий в полевых системах с неинтегрируемыми статическими уравнениями, обнаружены фрактальные свойства этого бесконечного семейства. Во-вторых, было последовательно построено универсальное эффективное описание осциллонов большого размера и получены критерии их существования и стабильности. Отдельно был изучен предел низкоразмерных осциллонов, в котором эффективная теория становится точной. Наконец, для слабо нелинейных моделей (в частности, используемой в инфляционных теориях модели монодромии) было предложено упрощение эффективной теории осциллонов, корректно учитывающее малую ангармоничность и тем самым сохраняющее хорошую точность аналитических предсказаний.

Результаты диссертации имеют высокую **теоретическую и практическую значимость**. Они могут быть использованы в теоретических и экспериментальных исследованиях солитонов и осциллонов, проводимых в ИЯИ РАН (Москва), ФИАН (Москва), ОИЯИ (Дубна), НГУ (Новосибирск) и других российских и международных институтах. Не вызывает сомнений **определяющий вклад** автора в получение всех результатов диссертации.

Среди достоинств представленной диссертации хочу также отметить ясность и понятность изложения материала. Незначительное число опечаток и неточностей не приводят к существенным затруднениям при чтении текста. Хочу отдельно отметить наглядность презентации результатов, представленных в Главе 1.

При этом по рассматриваемой диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. Для описания осциллонов в построенной эффективной теории всё равно требуется численное решение полученного дифференциального уравнения. У наивного читателя может возникнуть вопрос в целесообразности подобного перехода, поэтому думаю, что указание на быстроту предложенной методики могло бы подчеркнуть достоинства разработанного подхода.
2. При сравнении полученных результатов эффективной теории с численными симуляциями полной теории важна точность расчётов. При исследовании влияния дискретизации пространственной и временной координат (см. Приложение Б и Рисунок Б.1) используется отношение абсолютной величины разности решений к амплитуде поля, но не обязательно взятых в одной точке. Это не означает, что полученная оценка несправедлива, но было бы интересно узнать, почему был выбран подобный параметр. Кроме этого на Рисунке Б.1 видны осцилляции с периодом существенно больше периода осциллона, которые вызывают недоумение.

3. На Рисунках 2.5, 2.7, 4.5 наряду с точками, у которых погрешность настолько мала, что она не изображена, встречаются точки с достаточно большой погрешностью по частоте. При этом эти два типа точек бывают достаточно близки друг к другу. Возникает естественный вопрос о происхождении подобного различия.
4. Автору удалось пронаблюдать резкое падение скорости распада трёхмерного осциллона на некоторой частоте (см. Рис. 2.6 и 3.1), лежащее вне пределов применимости эффективной теории. Думаю, что дополнительное обсуждение этого явления могло бы улучшить работу. Конечно, было бы интересно узнать, можно ли из полученных численных данных что-то сказать про происходящие процессы в окрестности этой частоты.

Указанные замечания ни коим образом не умаляют значимости проведённого диссертационного исследования. Диссертация Маслова В.Е. выполнена на **высоком научном уровне** и полностью соответствует специальности 1.3.3 – теоретическая физика. **Достоверность и обоснованность** результатов диссертации обеспечивается использованием корректных аналитических и численных методов современной теоретической физики. **Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.**

Диссертация Маслова Василия Евгеньевича «Солитоны и осциллоны в скалярных теориях поля» представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемого к кандидатским диссертациям, а её автор **заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук** по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

Дата: 22 декабря 2023 г.

Официальный оппонент:

Высококвалифицированный старший научный сотрудник
лаборатории квантовой теории поля
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физический институт имени П.Н. Лебедева
Российской Академии Наук (ФИАН),
кандидат физико-математических наук
по специальности 1.3.3 – теоретическая физика

Годунов Сергей Иванович

godunovsi@lebedev.ru, +7 (985) 9617148,
119991, ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53

Подпись С. И. Годунова «удостоверяю»

Учёный секретарь ФИАН,
к.ф.-м.н.

А. В. Колобов

Годунов Сергей Иванович

Кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика

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

1. Godunov S.I., Karkaryan E.K., Novikov V.A. et al. pp scattering at the LHC with the lepton pair production and one proton tagging // Eur. Phys. J. C. – 2022. – Vol. 82. – P. 1055.
2. Godunov S.I., Karkaryan E.K., Novikov V.A. et al. Forward Proton Scattering in Association with Muon Pair Production via the Proton Fusion Mechanism at the LHC // JETP Lett. – 2022. – Vol. 115. – P. 59-62.
3. Godunov S.I., Novikov V.A., Rozanov A.N., Vysotsky M.A., Zhemchugov E.V. Production of heavy charged particles in proton-proton ultraperipheral collisions at the Large Hadron Collider: survival factor // JHEP. – 2021. – Vol. 10. – P. 234.
4. Godunov S.I., Karkaryan E.K., Novikov V.A. et al. LHC as a photon-photon collider: Bounds on // Phys. Rev. D – 2021. – Vol. 103. – P. 035016.
5. Godunov S.I., Novikov V.A., Rozanov A.N., Vysotsky M.A., Zhemchugov E.V. Quasistable charginos in ultraperipheral proton-proton collisions at the LHC // JHEP. – 2020. – Vol. 01. – P. 143
6. Godunov S.I., Novikov V.A., Vysotsky M.A., Zhemchugov E.V. Dimuon Resonance Near 28 GeV and the Muon Anomaly // JETP Lett. – 2019. – Vol. 109. – P. 358-363.