

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

Институт физики
Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**КИНЕТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ
ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВАКУУМНОГО РОЖДЕНИЯ КВАРКОВ
В СИЛЬНЫХ ГЛЮОННЫХ ПОЛЯХ**

АПВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ
студента 4 курса 4022 группы
направления 03.03.02 «Физика» Института физики
Сапарева Эльдара Рамилевича

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

С. А. Смолянский

Заведующий кафедрой
общей, теоретической
и компьютерной физики
профессор, д.ф.-м.н.

В.М. Аникин

Саратов
2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Тема ВКР соответствует одному из направлений физики высоких энергий, изучающему вакуумное рождение частиц под действием сильных квазиклассических полей различной природы. В первую очередь здесь нужно упомянуть рождение электрон-позитронной плазмы в электромагнитных полях с околоритической напряженностью электрического поля $E \sim E_c \sim 10^{16}$ В/см. Здесь наблюдается наибольший прогресс в развитии теории эффекта и планируются эксперименты по его обнаружению и исследованию. Подобный эффект был предсказан теоретически и обнаружен экспериментально в графене, где массы носителей заряда ничтожно малы по сравнению с массой электрона, что приводит к ситуации, когда любое сколь угодно малое электрическое поле является сверхкритическим.

Процессы вакуумного рождения частиц всего спектра масс изучаются в ранней космологии и физике черных дыр. Вакуумная генерация партонов является единственным механизмом, обеспечивающим высокую множественность рождения всего спектра вторичных частиц в процессе соударения тяжёлых ионов высоких энергий. Здесь является общепринятой модель, в которой нуклонная ядерная материя “родительских” тяжелых ядер при лобовом столкновении быстро коллективизируется и приводит к образованию первоначального сгустка кварк-глюонной плазмы (КГП), которая в ходе дальнейшего расширения генерирует сильные глюонные поля, которые генерируют их вакуума “дочернюю” КГП, которая в ходе дальнейшего расширения охлаждается и адронизируется в процессе релятивистского фазового перехода, что и приводит в результате разлёта к богатым спектрам вторичных частиц, доступных экспериментальной регистрации.

Настоящая работа посвящена построению на динамической основе простейшего варианта модели для описания вакуумного рождения кварков в сильных квазиклассических глюонных полях, генерируемых на начальной стадии деконфайнмента при столкновении ультрарелятивистских тяжёлых ионов. Простейший вариант такой теории (приближение абелевой проекции квантовой хромодинамики (КХД)) был предложен в работах саратовской группы физиков-теоретиков (С.А. Смолянский, А.В. Прозоркевич, Д.В. Винник) в коллаборации с профессором В.Д. Тонеевым и группой физиков из университета города Росток, Германия (С. Шмидт, Д. Б. Блашке). В последующий годы этот непертурбативный кинетический подход был детально изучен и обобщён в рамках квантовой электродинамики (КЭД) сильных полей. Более простой оказалась адаптация этого подхода к безмассовой модели графена, где расширенный вариант теории, включающий учёт взаимодействия с квантовым электромагнитным полем, приводит к качественному согласию с экспериментальными результатами по излучению электромагнитного поля.

Целью ВКР является непертурбативное построение на динамической основе КХД кинетической теории в кварковом секторе КХД в модели пространственно однородных калибровочных полей (электромагнитного и глюонного). Ожидается, что полученная в результате система кинетических уравнений (КУ) для кварковой подсистемы в совокупности с уравнениями Максвелла для электрического поля, индуцированного движением КГП, и нелинейными уравнениями типа Максвелла отно-

сительно мультиплета глюонных полей позволит, в принципе, впервые корректно описать нелинейную самосогласованную эволюцию КГП до момента начала релятивистского фазового перехода в состояние (сильно неравновесное) адронной материи без привлечения каких-либо дополнительных модельных предположений. В качестве начальных условий выбираются условия, описывающие состояние ядерной материи сталкивающихся тяжелых ионов в момент деконфайнмента. Таким образом, ожидается, что основным результатом дипломной работы будет построение на динамической основе замкнутой кинетической теории самосогласованной эволюции КГП с учётом совместного действия электрического и цветового полей, способных породить из вакуума КГП в количестве, достаточном для формирования наблюдаемой множественности и состава вторичной материи.

Структура выпускной квалификационной работы отражает задачи, которые решались в процессе ее выполнения. ВКР состоит из введения, шести разделов, заключения, списка используемой литературы, содержащего двадцать наименований, а также двух приложений.

В разделе 1 описаны основания квантовой хромодинамики.

Раздел 2 посвящён процедуре квадрирования исходного уравнения Дирака.

Раздел 3 включает в себя поиск динамической основы для модели.

В 4 разделе осуществляется переход в квазичастичное представление.

Раздел 5 описывает динамику в квазичастичном представлении.

Раздел 6 содержит в себе конечную систему кинетических уравнений.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы ВКР.

Приложения 1 и 2 содержат условие ортонормировки и уравнения движения в квазичастичном представлении в квантовой электродинамике.

Научная новизна: построение элементов кинетической теории вакуумного рождения кварков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Согласно современному пониманию при соударении ультрарелятивистских тяжелых ядер их ядерная материя сливается и в ней полностью освобождаются кварк-глюонные степени свободы. То есть получается кварк-глюонная плазма (КГП). Число кварков в такой плазме очень невелико, если учесть, что в одном нуклоне содержится три кварка не трудно подсчитать общее число кварков в момент слияния ядер. Оно будет равно $3 * 2 * N$, где N - это число нуклонов в одном ядре.

Например, для урана число кварков, содержащихся в сталкивающихся ядрах — порядка 1000. После слияния ядер и образования КГП происходит ее расширение, которое сопровождается появлением сильных электромагнитных и глюонных полей. Затем по мере охлаждения КГП расширяется и происходит ее адронизация. Образовавшиеся мезоны, нуклоны, нейтрино и т.д. разлетаются и могут быть зарегистрированы. На эксперименте оказывается, что число таких вторичных частиц порядка 10^6 . Таким образом число кварков возрастает с 1000 до 10^6 . Возникает проблема объяснения множественности рожденных кварков по сравнению с их количеством в начальный момент времени [1].

Согласно идеи Кашера (1979) и других во время расширения КГП происходит энергичное вакуумное рождение кварков, которое обеспечивает высокую множественность кварков в конечном состоянии. Отсюда следует цель работы, упомянутая ранее. При этом мы используем опыт в получении аналогичных систем КУ в КЭД и в графене, где соответствующие КУ были получены ранее в работах Смолянского, Блашке и др [2],[3],[4].

Вывод системы КУ производился по следующей схеме:

1. Исходное уравнение Дирака для кварков в полях.
2. Квадрированное уравнение.
3. Уравнение осцилляторного типа.
4. Переход к квазичастичному представлению.
5. Введение одночастичных корреляторов.
6. Система кинетических уравнений (КУ).

Результирующая система интегро-дифференциальных уравнений относительно функций распределения кварков ($f_k(\bar{p}, t)$) и антикварков ($\tilde{f}_k(\bar{p}, t)$), не связанных в рассматриваемой ситуации условием электронейтральности, имеет вид:

$$\dot{f}_k(\bar{p}, t) = 2\lambda_k(\bar{p}, t) \int_{t_0}^t dt' \lambda_k(\bar{p}, t') [1 - f_k(\bar{p}, t') - \tilde{f}_k(\bar{p}, t')] \cos 2\theta_k(t, t'),$$

$$\dot{\tilde{f}}_k(\bar{p}, t) = 2\lambda_k(\bar{p}, t) \int_{t_0}^t dt' \lambda_k(\bar{p}, t') [1 - f_k(\bar{p}, t') - \tilde{f}_k(\bar{p}, t')] \cos 2\theta_k(t, t').$$

где

$$f_k(\bar{p}, t) = \langle \tilde{a}_k^{(+)}(\bar{p}, t) \tilde{a}_k^{(-)}(\bar{p}, t) \rangle,$$

$$\tilde{f}_k(\bar{p}, t) = \langle \tilde{b}_k^{(+)}(-\bar{p}, t) \tilde{b}_k^{(-)}(-\bar{p}, t) \rangle,$$

$$\theta_k(\bar{p}, t, t') = \int_{t_0}^t dt' \Omega_k(\bar{p}, t'),$$

$$\lambda_k^{(\pm)} = \lambda_k^{(e)} + \Lambda_k^{(\pm)} = \lambda_k,$$

$$\lambda_k^{(e)}(\bar{p}, t) = \frac{e_k E(t) \mathcal{E}_{\perp k}}{2\mathcal{E}^2(\bar{p}, t)},$$

$$\Lambda_k^{(\pm)}(\bar{p}, t) = -\frac{B\dot{B}}{6\mathcal{E}_k \mathcal{E}_k^2} \left(1 \pm \frac{P_k}{2\mathcal{E}_k} \right)$$

Здесь $\lambda_k(\bar{p}, t)$ – эффективная амплитуда вакуумного возбуждения. Фаза

$$\theta_k(\bar{p}, t, t') = \int_{t_0}^t dt' \Omega_k(\bar{p}, t')$$

определяется через эффективную квазиэнергию $\varepsilon_k(\bar{p}, t)$, а $\lambda_k(\bar{p}, t)$ – эффективная амплитуда вакуумного возбуждения. Обе характеристические функции $\Omega_k(\bar{p}, t)$ и $\lambda_k(\bar{p}, t)$ определяются плазменными электрическим и глюонным полями, генерируемыми кварковыми токами.

Кинетические уравнения должны быть дополнены начальными распределениями кварков и антикварков в момент $t = t_0$. Как правило, $t_0 \rightarrow -\infty$.

Эффективность КУ можно оценить, сравнивая число степеней свободы в исходном уравнении Дирака:

$$N_{\text{Дирака}} = D \cdot S \cdot 2 \cdot 3 = 48,$$

где $D = 3 + 1$ – размерность пространства-времени, $S = 2$ – спин, 2 – число состояний с +/- энергией, 3 – число ароматов кварков.

В системе кинетических уравнений число степеней свободы дается величиной

$$N_{\text{КУ}} = 2 \cdot 3 = 6,$$

где: 2 – число состояния с +/- энергией, 3 – число ароматов кварков.

Это означает, что число уравнений сокращается в 8 раз!

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В выпускной квалификационной работе на непертурбативной динамической основе построена последовательная кинетическая теория вакуумного рождения кварков под совокупным действием сильных зависящих от времени электрического и глюонного полей, генерируемых встречными потоками валентных кварков, сталкивающихся ультрарелятивистских тяжёлых ионов. Итогом построения является система КУ для всех ароматов кварков, записанная в терминах одночастичных функций распределения кварков.

Работа ограничена начальным анализом перечисленного круга проблем и не затрагивает ни анализа полученной системы кинетических уравнений, ни формулировки *back reaction problem*, ни изучения особенностей эволюции кварк-глюонной плазмы, генерируемой на ранней стадии её эволюции.

Список использованных источников

1. Индурайн Ф. Квантовая хромодинамика. М.: Мир. 1986.
2. Smolyansky S.A., Panferov A.D., Blaschke D.B., Gevorgyan N.T. Kinetic Equation Approach to Graphene in Strong External Fields // Particles 3, 456, 2020.
3. Blaschke D.B., Dmitriev V.V., Gevorgyan N.T., Mahato B., Panferov A.D., Smolyansky S.A, Tseruyura V.A. Approximate Solutions of a Kinetic Theory for Graphene. Электронный ресурс. URL: <https://arxiv.org/pdf/2201.10594>
4. Fradkin E.S., Gitman D.M. , Shvartsman S.M. Quantum Electrodynamics with Unstable Vacuum. Berlin: Springer-Verlag, 1991.