

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и инновационной деятельности
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет»,

доктор физико-математических наук, профессор

Ворожцов Александр Борисович

«10» ноября 2021 г.



Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Давыдова Андрея Семёновича
«Непертурбативные эффекты поляризации вакуума в условиях
кулоновской закритичности», представленную на соискание
учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика

Актуальность темы диссертации

Квантовая электродинамика (КЭД) сверхсильных полей предоставляет возможность теоретического изучения фундаментальных явлений квантовой теории поля и их последующей экспериментальной проверки. Особый интерес вызывает эффект распада нейтрального электрон-позитронного вакуума в сильных внешних кулоновских полях, приводящий к спонтанному рождению электрон-позитронных пар. При определенных условиях столкновения сверхтяжелых ионов дают возможность экспериментально реализовать эту ситуацию. Экспериментально обнаружены и теоретически описаны явления вынужденного образования позитронов при наличии быстро меняющегося во времени кулоновского поля сталкивающихся ионов и образования «ядерных» позитронов вследствие внутренней парной конверсии при кулоновском возбуждении ядер. Имеются явные доказательства быстрого роста энергии связи и сильной локализации орбиталей внутренней оболочки в системах сверхтяжёлых ионов.

Тем не менее, процесс спонтанного рождения электрон-позитронных пар из вакуума в квантовой электродинамике сверхсильных полей до сих пор нуждается в теоретических и экспериментальных исследованиях. В диссертационной работе рассматриваются основные характеристики поляризации вакуума (вакуумная плотность заряда/тока и вакуумная энергия) и на их основе делаются теоретические выводы о возможности спонтанного рождения электрон-позитронных пар. Также вопрос о критических зарядах атомных ядер важен для продолжения таблицы химических элементов Менделеева в область $Z > 170$ и описания строения (гипотетических) сверхтяжелых атомов.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Полный объем диссертации составляет 200 страниц с 42 рисунками. Список литературы содержит 105 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту. Указан личный вклад автора, апробация работы на конференциях и представлен список публикаций автора. Кратко изложена история вопроса критических полей и зарядов. Обоснован модельный подход к рассмотрению эффектов поляризации вакуума в 1+1- и 2+1-мерных КЭД системах в присутствии сверхсильных внешних кулоновских полей. Отдельно рассматривается задача исследования характеристик поляризации вакуума для 2+1-мерной закритической КЭД системы в магнитном поле с аксиальным векторным потенциалом.

Первая глава диссертации посвящена исследованию вакуумной плотности заряда и вакуумной энергии, которые являются основными характеристиками поляризации вакуума в сверхкритических КЭД системах, в 1+1-мерном случае. Рассматриваются два типа кулоновских потенциалов, обеспечивающих самосопряженность гамильтониана Дирака. Глава начинается с краткого литературного обзора, посвященного 1+1-мерным системам во внешних полях. Подробно изложены методы расчёта и обоснована необходимость перенормировки вакуумной плотности заряда и вакуумной энергии. Показано, что при соответствующих параметрах задачи нелинейные эффекты в закритической

области могут приводить к отличному от пертурбативного квадратичного роста поведению вакуумной энергии вплоть до (почти) квадратичного убывания вида в отрицательную область.

Во второй главе рассматриваются аналогичные эффекты поляризации вакуума в закритической области для модельной 2+1-мерной КЭД системы. На основе результатов, полученных в первой главе для вакуумной плотности заряда, подробно рассматривается расчет вакуумной энергии, основанный на перенормировке, сходимость парциального разложения для вакуумной плотности заряда и поведение интегрального наведенного заряда в закритической области. В частности, показано, что перенормировка вычитанием ведущего пертурбативного вклада устраняет расходимости в плотности заряда как в чисто пертурбативном, так и в существенно непертурбативном режимах. Расходящийся ведущий пертурбативный вклад регуляризуется и перенормируется стандартным образом. Наиболее значимый результат диссертации состоит в том, что в такой системе при закритических зарядах вакуумная энергия становится быстро убывающей функцией заряда источника, достигающей больших отрицательных значений. Исследована также зависимость эффекта убывания вакуумной энергии от обрезания кулоновской асимптотики внешнего поля на различных масштабах.

В третьей главе для планарной системы Дирака–Кулона со сверхкритическим протяженным аксиально-симметричным кулоновским источником в присутствии магнитного поля с аксиальным векторным потенциалом рассмотрены непертурбативные эффекты поляризации вакуума в закритической области. Исследовано поведение вакуумных плотностей заряда и тока. Основное внимание уделено расходимостям теории, соответствующей перенормировке и сходимости парциальных рядов. Подчеркнуто что, в отличие от вакуумной плотности заряда, для вычисления вакуумной плотности тока в присутствии локализованного внешнего магнитного поля необходимо учитывать парциальные каналы с большими значениями третьей проекции полного углового момента. Показано, что в присутствии закритического кулоновского источника наведенное магнитное поле при определенных значениях параметров внешнего векторного потенциала способно усиливать исходное магнитное поле.

В заключении перечислены основные результаты работы, выносимые на защиту.

В приложениях приведены подробный вывод потенциала поляризации вакуума в первом порядке теории возмущений (потенциал Юлинга), вычисление перенормированного вакуумного заряда в $2+1$ -мерной закритической КЭД системе и пример решения систем радиальных уравнений во внешних аксиально-симметричном кулоновском и аксиальном векторном потенциалах.

Научная новизна исследования

Впервые показано, что поведение вакуумной энергии в закритической области для одномерных и двумерных КЭД систем существенно отличается от пертурбативного квадратичного роста и вакуумная энергия становится быстро убывающей функцией заряда источника, достигающей больших отрицательных значений. Анализ вакуумной плотности заряда и вакуумной энергии, проведенный в диссертации, согласуется с предположением о превращении нейтрального вакуума в заряженный в сверхкритических внешних полях за счет спонтанного излучения вакуумных позитронов. Впервые исследовано поведение индуцированного магнитного поля в закритической двумерной КЭД системе во внешнем магнитном поле с аксиальным векторным потенциалом. Показано, что индуцированное магнитное поле способно усиливать исходное.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов

Обоснованность и достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается использованием строгих математических методов и методов квантовой теории поля. В диссертации приведены подробные выводы формул и доказательства сходимости бесконечных сумм. Выводы, сделанные в диссертации, основываются на результатах исследований основных характеристик поляризации вакуума: вакуумной плотности заряда / тока и вакуумной энергии.

Научная и практическая значимость

Рассмотренные эффекты поляризации вакуума для $2+1$ -мерного случая позволяют получить теоретические оценки для соответствующих эффектов в двумерных структурах, таких как графен и топологические изоляторы. Также возможно использование данных результатов для получения теоретических оценок

по достижимости критических зарядов и описания свойств закритической области в экспериментах по столкновению тяжелых ионов.

Оценка работы

Диссертация Давыдова А.С. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Представленные в диссертации результаты свидетельствуют об авторе как о квалифицированном исследователе, владеющем современными методами математической и теоретической физики и численными методами. В диссертации приведен подробный вывод формул и анализ полученных результатов. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 01.04.02 – Теоретическая физика. Автореферат полно и правильно отражает содержание работы, её результаты и выводы. Список цитируемой литературы соответствует содержанию. Полученные в диссертации результаты доложены на российских и международных конференциях и в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science, Scopus и RSCI.

Замечания по работе

1. В диссертационной работе подчёркивается, что «Как и в других работах по поляризации вакуума кулоновским полем ... вклад процессов с обменом виртуальными фотонами опускается (и все вакуумные диаграммы – однопетлевые)». Однако при рассматриваемых в диссертации значениях зарядов внешнего кулоновского источника, достигающих в отдельных главах значений порядка 1000, остаётся открытым вопрос о применимости этого предположения;

2. В гл. 2, стр. 59, обсуждается применение результатов, полученных в диссертации, к графену. В частности, указывается, что значение эффективной постоянной тонкой структуры в данном случае порядка единицы. Из текста диссертации не ясно, как в таком случае применять стандартную теорию возмущений, в частности, петлевое разложение, используемое в диссертации. Также не поясняется, почему для двумерных систем типа графена вакуумная энергия должна выбираться в S -симметричном виде, как в формуле (2.123), а не так, как это было предложено в оригинальной работе Гейзенберга-Эйлера (см. также Берестецкий, Лифшиц, Питаевский, Квантовая электродинамика);

3. В диссертации используется модель ядра в виде равномерно заряженной сферы и подчеркивается, что значения критических зарядов оказываются достаточно близкими со значениями, полученными для модели равномерно заряженного шара. Однако в диссертации эти результаты не приведены;

4. В обзоре литературы не полностью отражены результаты Д. М. Гитмана и С. П. Гаврилова, касающиеся определения понятия частицы и античастицы в сверхкритических электромагнитных полях. Более того, в диссертации не приведено ссылок на работы А. Б. Мигдала, в которых указаны многие физические выводы, обсуждаемые в диссертации. Также в диссертации нет ссылок на относительно недавнюю диссертацию по схожей теме (N. Szpak, Spontaneous particle creation in time-dependent overcritical fields in QED, PhD thesis, Frankfurt, J.W. Goethe University, 2005), где подробно рассматривается проблема перестройки фермионного вакуума в сверхсильных электромагнитных полях;

5. Из текста диссертации не ясно, каким контрчленам, добавленным в исходное действие (гамильтониан), соответствует рассматриваемая в диссертации перенормировка, являются ли эти контрчлены локальными и полиномиальными по полям (фермионным и электромагнитным) и перенормируемыми по индексу, как это требуется в перенормируемой КТП;

6. Текст диссертации содержит дословные повторы (ср., например, параграф на стр. 38 после формулы (1.56) и параграф на стр. 103 после формулы (2.123)).

Сделанные замечания не затрагивают защищаемых положений и не оказывают значительного влияния на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертационная работа «Непертурбативные эффекты поляризации вакуума в условиях кулоновской закритичности» полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с пп. 9–11, 13, 14 действующего Положения о присуждении учёных степеней, а её автор – Давыдов Андрей Семёнович – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Отзыв составил профессор кафедры квантовой теории поля физического факультета Томского государственного университета, доктор физико-

математических наук (01.04.02 – Теоретическая физика), доцент Казинский Пётр Олегович.

Отзыв на диссертацию А. С. Давыдова был обсуждён и одобрен на объединённом научном семинаре кафедры теоретической физики и кафедры квантовой теории поля физического факультета Томского государственного университета 08 ноября 2021 года, протокол № 5(1490).

Главный научный сотрудник лаборатории теоретической и математической физики, заведующий кафедрой квантовой теории поля Томского государственного университета, доктор физико-математических наук (01.04.02 – Теоретическая физика), профессор

Ляхович Семён Леонидович

С.Л. Ляхович

Заведующий кафедрой теоретической физики Томского государственного университета, доктор физико-математических наук, (01.04.02 – Теоретическая физика), профессор



СПЕЦИАЛИСТ ПО КАДРАМ
1 КАТ. ОТДЕЛА КАДРОВ

О.В. Чеснокова
10.11.2021

Шаповалов Александр Васильевич

Шаповалов Александр Васильевич утверждено
10.11.2021

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

СПЕЦИАЛИСТ ПО КАДРАМ
1 КАТ. ОТДЕЛА КАДРОВ

О.В. Чеснокова

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; (3822) 52-98-52, rector@tsu.ru, ww.tsu.ru

