

О Т З Ы В

официального оппонента, доктора физико-математических наук Г.Е. Воловика на диссертационную работу Хайдукова Захара Викторовича «Коллективные явления в киральных средах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертационная работа Хайдукова посвящена широкому классу явлений в квантовой теории поля, гравитации и физике конденсированных сред. В последнее время возникло интенсивное сотрудничество между учеными, работающими в этих областях физики. Топологические конденсированные среды, такие как графен, сверхтекучий ^3He , топологические изоляторы, Дираковские и Вейлевские полуметаллы дают примеры нетривиальных фермионных вакуумов с различного рода квантовыми аномалиями. Эти вакуумы гораздо легче доступны для эксперимента, чем в физике высоких энергий, и поэтому могут служить ареной для применения и экспериментальной проверки теорий, развитых в диссертации. Важная потенциальная роль топологически нетривиальных систем как в физике элементарных частиц, так и в физике конденсированных сред, где графен и другие электронные топологические материалы могут иметь непосредственное практическое применение, определяет актуальность темы диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы, состоящего из 159 наименований. Она изложена на 100 страницах. Во Введении (она же первая глава) обосновывается актуальность выбранной темы, формулируется цель исследования, раскрывается научная новизна и практическая значимость работы. Описываются основные эффекты и явления: графен, аксиальная аномалия, разделения киральностей, Стандартная Модель.

Вторая глава посвящена исследованию электронных спектров графена в эффективных магнитном и гравитационном полях, индуцированных упругими деформациями графена. Калибровочное поле и гравитационная диада (репер) зависят от параметра Грюнайзена электрона, описывающего зависимость энергии перескока между ближайшими атомами от межатомного расстояния. Показано, что эффективное гравитационное поле дает поправку к известному геометрическому результату для числа уровней в магнитном поле. Эта поправка формально пропорциональна кубу размера графена. Утверждается, что зависимость от размера образца означает, что точное выражение этой поправки зависит от формы графена.

Однако, не исключено, что это тоже геометрический или топологический эффект, связанный с гравитационными или смешанными квантовыми аномалиями. Это было бы интересно рассмотреть в сверхтекучем гелии-3. В графене $2+1$ калибровочное поле и $2+1$ телепараллельная гравитация, имеют

точно такое же происхождение, как и в 3+1 сверхтекучем гелии-3. Такие коллективные поля возникают в результате разложения Гамильтониана вблизи Дираковской или Вейлевской точки в соответствии с конструкцией Атия-Ботт-Шапиро. Существует версия, что Стандартная Модель и теория гравитации являются эффективными теориями, возникающими вблизи Вейлевской точки. Поэтому исследование графена, как и сверхтекучего гелии-3, может иметь важные побочные результаты, что подтверждает уникальность графена в ряду электронных материалов.

В 3-ей и 4-ей главах рассмотрены физические эффекты, определяющиеся квантовыми аномалиями, в том числе киральный эффект разделения, когда аксиальный ток возникает вдоль магнитного поля при наличии химического потенциала. Обсуждается связь этого и других аналогичных аномальных эффектов с топологическими инвариантами в импульсном пространстве, выраженными через одночастичную функцию Грина. В данном случае инвариант представляет собой 3-форму в импульсном пространстве с весом γ^5 . Было бы интересно рассмотреть инварианты с другими весами, такими как в уравнениях (12.14), (20.3), (20.6) (21.20) в ссылке [33], которые представляют собой либо операторы симметрии, либо глобальные константы типа температуры и химического потенциала.

Интересный результат получен для аномалий в решеточных теориях. В решеточной регуляризации с деформацией так называемых оверлэп фермионов возникают нули функции Грина. Нули функции Грина вносят в топологический инвариант такой же вклад, как и полюса функции Грина. В физике конденсированных сред это важный момент, так как при наличии межэлектронного взаимодействия полюса могут переходить в нули и тем самым исчезать из наблюдения. Кроме того нули могут компенсировать вклад полюсов, так что искомым аномальный эффект исчезает. Это было продемонстрировано в диссертации на примере оверлэп фермионов.

Один из интересных выводов 4-ей главы это то, что формула Адлера-Белла-Джакива (4.40) для киральной аномалии не зависит от влияния температуры и химического потенциала. Это на первый взгляд кажется странным. Однако в сверхтекучем гелии-3 киральная аномалия была наблюдаена в Манчестере еще в 1997 году. Коэффициент в формуле Адлера-Белла-Джакива был проверен с точностью до нескольких процентов, и оказалось, что он не зависит от температуры даже вблизи температуры перехода. Это эффект постоянства спектрального потока.

В 5-ой главе рассмотрена модель, в которой легкий 125 ГэВ Хиггс представляет собой составной псевдо-голдстоуновский бозон с массой, возникающей за счет мягкого нарушения симметрии. Здесь важна аналогия с физикой сверхтекучего $^3\text{He-B}$, где составные бозоны представляют 3 голдстоуна, один легкий Хиггс (псевдо-голдстоун, возникающий из-за мягкого нарушения симметрии спин-орбитальным взаимодействием) и $14+$ тяжелых Хиггсов. В статье [140] описывалось наблюдение в $^3\text{He-B}$ распада магнона на два аналога легкого Хиггса, и на основании аналогии было предложено существование

тяжелого Хиггса с массой порядка 1 ТэВ. Интересно, что статья была написана до того, как ATLAS и CMS объявили в декабре 2015 года о превышении числа событий при значении инвариантной массы ≈ 750 ГэВ. В данной релятивистской модели составных бозонов есть также 3 голдстоуна ($W^\pm$ и Z бозоны), но уже 5 псевдо-голдстоунов. Один из них отождествлен со скалярной частицей с массой 125 ГэВ, другой с массой порядка 1 ТэВ может претендовать на экспериментальное обнаружение.

В Заключении приведены основные результаты диссертации. Их достоверность, а также обоснованность научных положений и выводов подтверждаются сравнением с численными результатами и поэтому не вызывают сомнений.

Диссертационная работа Хайдукова является серьезным законченным исследованием, которое имеет непосредственное практическое применение в быстро развивающейся области физики топологических сред и вакуумов. Я надеюсь, что диссертант продолжит исследования именно в этом направлении. Есть отдельные критические замечания. Релятивистские обозначения не везде понятны читателю, работающему в области физике конденсированных сред, что мешает сотрудничеству. Например не дано определение Ψ в (1.2) и других уравнениях, γ^5 не везде определена, в некоторых уравнениях пропущены скобки.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации. Основные результаты диссертационной работы Хайдукова Захара Викторовича опубликованы в 4 печатных работах. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Диссертация Хайдукова представляет собой добротное и законченное научное исследование, обладает внутренним единством и отвечает критериям Положения о порядке присуждения учёных степеней. Автор диссертации, несомненно, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук
главный научный сотрудник
Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау
142432, МО., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1-А
тел.: +7 495 702-93-17, volovik@itp.ac.ru

Воловик

Г.Е. Воловик

Подпись Г.Е. Воловика удостоверяю
Ученый секретарь ИТФ им. Ландау

Дата: 28 декабря 2017 г.



С.А. Крашаков