

## Отзыв

официального оппонента Сушкова Сергея Владимировича на диссертационную работу Казинского Петра Олеговича «Непертурбативные эффекты в интенсивных электромагнитных и гравитационных полях», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Исследование непертурбативных эффектов занимает сейчас одно из центральных мест в физике высоких энергий. Это связано с тем, что большинство явлений, описываемых пертурбативными методами в рамках стандартной модели элементарных частиц, уже исследованы, а технологии расчета алгоритмизированы и переведены в программный код. Неperтурбативные методы, разработке которых посвящена данная диссертация, всегда представляют собой некоторое искусство, как, например, техника инстантонов в КХД или метод унитарности в суперконформных квантовых теориях поля. В данном случае для получения непертурбативных результатов автор использует в диссертации довольно хорошо разработанный метод фонового поля совместно с (приближенными) методами решения релятивистских волновых уравнений. Применяя эти методы и развивая их, автору удалось получить ряд интересных непертурбативных результатов в квантовой электродинамике и квантовой гравитации. Что касается квантовой гравитации, эти результаты носят во многом принципиальный характер и являются значительным достижением в данной области.

Результаты диссертации по квантовой электродинамике, общей теории неравновесных процессов и квантовой гравитации находятся в русле современных теоретических и экспериментальных исследований в данных областях. Новые эффекты, предсказанные в диссертации, могут быть проверены экспериментально в недалеком будущем с запуском более мощных и точных экспериментальных установок.

**Актуальность** темы и задач, рассмотренных в диссертации несомненна. Защищаемые положения диссертации являются новыми. В достоверности общетеоретических результатов и проведенных расчетов не возникает сомнений, так как они получены в рамках общепринятых теорий с использованием строгих методов математической физики. Полученные в

диссертации результаты согласуются с теоретическими результатами других авторов и данными экспериментов.

Диссертационная работа представлена на 310 страницах текста и состоит из введения, шести глав, заключения, двух приложений и списка использованной литературы из 514 наименований.

В **первой главе** диссертации проводится обзор литературы, подробно обсуждаются постановка задачи и основные полученные результаты. Дается сопоставление результатов с известными в литературе.

Во **второй главе** исследуется динамика локализованных волновых пакетов заряженных частиц в интенсивных электромагнитных полях. Основное внимание уделено поведению частиц при больших временах в постоянном однородном электромагнитном поле и поле плоской электромагнитной волны произвольного профиля. Динамика заряженных частиц исследуется с помощью уравнений Лоренца-Дирака и Ландау-Лифшица. Эти уравнения являются на данный момент стандартным инструментом исследования эволюции электронов в лазерных электромагнитных полях с учетом реакции излучения. Результаты диссертации демонстрируют качественное изменение динамики электронов в сильных электромагнитных полях. В этой главе найдено много новых, интересных эффектов, обусловленных учетом влияния реакции излучения на динамику локализованного волнового пакета заряженной частицы. Например, подробно описано рассеяние электронов интенсивной ( $I > 10^{24}$  Вт/см<sup>2</sup>) лазерной волной линейной поляризации. В этом случае электромагнитная волна является для электронов своеобразной решеткой, движущейся со скоростью света: электроны, попавшие в область лазерного пучка, где электрическое поле способствует их прохождению сквозь пучок, пролетают через локализованную область электромагнитную волну, а те электроны, которые попали в область электромагнитной волны с электрическим полем, препятствующим их прохождению сквозь пучок, – отражаются. Свойства рассеянных электронов также довольно примечательны. Большая часть прошедших электронов рассеивается на малые углы к направлению распространения электромагнитной волны. Максимальный лоренц-фактор прошедших электронов пропорционален работе, совершенной электромагнитным полем, и не зависит от начального импульса. Прошедшие

электроны обладают одинаковыми проекциями импульса на ось, параллельную вектору электрического поля электромагнитной волны. Эта проекция определяется только диаметром лазерного пучка, измеренным в классических радиусах электрона. Для электронов, отраженных от лазерного пучка, существует закон отражения, связывающий углы падения и отражения. Этот закон универсален, т.е. не зависит ни от каких параметров заряженной частицы и лазерного пучка. Глубина проникновения отраженной заряженной частицы в лазерный пучок много меньше длины волны электромагнитной волны.

**В третьей главе** диссертации разрабатывается алгебраический подход к описанию стохастических систем. Автором впервые вводится понятие стохастической деформации классической системы. Данная процедура аналогична деформации алгебры наблюдаемых в процедуре деформационного квантования, но с мнимым параметром деформации ("постоянной Планка"). Параметр деформации характеризует дисперсию случайных сил, действующих на систему. Разработанный метод применен ко многим нерелятивистским и релятивистским моделям как с конечным, так и с бесконечным числом степеней свободы.

**В четвертой главе** изучаются свойства квантовых полей, находящихся в термодинамическом равновесии при конечной температуре и плотности. Квантовые поля считаются свободными, взаимодействие учитывается только через граничные условия и модификацию закона дисперсии. Закон дисперсии предполагается имеющим эллипсоидальную поверхность постоянной энергии. Такая постановка задачи характерна для описания электронов проводимости в кристаллах в рамках теории Ферми жидкости. Здесь впервые выводятся быстросходящиеся разложения однопетлевого омега-потенциала для разных значений параметров, характеризующих спектр. Описаны осцилляции термодинамического потенциала в зависимости от химического потенциала и размеров системы. Полученные в диссертации выражения являются более точными, нежели те, которые дает квазиклассическая теория осцилляций Лифшица-Косевича. В качестве примеров рассмотрены электроны проводимости в тонкой металлической пленке и в графене, для которых найдены явные выражения для омега-потенциала и периода осцилляций химического потенциала в зависимости от размеров кристалла.

**Пятая глава** посвящена описанию эффекта гравитационного сдвига масс за счет механизма Хиггса. Как известно, массы всех частиц стандартной модели генерируются при спонтанном нарушении симметрии с помощью механизма Хиггса. Значения масс частиц определяются значением ненулевого вакуумного среднего поля Хиггса. В диссертации впервые найдены квантовые поправки к эффективному потенциалу поля Хиггса на стационарном гравитационном фоне, которые приводят к изменению значения его вакуумного среднего. Это приводит к изменению масс всех массивных частиц стандартной модели. Далее автор обобщает полученный результат на случай слабо нестационарного гравитационного фона и полностью описывает данный эффект для случая шварцшильдовской черной дыры. Здесь особо следует отметить, что полученный автором в результате регуляризованный и перенормированный тензор энергии-импульса не имеет особенности на горизонте черной дыры.

**Шестая глава** начинается с построения теории дзета-функции волновых операторов на стационарном фоне общего вида, в частности, для нестатических метрик, и разрабатывается новая процедура вычисления однопетлевых поправок к эффективному действию как при нулевых, так и конечных температурах и плотностях. Впервые получена общая формула для высокотемпературного разложения однопетлевого омега-потенциала в пренебрежении экспоненциально подавленными поправками в случае стремящейся к нулю обратной температуры. Далее исследуются непертурбативные поправки в однопетлевое эффективное действие гравитации, индуцированные массивным скалярным полем на стационарном, медленно меняющемся в пространстве фоне. Показано, что эффективное действие зависит явным образом от выбора операторов рождения-уничтожения и определения нормального упорядочения. Эта зависимость проявляется в возникновении в эффективном действии дополнительной нединамической структуры – времениподобного векторного поля, задающего мгновенный гамильтониан квантовых полей. Факт зависимости корреляторов квантовой теории поля от выбора определения операторов рождения-уничтожения был известен в литературе. Наличие такого поля в эффективном действии приводит к непертурбативной квантовой гравитационной аномалии, т.е. в калибровке фонового поля ковариантная дивергенция метрического тензора энергии-импульса материи, следующего из эффективного действия, не равна тождественно (для произвольной метрики) нулю на решениях

квантовых уравнений движения полей материи. Данный факт также отмечался в литературе. Автором впервые разработана процедура сокращения этой гравитационной аномалии. В результате в теории возникает новое динамическое поле, по свойствам напоминающее холодную темную материю. Автор выдвигает гипотезу и приводит некоторые довольно убедительные доводы в пользу того, что эти новые степени свободы можно отождествить с холодной темной материей.

В изложении материалов диссертации можно отметить **следующие недостатки**:

1) Во второй главе диссертации автор использует понятие физического решения уравнения Лоренца-Дирака, однако обоснования использования именно таких решений этого уравнения не приводит.

2) В разделе 2.4. не проведено сравнение полученных выражений для спектральной плотности мощности излучения с известными результатами Ритуса и Никишова для излучения электронов в таких же полях, но без учета реакции излучения.

3) В разделе 6.6. при анализе линейной стабильности и унитарности квантовой гидродинамики исследование проведено не до конца: не выяснено, связана ли неотрицательность вклада соответствующей структуры в давление жидкости с обязательным наличием неустойчивости; также не проведен анализ для простых фоновых метрик, отличных от метрики Минковского.

4) В целом, диссертация написана ясным и грамотным языком. Однако, как это всегда случается с большими текстами, в работе встречаются некоторые недочеты. В частности,

– На стр. 42 в формуле (2.11) должен стоять знак «+» перед  $\omega^2$ ;

– На стр. 118 в первом предложении, которое звучит так «...через  $\mu$  и будем называть ее безразмерным химическим потенциалом» видимо потеряны слова.

– На этой же странице 118 дается ссылка на формулу (1.1), определяющую закон дисперсии. Формула занимает немного места, и для читателя было бы удобнее, если бы его не отсылали на две главы и на сто страниц назад, а воспроизвели формулу еще раз.

– На стр. 45 появляются обозначения  $a'$ ,  $a''$ . Из контекста ясно, что штрих – производная по аргументу. Однако, это следовало бы пояснить.

Отмеченные выше замечания и пожелания не снижают общую научную ценность, уровня и значимости полученных результатов. Диссертационная работа П.О. Казинского представляет собой законченное научное исследование, выполнением которого выделены новые направления в теории электродинамических процессов при движении частиц в интенсивных полях, в общей теории стохастических неравновесных систем и квантовой теории поля на искривленном фоне.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации. Все результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях, прошли необходимую апробацию на российских и международных конференциях, научных семинарах.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что представляемая к защите диссертационная работа удовлетворяет всем основным требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

#### **Официальный оппонент**

доктор физико-математических наук (диссертация защищена по специальности 01.04.02 – теоретическая физика), доцент, заведующий кафедрой теории относительности и гравитации Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета

Сушков Сергей Владимирович

Подпись С.В. Сушкова заверяю  
Директор Института физики КФУ



Никитин С.И.

Дата: 29.04.2016

#### **Адрес:**

420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»  
тел. +7(843) 2337109  
факс. +7(843) 2924448  
<http://kpfu.ru>  
e-mail: [public.mail@kpfu.ru](mailto:public.mail@kpfu.ru)