

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**Концепция физического вакуума  
в классической и квантовой электродинамике**  
АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 2222 группы  
направления подготовки 03.04.02 «Физика» Института физики  
Будко Ольги Андреевны

Научный руководитель,  
д.ф.-м.н., профессор

С. А. Смолянский

Заведующий кафедрой  
д.ф.-м.н., профессор

В. М. Аникин

Саратов 2022

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В настоящее время реальность физического вакуума надежно установлена в четырех группах лабораторных экспериментов (лэмбовский сдвиг, аномальный магнитный момент, эффект Казимира, эффект Ааронова-Бома).

Теоретически надежно обоснован эффект Заутера-Швингера вакуумного рождения частиц в сильных полях, сравнимых по напряженности с критическими полями Швингера: по электрическому полю  $E_c = \frac{m^2 c^2}{e\hbar} \sim 10^{16} \frac{\text{В}}{\text{см}}$  и по магнитному полю.

В фокусных пятнах встречных лазерных пучков на современных сверхмощных лазерных установках пока достигнуты электрические поля, на два порядка меньшие критического поля Швингера.

Судьба эффекта Унру (вакуумное рождение частиц в ускоренно движущихся системах отсчета) остается пока неясной даже на уровне корректного теоретического обоснования.

С другой стороны, уже хорошо исследованные особенности физического вакуума представляются как весьма неожиданные и трудны для понимания с позиций повседневного опыта (проблема инвариантности физического вакуума, проблема космологической константы).

**Цель выпускной квалификационной работы (ВКР)** сделана попытка систематизировать современные сведения о физическом вакууме, ограничиваясь на начальном этапе случаем классической электродинамики. Это обусловлено тем, что некоторые проявления физического вакуума в квантовой электродинамике (эффекты Ааронова-Бома и Унру) основаны на некоторых особенностях классической электродинамики.

**Структура ВКР.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы (40 наименований). Общий объем – 50 с.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Глава 1** ВКР работы посвящена краткому изложению современных представлений о структуре пространства-времени и геометрических структурах, допустимых в рамках различных геометрий, используемых для описания физических систем. Центральное место здесь занимают частный и общий принципы ковариантности, накладывающие жесткие ограничения на возможные классы физических теорий. Этим ограничениям должны удовлетворять и современные модели физического вакуума.

В качестве примера в **Главе 2** рассмотрены некоторые особенности уравнений Максвелла классической электродинамики, записанных в различных системах единиц, различным образом отображающих присутствие физического вакуума. В современной гауссовой системе единиц это присутствие минимизировано до скорости света как универсальной скорости распространения электромагнитного сигнала в вакууме.

**В Главе 3** перечислены основные постулаты ортодоксальной квантовой теории без анализа их полноты и непротиворечивости (Раздел 3.1.). В этот перечень включено и многочастичное обобщение квантовой теории. Раздел 3.2. посвящен краткому изложению представления чисел заполнения в нерелятивистской квантовой теории многих частиц. Такой выбор обусловлен важностью этого формализма в квантовой теории поля. Например, здесь вводится математическое определение вакуумного состояния.

При изложении квантовой электродинамики (КЭД) **в Главе 4** основное внимание уделено получению интегрального уравнения Дайсона для электродинамических функций Грина. В трактовке, основанной на теории возмущений, этот формализм содержит основные особенности КЭД: представления о свободных и реальных частицах и их трансформациях, дрожащем движении и т.д..

**Глава 5** посвящена теории двух групп квантовоэлектродинамических эффектов (лэмбовскому сдвигу в атоме водорода и эффекту Казимира), надежно подтвержденным экспериментально. Изложение теории лэмбовского сдвига проведено на основе упрощенного и более наглядного варианта Велтона. Некоторые важные особенности теории этих эффектов приведены в разделе 5.4.

## ВЫВОДЫ

В ВКР дан краткий обзор современных представлений о свойствах пространства-времени, включая обсуждение его возможной римановой структуры, а также особенностей физического вакуума, начиная от концепции мирового эфира и заканчивая наиболее важными современными результатами в квантовой электродинамике, получившими надежное экспериментальное подтверждение (лэмбовский сдвиг и эффект Казимира).

Таким образом, в настоящей работе рассматриваются свойства физического вакуума в рамках квантовой теории поля, основанной исключительно на концепции псевдоевклидова пространства-времени Минковского. В таком варианте теории пространство-время является независимой от материи сценой, на которой эволюционируют квантовополевые системы.

С другой стороны, специфика физического вакуума состоит в том, что он заполняет всё пространство-время с одинаковой плотностью также независимо от существования наблюдаемых физических полей и частиц, хотя динамика физического вакуума нуждается для своего описания во введении пространство-временной сцены. С этой существенной отговоркой можно говорить о универсальности физического вакуума и его независимости от наблюдаемой материи, что вполне подобно аналогичным свойствам пространства-времени. Эта близость двух основных концепций современной физики может служить основанием для поиска некоторой более фундаментальной концепции, которая, возможно, основана на более глубоком уровне прегеометрии. Такие поиски существуют давно, но они неоднозначны и не получили пока достаточного развития.

Проведенное последовательное изложение основ классической и квантовой электродинамики с предшествующим ему анализом постулатов, ограничивающих конструкцию псевдоевклидова и псевдориманова пространств событий, позволяет также сделать вывод о их связи с физическим вакуумом.

Если исходить из понимания скорости света как фундаментальной постоянной физического вакуума (Главы 1 и 2), то такая связь становится очевидной. Эта зависимость распространяется и на геометрические структуры, конструируемые на пространствах-носителях (Глава 1). Общий принцип ковариантности провозглашает универсальность такой зависимости без связи с условиями существования материи, включая экстремальные условия в сверхсильных электромагнитных и гравитационных полях. Здесь уместно отметить, что такая универсальность коррелирует с "постоянством космологической постоянной", что, возможно, связано с какими-то фундаментальными свойствами физического вакуума.

### Список использованной литературы

1. Г.Е. Горелик. Размерность пространства. М.: Изд: МГУ (1983).
2. А.М.Мостепаненко, М.В.Мостепаненко. Четырехмерность пространства и времени. Изд: Л.: Наука (1966).
3. С.Хокинг, Дж.Эллис. Крупномасштабная структура пространства времени. М.: Мир (1977).
4. А.П. Норден. Пространства аффинной связности. М. – Л.: Гос. Изд. техникотеоретической литературы (1950) .
5. П. К. Рашевский. Риманова геометрия и тензорный анализ. М.: Наука (1964).
6. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теория поля. М.: Наука (1973).
7. Дж. Андерсен. Риманова геометрия. – в сборнике «Гравитация и относительность», ред. Х. Цзю и В. Гоффман. «Гравитация и относительность.» М.:Мир (1965).
8. К.Мёллер. Теория относительности. М.: Атомиздат (1975).
9. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. - М.: Наука (1982).
- 10.S.R de Groot., L.G Suttorp. Foundations of electrodynamics. Amsterdam:North-Holland (1972).
- 11.И.Е. Тамм. Основы теории электричества. М.: Гос. изд. Техникотеоретической литературы (1954).
- 12.C. Meis. Light And Vacuum. Singapore : World Scientific (2015).
- 13.Э. Уиттекер. История теории эфира и электричества. Ижевск. Изд: «Регулярная и хаотическая динамика» (2001).
14. А.М. Поляков. Калибровочные поля и струны. Ижевск. Изд: «Регулярная и хаотическая динамика» (1999).
15. А.А. Славнов. Л.Д Фаддеев. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. М.:Наука (1988).
16. А. Einstein, Ann. d. Phys. 49,769 (1916). (А. Эйнштейн, Собрание научных трудов. М.: Наука (1967)). 49
17. И.фон Нейман. Математические основы квантовой механики. М.: «Наука» (1964).
18. Дж. Макки. Лекции по математическим основам квантовой механики. М.: «Мир» (1965).

19. В.Г. Лапчинский, В.А. Рубаков. Препринт. П-0051 Института ядерных исследований АН СССР. М. (1977) .
20. А.С. Давыдов. Квантовая механика. М.: «Наука» (1973).
21. Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков. Введение в теорию квантованных полей. М.: ИЛ Наука (1976).
22. С. Швебер. Введение в релятивистскую квантовую теорию поля. (1963).
23. В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Квантовая электродинамика. М.: Наука (1980).
24. Т. Welton. Phys.Rev. 74, 1157(1948); русский перевод в сборнике «Вопросы причинности в квантовой механике». М.: ИЛ (1955).
25. А. Зоммерфельд. Строение атома и спектры. т. II. М.: ГИТТЛ (1956).
26. А.А. Гриб, С.Г. Мамаев, В.М. Мостепаненко. Вакуумные квантовые эффекты в сильных полях. М.: Энергоатомиздат (1988).
27. Л.В. Келдыш. ЖЭТФ, 47, 1515 (1964).
28. L. V. Keldysh, в «Progress in Nonequilibrium Green's Functions», II, World Scientific, New Jersey – London – Singapore – Hong Kong (2003).
29. F. J. Dyson, Phys.Rev. 75, 1936(1946); (перевод в сборнике «Новейшее развитие квантовой электродинамики». М.: ИЛ (1954).
30. В.Г. Левич, Ю.А. Вдовин, В.А. Мямлин. Курс теоретической физики: т.П. М.: Физ – Мат. Лит. (1962).
31. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теория поля. М.: Наука (1973).
32. В.Г. Пальчиков, Ю.Л. Соколо, В.П. Яковлев. Письма в ЖЭТФ, 38, 349 (1983).
33. Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков. Квантовые поля. М.: Наука (1980).
34. Л.Н. Лабзовский. Теория атома. Квантовая электродинамика электронных оболочек и процессы излучения. М.: Наука (1996), - ISBN 5 – 02 – 015016 – 9. 50
35. E.A. Hildum et al. Phys. Rev. Lett. 56, 576 (1986).
36. D.V. Blaschke, V.V. Dmitriev, N.T. Gevorgyan, B. Mahato, A.D. Panferov, S.A. Smolyansky, V.A. Tserypa, arXiv: 2201.10594.
37. С.Г. Мамаев, Н.Н. Трунов, ЯФ, 39, 1301 (1979).
38. К. Ициксон, Ж. - Б. Зюбер. Квантовая теория поля. т. I. М.: «Мир» (1984).
39. M. B. U. Mohideen, G. L. Klimchitskaya, V. M. Mostepanenko, Advances in the Casimir Effect «Oxford. University Press» (2009).
40. Дж. Барроу, П. Дэвис., Ч. Харпер. (мл). Наука и предельная реальность. М.- Ижевск (2013).