

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

2-2006-74

На правах рукописи  
УДК 539.17

**СКОКОВ**

**Владимир Владимирович**

**КИНЕТИЧЕСКОЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ  
СТОЛКНОВЕНИЙ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

**Специальность: 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Дубна 2006**

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

**Научные руководители:**

доктор физико-математических наук,

профессор

В.Д. ТОНЕЕВ (ЛТФ ОИЯИ)

доктор физико-математических наук,

профессор

С.А. СМОЛЯНСКИЙ (СГУ, г. Саратов)

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук

В.Н. РУССКИХ (РНИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва)

доктор физико-математических наук,

О.В. ТЕРЯЕВ (ЛТФ ОИЯИ)

**Ведущая организация:**

Московский инженерно-физический институт, г. Москва.

Защита диссертации состоится “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2006 г. в 15<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета К 720.001.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



С.И. ФЕДОТОВ

## *Общая характеристика диссертации.*

**Актуальность темы.** Впервые изучение свойств ядерной материи при высоких температурах и плотностях в лабораторных условиях стало возможным после ускорения тяжелых ядер до релятивистских энергий в Дубне ( $E_{lab}=3 - 4A$  ГэВ) и Беркли ( $E_{lab}<2.1A$  ГэВ). Впоследствии были созданы ускорители AGS (Брукхэйвен), SPS (CERN) и RHIC (Брукхэйвен). Максимальная энергия столкновения, достигнутая на коллайдере RHIC, составляет  $\sqrt{s} = 200$  ГэВ. Кроме того, в ближайшие годы будут закончены работы по созданию коллайдера LHC (CERN), энергии столкновения на котором на порядок превышают энергии RHIC. Однако не угас интерес к исследованию столкновений тяжелых ядер и более низких энергий. Так в Дубне подготавливается тяжелоионная программа для ускорителя Нуклотрон ( $E_{lab} \lesssim 5A$  ГэВ); результаты и опыт исследований, полученные на Нуклотроне, будут использованы при создании ускорительного комплекса FAIR (Дармштадт), где планируется изучение релятивистских столкновений тяжелых ядер с максимальной энергией  $E_{lab} = 20 - 30A$  ГэВ. Параллельно с развитием ускорительной техники идет создание и разработка новых прецизионных способов детектирования частиц. Такие экспериментальные исследования были бы невозможны без теоретической поддержки. Основная сложность теоретического описания релятивистских столкновений тяжелых ядер заключается в нерешенности проблемы конфайнмента, что препятствует изучению таких процессов на языке хромодинамики. Поэтому на сегодня физика релятивистских столкновений носит феноменологический характер. Однако даже исследование результатов феноменологических моделей позволяет понять важность процессов, протекающих в столкновении, в частности, ответить на вопросы о существовании локально-равновесной стадии в столкновении, о временной длительности предравновесной эволюции, о существовании и порядке фазовых переходов деконфайнмента и восстановления киральной симметрии на предполагаемой равновесной стадии взаимодействия.

Для исследования предравновесных процессов рождения частиц в столкно-

вении тяжелых ядер необходимо учитывать не только пертурбативные процессы, но и многочастичные аспекты теории, например, рождение частиц в сильных квазиклассических полях, так называемый непертурбативный механизм Швингера. Такой учет, как было показано в работе В. Т. Поп и соавторов (V. T. Pop et al, 2005) для энергии RHIC ( $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ), позволяет улучшить описание экспериментальных данных по превышению выхода ( $K^+ + K^-$ ), ( $\pi^+ + \pi^-$ )-мезонов и ( $p + \bar{p}$ ), ( $\Lambda + \bar{\Lambda}$ ) в ядро-ядерных столкновениях по сравнению с протон-протонными столкновениями. Формула Швингера, полученная в 1951 году, описывает рождение частиц в стационарном поле (J. S. Schwinger, 1951). Впоследствии в рамках квантовой теории поля с помощью зависящего от времени преобразования Боголюбова удалось обобщить этот результат на нестационарные квазиклассические поля фиксированного направления (A. Grib, S. Mamaev, V. Mostepanenko, 1994). Развитие методов описания рождения частиц в нестационарных полях представлено в первой части данной диссертации.

Вследствие многократного перерассеивания рожденные в столкновении частицы могут привести к установлению термодинамического локального равновесия в системе. Анализ данных на RHIC указывает, что при столкновении двух ядер золота устанавливается термодинамическое равновесие на временах порядка 1 Ф/с. Однако до сих пор не ясно, какой механизм ответственен за столь короткие времена предравновесной эволюции. Выдвигается несколько гипотез. Одна из них основана на наличии в системе связанных цветовых состояний кварков и глюонов (T. Schafer, E. V. Shuryak, 1995), эффективно приводящих к увеличению сечений рассеяния и, следовательно, к сокращению времени предравновесной стадии. Другая гипотеза предполагает изотропизацию цветового поля в столкновении (A. Dumitru, Y. Nara, 2005), что может вызвать быструю релаксацию в системе. Обе гипотезы не были ни подтверждены, ни опровергнуты на эксперименте. Тем не менее установлено, что пертурбативные сечения рассеяния кварков и глюонов предсказывают время релаксации, на порядок превышающее экспериментальные оценки.

Если все же статистическое равновесие в системе достигнуто, то последующее описание ее эволюции возможно в рамках гидродинамики. Исторически первый успех гидродинамики в приложении к физике столкновения тяжелых ядер связан прежде всего с предсказанием формирования коллективных потоков и некоторых особенностей их поведения (ядерные ударные волны), что позднее активно исследовалось экспериментально. Однако, гидродинамическое описание столкновения тяжелых ионов — не единственный инструмент теоретического исследования. Помимо гидродинамики развиваются микроскопические транспортные подходы: различные варианты каскадной модели, модели квантовой молекулярной динамики. Такие модели нуждаются во входной и часто неизвестной информации о сечениях рассеяния частиц и резонансов, времени формирования частиц и модификации свойств адронов в горячей среде. Преимущество гидродинамики заключается в возможности прямой постановки вопроса о связи уравнения состояния ядерной материи и его особенностей (например, наличия фазовых переходов), с динамикой системы и наблюдаемыми. Кроме того, гидродинамика позволяет упростить учет влияния среды на те или иные процессы, например, рождение дилептонных пар.

Гидродинамика не позволяет описать неравновесную стадию столкновения релятивистских тяжелых ионов. На сегодняшний день существует два способа учета неравновесной стадии. Так в работах (A. Amsden et al, 1978; R. B. Clare, P. Strottman, 1986; L. P. Csernai et al, 1982) была предложена мультижидкостная гидродинамика. Идея этого подхода заключается в представлении неравновесного столкновения двух ядер как набора равновесных “жидкостей”, взаимодействующих между собой. Например, в модели трехжидкостной гидродинамики (Y. V. Ivanov, V. N. Russkikh, V. D. Toneev, 2005) предполагается, что отдельные жидкости отвечают за каждое из налетающих ядер, а также третья компонента “жидкости” выступает за частицы (в основном пионы), родившиеся в столкновении. Трехжидкостная гидродинамика успешно описывает спектр экспериментальных данных от минимальных энергий AGS ( $E_{lab}=2A$  ГэВ) до максимальных энергий SPS ( $E_{lab}=158A$  ГэВ). Однако в диссертации предлагается

иной метод, а именно сочетание описания микроскопической каскадной модели с одножидкостной гидродинамикой. Такая схема описания тяжелых ионов получила название *гибридной* схемы. Согласно ей предравновесные процессы описываются с помощью микроскопической каскадной модели, в то время как небольшие объемчики системы, достигшие локального равновесия, объединяются в каплю жидкости (флюид), описание которой подчиняется законам гидродинамики. Эволюция флюида заканчивается стадией замораживания, когда гидродинамика уже не применима. Последующая эволюция вновь может быть описана в рамках каскада. Модель такого рода позволит изучить процессы, которые нельзя описать с помощью мультижидкостной гидродинамики, например, возможный, но сравнительно редкий из-за малых плотностей частиц, эффект возврата замороженных частиц обратно в гидродинамическую стадию (в том числе “затенение пионов”). Во второй части данной диссертации сделан шаг к созданию такой модели.

Целью работы является разработка кинетической и гидродинамической моделей описания релятивистских столкновений тяжелых ионов, изучение на этой основе эволюции столкновения и свойств ядерной материи при высоких температурах и барионных плотностях, извлечение информации об уравнении состояния ядерной материи из ограничений, накладываемых экспериментальными адронными и дилептонными наблюдаемыми.

#### Научная новизна и практическая ценность.

- Получены кинетические уравнения для рождения бозонов и фермионов во внешнем квазиклассическом нестационарном поле произвольного направления. Разработанный подход позволяет учитывать эффекты среднего поля в транспортных моделях, применимых к ультрарелятивистским столкновениям тяжелых ионов на RHIC и LHC. Прямое использование кинетических уравнений представленного класса может быть использовано для описания рождения электрон-позитронных пар в электромагнитном поле высокоэнергетических лазеров.

- Разработан оригинальный гибридный метод описания столкновения релятивистских тяжелых ионов. Его применение возможно в широком диапазоне энергий и поэтому он представляет ценность при анализе экспериментальных данных, полученных в ОИЯИ (г. Дубна), РНЦ “Курчатовский институт”(г. Москва) , Институте ядерных исследований РАН (г. Троицк) а также в ЦЕРНе и Брукхейвене.
- Получены и проанализированы экспериментальные данные по выходу адронов на установках AGS и SPS, по выходу дилептонов, измеренных в коллаборациях CERES и NA60 на SPS. Кроме того, разработанный код был использован при предсказании возможных сигналов смешанной фазы на Нуклотроне ОИЯИ.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований и на кафедре теоретической и математической физики Саратовского государственного университета, а также представлялись и докладывались на международной конференции “Кварковая материя” (Будапешт, Венгрия, 2005), XII международной конференции “Избранные проблемы современной физики” (Дубна, 2003), “Физика фундаментальных взаимодействий” (Москва, 2002), на международных рабочих совещаниях “Поиск смешанной фазы сильно взаимодействующей материи на Нуклотроне ОИЯИ” (Дубна, 2005), “Современные методы релятивистской ядерной физики” (Дубна, 2003), на международном семинаре “Избранные проблемы современной физики” (Саратов, 2003), международном семинаре им. А.М. Балдина “Проблемы физики высоких энергий, релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика” (Дубна, 2002), на семинарах в университете Гиссена (Гиссен, Германия), ГСИ (Дармштадт, Германия, 2004), Центральном институте физических исследований г. Будапешт (Будапешт, Венгрия, 2004), на коллаборационном совещании NADES (Дубна, 2005).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 12 работ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из десяти глав и одного приложения общим объемом 146 страниц, включая 4 таблицы, 48 рисунков и список цитированной литературы из 220 наименований.

### Содержание работы

**Первая глава** носит вводный характер. В ней обсуждается актуальность работы и мотивация проводимых исследований, дается краткий обзор по теме диссертации.

**Во второй главе** представлен вывод кинетических уравнений, описывающих рождение частиц в сильном квазиклассическом поле произвольного направления, для случая бозонов и фермионов в рамках подхода осцилляторного представления. Показано, что в частном случае поля фиксированного направления кинетические уравнения упрощаются и сводятся к известным уравнениям [3, 6]. В приближении среднего поля выписаны уравнения, учитывающие эффекты обратного влияния рождения частиц на внешнее поле.

**В третьей главе** полученные уравнения с немарковским источником рождения бозонов и фермионов решаются

численно в применении к проблеме столкновения тяжелых ионов. Обсуждаются наблюдаемые эффекты в зависимости от длительности и формы импульса внешнего поля. Показано, что выход странных кварков, рожденных в нестационарном поле, может быть существенно выше, чем в стационарном случае, для которого справедлива формула Швингера (см. Рис. 1). Подробно обсуждается

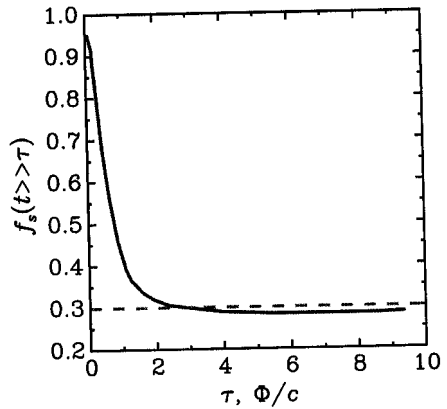


Рис. 1: Фактор подавления рождения странных кварков на асимптотических временах  $f_s(t \gg \tau)$  в зависимости от времени действия импульса внешнего поля ( $\tau$ ). Штриховой линией показан результат, полученный по формуле Швингера.



зависимость спектров рожденных частиц по поперечному импульсу от формы начального импульса. Дано сравнение с результатами, полученными для классических полей Янга-Миллса на решетке [7].

**В четвертой главе** развито обобщение интеграла столкновения Ландау для пертурбативных процессов в кварк-глюонной плазме. Получены упрощения, связанные с безмассовостью глюонов. Представлен самосогласованный способ введения параметра обрезания инфракрасной расходимости в интеграле столкновения Ландау для неравновесной и квазиравновесной плазмы. Результаты численного моделирования процессов рождения (в абелевом приближении) и релаксации в глюонной и кварк-глюонной плазме показали, что без существенного (в 50 и более раз) увеличения пертурбативных сечений рассеяния невозможно получить разумные времена релаксации к термодинамическому равновесию. Этот результат согласуется с вычислениями, независимо проведенными в каскадной партонной модели (D. Molnar, M. Gyulassy, 2002).

**В пятой главе** суммируются основные результаты первой части диссертации.

**В шестой главе** выписаны основные гидродинамические уравнения в приближении идеальной жидкости. Дано обоснование такого приближения. Для численного моделирования гидродинамических уравнений использован метод с коррекцией потока FCT-SHASTA. В одномерном случае результаты численного моделирования задачи Римана сравниваются с ее аналитическим решением. В приближении бьеркеновского гидродинамического разлета получены решения для  $d$ -мерного случая, приведено сравнение с точным численным решением. В рамках этого сравнения показана роль влияния на эволюцию системы процесса замораживания жидкости, т.е. ухода переохлажденных объемчиков жидкости из гидродинамической эволюции.

**В седьмой главе** сформулирован метод вычисления начальных условий гидродинамической эволюции с помощью микроскопического транспортного кода QGSM (модель кварк-глюонных струн). На основе критерия выполаживания удельной энтропии на барион для набора энергий  $E_{lab}$  от 4A до 160A ГэВ при-

ближенно определен момент времени, когда в системе достигается термодинамическое равновесие. Сохраняющиеся компоненты тензора энергии-импульса и барионного тока в этот момент определяют начальное состояние последующей гидродинамической эволюции.

В восьмой главе рассмотрена проблема замораживания, т.е. перехода от гидродинамической стадии разлета системы к системе невзаимодействующих частиц. Дан обзор современной литературы по этому вопросу. Подробно описана процедура замораживания, используемая в нашей гибридной гидродинамической модели.

В девятой главе рассмотрена реалистичная задача описания столкновения тяжелых ионов. В параграфе 9.1 рассмотрены две модели уравнения состояния ядерной материи, необходимые для замыкания системы гидродинамических уравнений. Предложен вариант уравнения состояния смешанной кварк-адронной фазы, в котором адронный сектор описывается с помощью обобщенного уравнения состояния Зимани, а кварк-глюонная фаза рассмотрена в модели, имитирующей свойства КХД: конфайнмент и высокотемпературный предел термодинамических характеристик. Показано, что феноменологическое обобщенное уравнение состояния Зимани находится в хорошем согласии с микроскопическими вычислениями Раппа и Вамбаха (R. Rapp, J. Wambach, 1995) для взаимодействующего пионного газа при нулевом барионном химическом потенциале. Кроме того, при нулевой температуре, но конечном барионном потенциале проведено сравнение и показано хорошее согласие с результатами П. Данилевича (P. Danielewicz et al, 2002), накладывающими определенные экспериментальные ограничения на адронное уравнение состояния.

На динамической основе предложено уравнение состояния для фазы деконфайнмента. Массы квазичастиц кварков и глюонов, а также константа сильного взаимодействия в такой модели в высокотемпературном пределе и пределе больших барионных плотностей совпадают с КХД вычислениями при конечных температурах в приближении HTL (жестких температурных петель). Эта модель разработана для частного случая, когда число ароматов равно числу

цветов  $N_f = N_c$ . Показано обобщение модели на случай  $N_f < N_c$ . Рассмотрена процедура сравнения феноменологических уравнений состояния с физическими массами адронов с решеточными вычислениями КХД при конечной температуре и барионном химическом потенциале. Оба уравнения состояния находятся в разумном согласии с решеточными расчетами.

В параграфе 9.2 рассмотрена глобальная эволюция ядерного вещества в столкновении (см. Рис. 2). Представлены зависимости от времени средних величин, таких как плотность энергии, барионная плотность. Показаны траектории, усредненные по центральной области взаимодействия, состояния ядерной материи на фазовой плоскости  $T - \mu_B$  для различных энергий столкновения.

Оказалось, что даже при энергии столкновения  $E_{lab} = 4A$  ГэВ в центральной области взаимодействия ( $V \sim 36 \Phi^3$ ), благодаря большим барионным плотностям, система находится в фазе деконфайнмента в течение примерно  $1.5 \Phi/c$ .

В параграфе 9.3 описана процедура вычисления наблюдаемых как с конечной стадии, так и проинтегрированных по всей стадии гидродинамического разлета. В параграфе 9.4 приведено сравнение с экспериментом спектров адронов (нуклонов и  $\pi$ -мезонов) по быстроте и поперечному импульсу. Для заданного уравнения состояния имеется лишь один подгоночный параметр — плот-

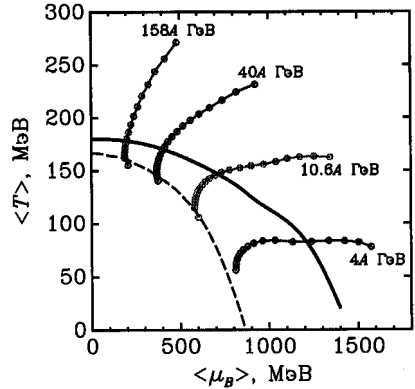


Рис. 2: Эволюция состояния вещества в центральных столкновениях Au-Au при энергиях  $E_{lab}=4, 10, 40, 158.4$  ГэВ. Усреднение проводится по центральному лоренцсжатоку с ребром  $4 \Phi$ . Точки на фазовых траекториях рассчитаны равномерно по времени с шагом  $0.3 \Phi/c$ . Сплошной жирной кривой показана кривая фазового перехода типа кроссовер для модели уравнения состояния смешанной фазы. Штриховая линия получена из условия замораживания, вычисленного в статистической модели, фиттирующей экспериментальные точки замораживания (P. Braun-Munzinger et al, 2003).

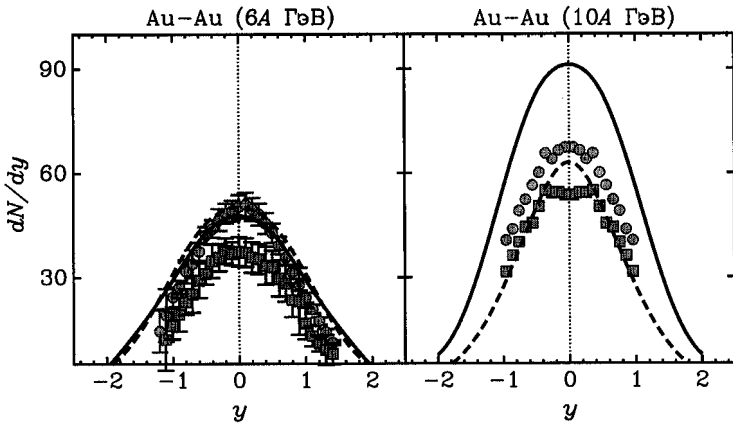


Рис. 3: Быстротные спектры пионов в центральных столкновениях Au-Au с энергией  $E_{lab} = 6, 10.5A$  ГэВ. Сплошные линии — результат гибридной модели с уравнением состояния с фазовым переходом типа кроссовер, штрихованные линии — результаты расчета с адронным уравнением состояния. Закрашенные кружочки — экспериментальные спектры  $\pi^-$  мезонов, покрашенные квадратики — спектры  $\pi^+$  мезонов. Экспериментальные данные получены в коллаборациях E895 (J. L. Klay et al, 2003) и E877 (I. Barrette et al, 1999).

ность энергии замораживания  $\epsilon_{fr}$ . В данной работе он зафиксирован равным  $0.5 \text{ ГэВ}/\Phi^3$  для всех значений энергии налетающих ядер. Исследование адронных наблюдаемых с уравнением смешанной фазы показало следующее. Протонные спектры находятся в хорошем соответствии с экспериментом во всей рассматриваемой области энергий. Спектры пионов описывают экспериментальные данные при энергиях  $E_{lab} = 4A - 8A$  ГэВ. Для максимальной энергии AGS и энергий SPS наблюдается существенное превышение рассчитанной множественности пионов. Вычисления с обобщенным адронным уравнением состояния Зимани показали (см. Рис. 3), что в первую очередь такое превышение связано с чрезмерным смягчением уравнения состояния смешанной фазы за счет раннего фазового перехода. С другой стороны, при энергии  $E_{lab} = 40A$  ГэВ адронное уравнение состояния несколько недооценивает множественность пионов. Это согласуется с выводом авторов (Y. V. Ivanov, V. N. Russkikh, V. D. Toneev, 2005) о том, что, начиная с этой энергии, проявляется влияние фазового перехода на адронные характеристики.

Модель расширена на случай вычисления дилептонных характеристик. Результаты модельных расчетов сопоставлены с экспериментом. Выполнено сравнение выхода дилептонов с экспериментальными данными коллабораций CERES и NA60. Показано, что учет температурной зависимости сдвига массы  $\rho$ -мезона в среде по модели Брауна-По не совместим с экспериментальными данными, полученными коллаборацией NA60.

В десятой главе кратко представлены основные результаты второй части.

В ЗаклЮчении суммируются результаты, выдвигаемые на защиту.

В приложении на примере установки CERES показан расчет функции аксептанса детектора лептонных пар.

### На защиту выдвигаются следующие результаты.

- На основе осцилляторного представления получены кинетические уравнения, описывающие рождение бозонов, фермионов и их античастиц в сильных нестационарных абелевых полях произвольной конфигурации в однородном пространстве.
- Получен аналог релятивистского интеграла столкновения Ландау для описания пертурбативных процессов в неравновесной кварк-глюонной плазме. Показано, что без существенного увеличения пертурбативных сечений рассеяния не удастся получить разумные времена релаксации.
- Предложен вариант уравнения состояния для смешанной кварк-адронной фазы. На основе динамического подхода получено уравнение состояния для фазы деконфайнмента, симулирующего свойства КХД при высоких температурах и плотностях. Модельные расчеты находятся в хорошем согласии с решеточными результатами.
- Разработан одножидкостный трехмерный гидродинамический код, в котором впервые в приложении к реалистичному столкновению релятивистских тяжелых ионов был применен метод коррекции диффузии. На основе

данного кода и транспортной модели QGSM создана гибридная модель описания столкновения релятивистских тяжелых ионов. Проведено сравнение адронных и дилептонных спектров с экспериментом. Показано, что температурная модификация массы  $\rho$ -мезона в модели Брауна-По не согласуется с данными последнего мюонного экспериментом.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. V. V. Skokov, S. A. Smolyansky, and V. D. Toneev, *Quark gluon evolution in early stage of ultra-relativistic heavy-ion collisions* (2002), in Proc. of 16th International Baldin Seminar on High-Energy Physics Problems: Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics, (Dubna, Russia, 10-15 Jun 2002), hep-ph/0210099.
2. В. В. Скоков, В. Д. Тонеев, Д. В. Винник и С. А. Смолянский, *Релаксационные процессы в релятивистской плазме, рожденной из вакуума сильным полем*, JINR-P2-2002-215.
3. V. N. Pervushin, V. V. Skokov, A. V. Reichel, S. A. Smolyansky, and A. V. Prozorkevich, *The kinetic description of vacuum particle creation in the oscillator representation*, *Int. J. Mod. Phys. A* **20**, 5689–5704 (2005), hep-th/0307200.
4. S. A. Smolyansky, V. V. Skokov, and A. V. Prozorkevich, *Kinetic theory of the quantum field systems with unstable vacuum*, *Phys. Part. Nucl. Lett.* **2**, 293–299 (2005), hep-th/0310073.
5. A. V. Prozorkevich, S. A. Smolyansky, V. V. Skokov, and E. E. Zabrodin, *Vacuum creation of quarks at the time scale of QGP thermalization and strangeness enhancement in heavy-ion collisions*, *Phys. Lett.* **B583**, 103–110 (2004), nucl-th/0401056.
6. В. Н. Первушин и В. В. Скоков, *Кинетическое описание рождения фермионов в космологии и КЭД*, в сборнике “Проблемы калибровочных полей”, с. 131 (Дубна, 2004).

7. V. V. Skokov and P. Levai, *Transverse momentum spectra of fermions and bosons produced in strong abelian fields*, *Phys. Rev. D* **71**, 094010 (2005), hep-ph/0410339.
8. Y. B. Ivanov, V. V. Skokov, and V. D. Toneev, *Equation of state of deconfined matter within dynamical quasiparticle description*, *Phys. Rev. D* **71**, 014005 (2005), hep-ph/0410127.
9. Y. B. Ivanov, A. S. Khvorostukhin, E. E. Kolomeitsev, V. V. Skokov, V. D. Toneev, D. N. Voskresensky, *Lattice QCD constraints on hybrid and quark stars*, *Phys. Rev. C* **72**, 025804 (2005), astro-ph/0501254.
10. В. В. Скоков и В. Д. Тонеев, *Гидродинамика расширяющегося фаяербола*, JINR-P2-2005-95, принято в ЯФ.
11. V. V. Skokov and V. D. Toneev, *Dilepton production from hydrodynamically expanding fireball*, Proceedings of the poster section, "Quark Matter 2005" (Budapest, 2005), hep-ph/0601160, accepted to Acta Phys. Slovaca.
12. V. V. Skokov and V. D. Toneev, *Semi-central In-In collisions and Brown-Rho scaling*, *Phys. Rev. C* **73**, 021902 (2006), nucl-th/0509085.

Получено 24 мая 2006 г.

**Отпечатано методом прямого репродуцирования  
с оригинала, предоставленного автором.**

**Подписано в печать 25.05.2006.**

**Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.**

**Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ № 55351.**

**Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.**

**E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)**

**[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)**