

ФИЛАТОВ Андрей Викторович

ВАКУУМНОЕ РОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
ЛАЗЕРНОГО ПОЛЯ И ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ ИХ  
МАССЫ

01.04.05 – оптика

01.04.02 – теоретическая физика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2008

Работа выполнена на кафедре теоретической и математической физики Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Смолянский Станислав Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Мельников Леонид Аркадьевич  
доктор физико-математических наук,  
профессор Веницкий Сергей Ильич

Ведущая организация: Самарский государственный университет

Защита состоится 4 декабря 2008 г. в 15<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 при Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского (410012, Саратов, Астраханская, 83, корп. III, ауд. 34)

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета

Автореферат разослан

Ученый секретарь  
диссертационного совета, д.ф.-м.н.



В.М. Аникин

## Актуальность темы.

Эффект Швингера<sup>1</sup> вакуумного рождения пар частиц-античастиц под действием электромагнитного поля является одним из наиболее интересных непертурбативных эффектов квантовой электродинамики, который до сих пор не проверен экспериментально. Для наблюдения этого эффекта необходимы огромные напряженности электрического поля ( $E \sim E_c = 1,3 \cdot 10^{16}$  Вт/см для электронов в случае постоянного поля). С другой стороны роль этого эффекта в современной физике (релятивистской ядерной физике, астрофизике и космологии) очень велика.<sup>2</sup> Именно поэтому эффекты рождения частиц в полях различной природы постоянно привлекают внимание исследователей.

В последнее время обсуждается возможность наблюдения эффекта Швингера в нестационарных полях лазеров как рентгеновского, так и оптического диапазонов.

В связи с быстрым развитием технологий построения сверхмощных лазеров открывается совершенно новая перспектива использования лазеров на стыке физики высоких энергий, лазерной физики и оптики. С их помощью предполагается конструирование новых типов ускорителей элементарных частиц с недоступными ранее характеристиками. Идея использования лазерных полей для ускорения заряженных частиц впервые была предложена в 60-х годах XX века<sup>3</sup>. Наибольших практических результатов к настоящему моменту достигли методы ускорения, использующие взаимодействие лазерного луча с плазмой. В недавних экспериментах в лаборатории SLAC, использующих идею ускорения частиц в плазме «кильватерным» полем, было показано, что наличие плазмы, приготовленной особым способом при помощи зондирующего лазерного импульса, может приводить к существенному ускорению частиц. Другой способ плазменного ускорения связан с взаимодействием лазерных лучей с твердыми мишенями. Подобные схемы могут получить широкое применение в самых разных областях науки: от управляемого термоядерного синтеза и экспериментов по исследованию кварк-глюонной плазмы до медицинских приложений.

Ожидается, что основным преимуществом ускорителей, основанных на новых технологиях, использующих современные сверхмощные лазеры, являются их малые размеры, относительно малая стоимость и достаточно

<sup>1</sup>Schwinger J. // Phys. Rev. 1951. V. 82. P.664.

<sup>2</sup>Гриб А.А., Мамаев С.Г., Мостепененко В.М. Квантовые эффекты в интенсивных внешних полях. М.: Энергоатомиздат. 1988.

<sup>3</sup>Shimoda K. Proposal for an electron accelerator using an optical maser // Appl. Opt. 1962. V. 1. P.33.

небольшие затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание. Это позволит проводить исследования с использованием пучков ускоренных частиц, например, в медицинских исследованиях при лечении различных заболеваний с помощью пучков протонов высокой энергии не только в крупных научных центрах, но и в сравнительно небольших исследовательских институтах.

Также была высказана идея использования мощных оптических лазеров для модернизации уже существующих ускорителей. Одним из лучших действующих в настоящее время ускорителей тяжелых ионов является установка Нуклотрон в Объединенном Институте Ядерных Исследований. Она способна ускорять ионы золота до энергий  $\sim 4$  ГэВ/нуклон, которой оказывается недостаточно для проведения исследования таких фундаментальных состояний материи, как кварк-глюонная плазма.

Системы в которых масса частиц является переменной достаточно распространены. Механизм Хиггса приводит к наиболее известным моделям такого рода, когда соответствующие средние поля зависят от времени. Рассматриваются также общие модели теории квантованных полей с неполиномиальными взаимодействиями, в которых выделение нестационарных средних полей приводит к зависящей от времени массе<sup>4</sup>. Известным примером такого случая является модель Witten – Di Vecchia – Veneziano<sup>5</sup>. Модель Nambu – Jona-Lasinio<sup>6</sup> и  $\sigma$  модель<sup>7</sup> являются другими примерами, в которых массы мезонов, определяемые эволюцией кваркового конденсата. Масса частиц может зависеть от многочастичных взаимодействий в плотной и горячей нестационарной материи<sup>8</sup>. Зависимость массы от поля оказывается основным фактором, определяющим эволюцию во всех перечисленных случаях. Конформная инвариантность скалярно-тензорной теории гравитации обеспечивает изменение массы частиц при помощи конформного множителя<sup>9</sup>. Масса может изменяться также благодаря параметризации, обусловленной дополнительными пространственными размерностями<sup>10</sup>.

---

<sup>4</sup> Smolyansky S.A., Skokov V.V., Prozorkevich A.V. Kinetic Theory of the Quantum Field Systems with Unstable Vacuum // PEPAN Lett. 2005. V. 2. P. 50-60; ArXiv:hep-th/0310073.

<sup>5</sup> Veneziano G. U(1) Without Instantons // Nucl. Phys. B. 1979. V. 159. P. 213-224.

<sup>6</sup> Nambu Y., Jona-Lasinio G. Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity. I // Phys. Rev. 1961. V. 122. P. 345-358.

<sup>7</sup> Koch V. Aspects of Chiral Symmetry // Int. J. Mod. Phys. E. 1997. V. 6. P. 203-250; ArXiv:nucl-th/9706075.

<sup>8</sup> Pisarski R. Phenomenology of the Chiral Phase Transition // Phys. Lett. B. 1982. V. 110. P. 155-158.

<sup>9</sup> Blaschke D.B., Vinitzky S.I., Gusev A.A., Pervushin V.N., Proskurin D.V. Cosmological Production of Vector Bosons and Cosmic Microwave Background Radiation // Phys. Atom. Nucl. 2004. V. 67. P. 1074-1086.

<sup>10</sup> Slavnov A.A. Renormalizable Electroweak Model Without Fundamental Scalar Mesons // ArXiv:hep-th/0601125.

Целью диссертационной работы является исследование вакуумного рождения пар в сильных лазерных полях в присутствии начальной бесстолкновительной плазмы и развитие кинетической теории рождения частиц с динамически изменяющейся массой.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается использованием строгих математических методов, воспроизводимостью в численных экспериментах и хорошей согласованностью между собой и с результатами других авторов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Получены и исследованы кинетические уравнения, описывающие вакуумное рождение электрон-позитронных пар в поле циркулярно поляризованной волны, распространяющийся в бесстолкновительной плазме.
- Впервые показана возможность дополнительного лазерного ускорения тяжелых ионов на выходе существующих ускорителей для достижения энергий, соответствующих при столкновении фазовому переходу из адронного состояния материи в состояние кварк-глюонной плазмы.
- Исследовано влияние начальных распределений состояния бозонных и фермионных систем на процесс вакуумного рождения пар в зависящем от времени электрическом поле. Выполнены модельные расчеты, имитирующие рождение кварк-глюонной плазмы с параметрами, соответствующими ускорителю LHC.
- На основе осцилляторного представления получены кинетические уравнения, описывающие процессы вакуумного рождения частиц с переменной массой для случаев скалярных, спинорных и массивных векторных полей.
- Выполнены численные исследования кинетических уравнений, как для модельных условий, так и для условий, соответствующих реальным физическим системам. Изучены особенности вакуумного рождения частиц в космологических моделях, описывающих развитие ранней Вселенной с различными фоновыми уравнениями состояний. Проведено исследование связанных систем  $\pi$ - и  $\sigma$ -мезонов

при фазовом переходе из состояния кварк-глюонной плазмы в адронную материю.

## Теоретическая и практическая значимость результатов

- Изучены общие закономерности, возникающие при учете начального состояния плазмы в задаче о вакуумном рождении частиц. Это расширяет возможности кинетического описания взаимодействия сильных лазерных полей с веществом.
- Развита общий подход к описанию динамики вакуумного рождения частиц с переменной массой для скалярных, спинорных и векторных квантованных полей.
- Полученные оценки возможности дополнительного ускорения тяжелых ионов с помощью оптических лазеров следующего поколения могут быть полезны при модернизации действующих ускорителей.

### Апробация результатов.

Основные результаты диссертации были представлены на научных семинарах кафедры теоретической и математической физики СГУ, а также на конференциях и научных школах: семинарах "Saratov Fall Meeting", Саратов, 2005, 2006, 2007; Научной школе "Dense Matter In Heavy Ion Collisions and Astrophysics", Дубна, 2006; конференциях "The XVIII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems *Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics*", Дубна, 2006; "Complex Systems of Charged Particles and their Interaction with Electromagnetic Radiation", Москва, 2007, 2008; семинаре "Избранные вопросы физики экстремальных состояний материи", Саратов, 2007; международной школе-конференции "Nuclear theory and astrophysical applications", Дубна, 2007.

Личный вклад автора включает участие в построении и развитии кинетических подходов описания вакуумного рождения пар частиц-античастиц, программную алгоритмическую реализацию на ЭВМ разработанных методов.

### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. В ней содержится 90 страниц текста, 38 рисунков, библиография, включающая 190 наименований. Общий объем диссертации состоит

**Положения и результаты**, выносимые на защиту:

1. Влияние начального распределения частиц на динамику их вакуумного рождения под действием внешнего электрического поля: в зависимости от статистики и плотности начальной плазмы может наблюдаться как усиление, так и ослабление эффекта рождения. Для функции распределения частиц, подчиняющихся статистике Ферми–Дирака, существует устойчивая неподвижная точка, в которой рождение полностью прекращается.
2. Воздействие импульса оптического лазера с интенсивностью поля порядка  $\sim 10^{25}$  Вт/см<sup>2</sup> достаточно для увеличения энергии тяжелых ионов на выходе ускорителя типа Нуклотрон (ОИЯИ г. Дубна) до уровня, позволяющего наблюдать фазовый переход адронной материи в кварк-глюонную плазму.
3. При ускорении пучков тяжелых ионов с помощью импульсов сверхмощных лазеров схема с линейной поляризацией электромагнитного поля является более эффективной по сравнению со схемой с циркулярно поляризованным лучом.
4. Система кинетических уравнений для описания динамики вакуумного рождения частиц с переменной массой для скалярных, спинорных и массивных векторных квантовых полей.
5. Существование незатухающих вакуумных осцилляций давления в системе частиц с переменной массой генерируемых под действием инерционного механизма.

**КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении дана общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследования, положения и результаты, выносимые на защиту, раскрывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных в диссертации результатов и кратко представляется содержание работы.

Первая глава посвящена исследованию эффекта вакуумного рождения частиц под действием переменных внешних полей (например, электромагнитных полей современных сверхмощных лазеров) с учетом начального распределения частиц. Изучается эффект дополнительного ускорения пучков ионов тяжелых элементов при помощи лазерных импульсов

и проводится оценка влияния возможного вакуумного рождения частиц на величину прироста энергии ионов.

В разделе 1.2 приведены результаты исследований рождения электрон-позитронных пар в поле циркулярно поляризованной электромагнитной волны, распространяющейся в бесстолкновительной плазме.

Известно<sup>1</sup>, что в поле плоской электромагнитной волны вакуумное рождение электрон-позитронных пар не происходит, поскольку оба полевых инварианта  $\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2$  и  $\mathbf{E}\mathbf{B}$  равны нулю. Однако в присутствии плазмы структура поля изменяется так, что в системе отсчета, движущейся вдоль направления распространения волны с групповой скоростью  $v_g = kc^2/\omega$ , исчезает магнитная составляющая поля и становится отличным от нуля инвариант  $\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2$ . Это приводит к включению швингеровского механизма рождения пар и для такой конфигурации электрического поля оказывается возможным применение уже известных кинетических уравнений, описывающих рождение частиц в сильных переменных электрических полях:

$$\dot{f}(\mathbf{k}, t) = \frac{1}{2}\Delta(\mathbf{k}, t) \int_{t_0}^t dt' \Delta(\mathbf{k}, t') [1 - 2f(\mathbf{k}, t')] \cos 2\theta(t, t'), \quad (1)$$

где амплитуда  $\Delta(\mathbf{k}, t) = eE\varepsilon_{\perp}/\varepsilon^2$ , динамическая фаза

$$\theta(t, t') = \int_{t'}^t d\tau \varepsilon(\mathbf{k}, \tau), \quad (2)$$

и  $\varepsilon = \sqrt{\mathbf{k}^2 + m^2}$ ,  $\varepsilon_{\perp} = \sqrt{\mathbf{k}_{\perp}^2 + m^2}$ .

Для удобства проведения численных вычислений выражение (1) можно записать в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{f} = \frac{1}{2}\Delta u, \quad \dot{u} = \Delta(1 - 2f) - 2\varepsilon v, \quad \dot{v} = 2\varepsilon u. \quad (3)$$

В достаточно сильных лазерных полях, вследствие высокой интенсивности вакуумного рождения пар, необходимо учитывать эффект обратной реакции. Этот эффект заключается в том, что из-за большого количества рожденных частиц возникающий внутренний ток и внутреннее поле начинают влиять на процессы рождения частиц. Для его учета необходимо дополнить систему кинетических уравнений уравнениями Максвелла, описывающие возникающие токи проводимости и поляризации, которые корректируют действующее поле, являющееся теперь суммой внешнего (например, поля лазера) и внутреннего полей.

Таким образом, в разделе был предложен способ, с помощью которого можно использовать разработанную кинетическую теорию для распространяющейся в пространстве электромагнитной волны. Прежде подобный кинетический подход был применим только для особых конфигураций встречно-направленных импульсов лазеров, в которых образовывались относительно малые области в пространстве со стоячими волнами и полем электрического типа.

В разделе 1.3 изучается влияние начальных распределений частиц на процесс рождения частиц в плазме. В исследовательских целях в качестве наиболее простого тестового случая были выбраны равновесные распределения для фермионов и бозонов

$$f_0^\pm(\mathbf{p}) = \{\exp \beta[\omega_0(\mathbf{p}) - \mu] \pm 1\}^{-1}, \quad (4)$$

где  $\mu$  - химический потенциал,  $T$  - температура,  $\omega_0(\mathbf{p}) = \sqrt{\varepsilon_\perp^2 + (p^3)^2}$  и  $\beta = 1/T$ .

Для используемых кинетических уравнений известен интеграл движения, который с учетом ненулевых начальных условий принимает вид

$$(1 \pm 2f)^2 \mp (u^2 + v^2) = (1 \pm 2f_0^\pm)^2, \quad (5)$$

верхний знак соответствует бозонам, а нижний фермионам. Из (5) видно, что для частиц с целым спином влияние электрического поля приводит к увеличению плотности числа частиц при любых начальных условиях, однако для частиц с полуцелым спином существует устойчивая неподвижная точка  $f_0^{stable} = 1/2$ . Если величина начальной плотности будет больше этого значения, то число частиц будет возрастать, в то время как если начальная плотность меньше  $f_0^{stable}$ , то число частиц в этом случае будет уменьшаться.

В разделе 1.4 приведены оценки эффекта дополнительного ускорения ионов тяжелых элементов при помощи импульсов сверхмощных лазеров. Показано, что для условий, качественно соответствующих условиям ускорителя Нуклотрон (Дубна), возможно дополнительное увеличение энергии нуклонов в пучке со значения 4 ГэВ/нуклон до энергий порядка 12 ГэВ/нуклон при интенсивности поля порядка  $10^{26}$  Вт/см<sup>2</sup>, что оказывается достаточным для достижения фазового перехода адронной материи в состояние кварк-глюонной плазмы. Наличие большого числа управляющих параметров, от которых результат ускорения зависит существенно немонотонно, оставляет надежду для поиска наиболее оптимальных режимов ускорения. Так, например, в работе <sup>11</sup> было сделано заключение

---

<sup>11</sup> Базарь А., Таранукин В.Д. Лазерное ускорение электронов в вакууме до энергий  $\sim 10^9$  эВ // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. С. 129.