

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Казинского Петра Олеговича «*Непертурбативные эффекты в интенсивных электромагнитных и гравитационных полях*», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика

Актуальность. В диссертации исследуются некоторые непертурбативные эффекты в квантовой электродинамике и квантовой теории гравитации. Также в ней довольно подробно излагается и исследуется новый взгляд (предложенный автором) на стохастическую теорию систем, далеких от термодинамического равновесия. Можно выделить два аспекта, в связи с которыми тема диссертационной работы является актуальной.

Во-первых, современное развитие экспериментальной техники дает возможность проверить предсказания квантовой теории поля вне рамок стандартной теории возмущений. Что касается электромагнитных полей, отмечу два крупных проекта: европейский проект Extreme Light Infrastructure (ELI) и российский Exawatt Center for Extreme Light Studies (XCELS). На этих экспериментальных установках планируется создать оптические лазерные поля интенсивностью $I \gtrsim 10^{24}$ Вт/см² и выше в лабораторной системе отсчета. При лобовом столкновении ультрарелятивистских электронов с такой волной напряженность электромагнитного поля в системе отсчета, связанной с электроном, будет порядка швингеровской. Для полей таких интенсивностей некоторые из эффектов, описанных в диссертации, можно будет проверить экспериментально. Неperтурбативные эффекты в гравитационных полях можно наблюдать в прецизионных экспериментах по проверке предсказаний классической общей теории относительности (ОТО). Различные формулировки квантовой гравитации предсказывают небольшие отклонения от законов классической общей теории относительности (ОТО). В связи с этим существует множество экспериментальных проектов как наземных, основанных на атомной интерферометрии (например, в ZARM в Бремене), так и космических (проект NASA «SR-POEM», проект CNES «MICROSCOPE», проект ESA «STE-QUEST»), направленных на поиски возможных отклонений от предсказаний классической ОТО. В случае гравитации, однако, предсказать величину квантового эффекта невозможно по причине пертурбативной неперенормируемости квантовой гравитации.

Во-вторых, на сегодняшний день не выяснена природа темной материи, образующей согласно стандартной космологической модели (Λ CDM) около 20 процентов энергетического состава Вселенной. Существует множество гипотез, делающих попытку объяснить феномен темной материи. В данной диссертационной работе, при исследовании непертурбативных эффектов в квантовой гравитации, возникает естественный кандидат на роль холодной темной

материи – дополнительное векторное поле. Введение этого векторного поля не только дает (возможное) решение проблемы темной материи, но также решает известную проблему выбора единственного унитарного представления алгебры наблюдаемых в квантовой гравитации.

Общая характеристика.

- Согласно известным результатам Кривицкого и Цытовича классическое уравнение Лоренца-Дирака (ЛД) может быть использовано для описания квантовой динамики локализованного волнового пакета электрона во внешнем электромагнитном поле. Несмотря на то что уравнение ЛД обладает рядом патологических особенностей (самоускоряющиеся решения, нарушение причинности на масштабе классического радиуса электрона), существует последовательная процедура нахождения физических решений этого уравнения. Эта процедура хорошо известна в литературе и используется в диссертации. В результате применения этой процедуры дифференциальное уравнение ЛД переходит на подпространстве физических решений в интегродифференциальное уравнение. Это уравнение известно с 60-х годов прошлого века, однако его общие свойства оставались практически неизученными. Используя данное уравнение, автор впервые доказал в диссертационной работе, что в полях простых конфигураций (постоянное однородное электромагнитное поле, плоская электромагнитная волна) сила реакции излучения стремится уменьшить полную излучаемую мощность так, что электрон переходит на траекторию с наименьшим излучением. Также им доказано, что для постоянного однородного внешнего электромагнитного поля полная мощность излучения заряда является монотонно убывающей функцией времени, а в случае плоской волны она ограничена сверху монотонно убывающей функцией. Примечательно, что эти очевидные на первый взгляд свойства динамики электронов не были ранее доказаны в релятивистском случае.

- Судя по публикациям, автор является инициатором исследования асимптотических режимов при больших временах динамики ультрарелятивистских заряженных частиц с учетом реакции излучения и их применения к физическим проблемам. Для уравнения ЛД такие асимптотики были найдены им впервые для внешних электромагнитных полей, указанных выше. Для уравнения Ландау-Лифшица, являющегося приближением к уравнению ЛД, точные решения для указанных полей были известны, однако анализа их асимптотик проведено не было. В этой связи стоит отметить впервые найденные спектральные плотности излучения, сформировавшегося на данных асимптотиках, и выражение для полной мощности излучения, которая в асимптотическом режиме для скрещенного электромагнитного поля и плоской электромагнитной волны постоянной амплитуды оказалась равной половине энергии покоя частицы, деленной на собственное время частицы, проведенное в элект-

ромагнитном поле (не зависит от напряженности внешнего поля и заряда частицы).

- Детально проведен анализ рассеяния ультрарелятивистских электронов на оптическом лазерном пучке линейной поляризации с интенсивностью $I \gtrsim 10^{25}$ Вт/см². Для полей такой интенсивности динамика локализованного волнового пакета электронов становится существенно непертурбативной, поскольку электроны за время пребывания в лазерном пучке успевают выйти в асимптотический режим. В диссертации указано много интересных («универсальных») свойств рассеянных электронов вызванных тем, что в результате радиационного трения часть степеней свободы электронов эффективно «вымирает». Здесь я отмечу найденный в диссертации закон отражения, связывающий углы падения и отражения. Этот закон не зависит ни от каких параметров заряженной частицы и лазерного пучка при условии, конечно, что частица успела выйти в универсальный режим, т.е. в сильных полях и при высоких энергиях частицы.

- В третьей главе диссертации строится стохастическая динамика с помощью деформации алгебры классических наблюдаемых, определенных на пуассоновом многообразии, по аналогии с деформационным квантованием. Эта процедура разработана автором впервые и названа стохастической деформацией. Отмечу, что после стохастической деформации модели свободной нерелятивистской частицы получается стохастическая система уравнений, исследованная еще Шредингером. Процедура, развитая автором диссертации, позволяет строить стохастическую механику систем с нетривиальным фазовым пространством с помощью явных конструкций Федосова и Концевича для *-произведения. В качестве одного из примеров, в диссертации построена стохастическая деформация классической модели, приводящей к стохастическому уравнению ЛД.

- В четвертой главе проводится аналитическое исследование однопетлевого омега-потенциала частиц с законом дисперсии, обладающим эллипсоидальной поверхностью постоянной энергии. Среди наиболее интересных результатов укажу явное выражение для высокотемпературного разложения омега-потенциала таких частиц. В случае релятивистского закона дисперсии это разложение совпадает с известным разложением, полученным Хабером и Велдоном. Особый интерес в данном случае представляет то, что разработанная в данной главе процедура получения высокотемпературного разложения легко обобщается на случай частиц во внешнем стационарном поле, как это показано в шестой главе диссертации. Другой интересный результат, известный для ряда частных примеров, но в такой общей форме ранее не встречавшийся мне в литературе, состоит в установлении общей взаимосвязи между высокотемпературным разложением однопетлевой свободной энергии без вакуумного вклада с энергией вакуума при нулевой температуре. В качестве одного из

физических примеров автор исследует термодинамические свойства электронов проводимости в графене. Этот результат может быть интересен в физике графена.

- В пятой главе диссертации исследуется влияние квантовых поправок к эффективному потенциалу поля Хиггса, явно зависящих от вектора Киллинга фоновой стационарной метрики, на вакуумное среднее поля Хиггса. Наличие таких поправок в эффективном действии обсуждалось в работах Фролова, Зельникова и др., однако феноменологические следствия их наличия исследуются в диссертации впервые. Эти вклады приводят к гравитационному сдвигу масс массивных частиц стандартной модели.

- В шестой главе выводится (впервые) общая формула для высокотемпературного разложения однопетлевого омега-потенциала релятивистских частиц на стационарном фоне. Опираясь на результаты работ Балиана и Блоха из этого разложения выделяются явно непертурбативные вклады, которые потом вычисляются для скалярного поля на стационарном, медленно меняющемся в пространстве гравитационном фоне. Показывается, что пертурбативные вклады в однопетлевое эффективное действие при нулевой температуре не зависят от выбора вакуумного состояния квантовых полей, а непертурбативные – зависят. Вакуумное состояние теории определяется как состояние, отвечающее минимальному собственному значению гамильтониана. По своему определению оно явно зависит от выбора времениподобного векторного поля, с помощью которого гамильтониан строится по лагранжиану теории. Зависимость выбора вакуумного состояния теории от нединамического времениподобного векторного поля уже отмечалась в литературе в работах Гриба с сотрудниками и др., где указывалась проблема естественного выбора этого векторного поля для произвольного гравитационного фона. В диссертации впервые показано, что наличие данного нединамического поля в эффективном действии теории приводит к квантовой гравитационной аномалии (нарушению тождеств Уорда, следующих из общей ковариантности классической теории), и разработан динамический механизм сокращения этой аномалии. В результате в теории возникает динамическое времениподобное векторное поле, уравнения движения которого, как это показано в диссертации, описываются релятивистскими уравнениями Эйлера для идеальной изэнтропической жидкости. Отмечу, что подобного рода жидкость (reference fluid) уже вводилась в рамках канонической квантовой гравитации в работах ДеВитта, Айшема, Кухара, Брауна и др., однако статус данной «жидкости» в квантовой гравитации (ее наблюдаемость, уравнения состояния и пр.) оставался не ясен. В диссертации впервые указан естественный класс уравнений состояния этой жидкости и выдвинута гипотеза об ее отождествлении со значительной частью холодной темной материи. Интересно, что в пределе слабого поля уравнение состояния такой жидкости задается политропой и характеризуется двумя универсальными постоянными

– показателем политропы и политропной постоянной. Автором найдены оценки для значений этих постоянных. В результате построена неперенормируемая самосогласованная модель квантовой гравитации, что, несомненно, является серьезным достижением в данной области.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, контролируется строгостью их вывода и совпадением в ряде частных случаев с известными результатами других авторов.

Критические замечания.

- Многие выкладки в диссертации описаны слишком кратко. Например, при выводе асимптотик физических решений уравнения ЛД в разделе 2.2.7 не ясно, как получается формула (2.86) из формул (2.84) и (2.85). После подстановки (2.85) в (2.84) на коэффициенты разложения в (2.85) должна получиться система дифференциальных уравнений. При ее интегрировании возникают произвольные постоянные, которые отсутствуют в окончательном ответе (2.86). Не объяснена причина исчезновения этой зависимости решения (2.86) от начальных данных.
- В разделе 6.6 проводится пертурбативное квантование релятивистской гидродинамики в рамках формализма Тауба-Фока. Не исследована связь данного подхода с другими уже имеющимися в литературе по данной теме и цитируемыми автором.
- В качестве иллюстрации применения общей формулы для высокотемпературного разложения (раздел 6.1) следовало бы рассмотреть более простой и известный пример, скажем, высокотемпературное разложение свободной энергии в квантовой электродинамике, прежде чем искать такое разложение для скалярного поля на искривленном фоне.
- В разделе 3.3.4 рассматривается стохастическая динамика общей системы диффузионного типа, находящейся в состоянии близком к локальному термодинамическому равновесию. Было бы поучительно рассмотреть какой-нибудь конкретный пример, скажем, гидродинамику в учетом вязкости и теплопроводности жидкости, тем более, что в другой главе диссертации исследуется квантование релятивистской гидродинамики.

Заключение. Отмеченные недостатки не снижают качество исследований и не влияют на главные результаты диссертации. Я считаю, что результаты диссертации П.О. Казинского представляют крупное научное достижение в области теоретической физики. Они научно обоснованы, их достоверность и новизна не вызывают сомнений. Материалы диссертации опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах и доложены на международных конференциях и семинарах. Автореферат правильно отражает

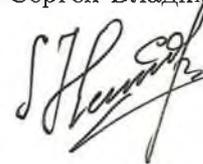
основное содержание диссертации. Диссертация «Непертурбативные эффекты в интенсивных электромагнитных и гравитационных полях» отвечает основным требованиям, предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям, а ее автор, Казинский Петр Олегович, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Официальный оппонент:

ассоциированный профессор лаборатории теоретической физики высоких энергий Токийского столичного университета (Tokyo Metropolitan University), доктор физико-математических наук (диссертация защищена по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика), ассоциированный профессор.

Кетов Сергей Владимирович

Адрес: 192-0397, Япония, Токио,
Хачиоджи-ши, Минами-осава 1-1,
Токийский Столичный Университет,
Телефон: +81(426)771111,
Факс: +81(426)772483,
E-mail: office@phys.se.tmu.ac.jp,
<http://www.tmu.ac.jp/>



26.04.2016

Signature is certified by
(Подпись заверяю)

Dean of TMU Graduate School of Science and Engineering
(Декан Факультета Науки и Инженерии Токийского
столичного университета)

Naoki Kachi

