

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
“ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ”

УДК 530.12+533.7+524.7

ВЕРЕЩАГИН
Григорий Викторович

КИНЕТИКА, ДИНАМИКА И ИЗЛУЧЕНИЕ
РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ПЛАЗМЫ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.02 - теоретическая физика

Минск 2017

Работа выполнена в сети международных центров релятивистской астрофизики ICRAANet, Рим-Пескара, Италия

Официальные оппоненты: **Бисноватый-Коган Геннадий Семёнович**,
доктор физико-математических наук, профес-
сор,

главный научный сотрудник отдела №64

Института космических исследований РАН

Горбацевич Александр Константинович,

доктор физико-математических наук, профес-
сор,

профессор кафедры теоретической физики и
астрофизики Белгосуниверситета

Роговцов Николай Николаевич,

доктор физико-математических наук, профес-
сор,

профессор кафедры высшей математики №2

Белорусского государственного технического
университета

Оппонирующая организация: ГНИУ «Институт ядерных проблем» Белго-
суниверситета

Защита состоится 27 декабря 2017 г. в 15:00 на заседании совета по защи-
те диссертаций Д 01.05.02 при ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220072, Республика Бе-
ларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68, тел. 284-04-41.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиоте-
ке имени Якуба Коласа НАН Беларуси

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2017 г.

Учёный секретарь совета
по защите диссертаций, кандидат
физико-математических наук

Выблый Ю.П.

ВВЕДЕНИЕ

В диссертации проводится комплексное исследование кинетических, гидродинамических и радиационных свойств релятивистской непрозрачной плазмы. Базой для исследования служит релятивистская кинетическая теория. Такой выбор не случаен, поскольку кинетика газов в классической (не квантовой) физике представляется наиболее фундаментальной теорией. Она была развита с целью изучения свойств материи на макроскопическом уровне, ещё доступном как наблюдениям, так и экспериментам, на основе учёта свойств микроскопических частиц. Так была проложена дорога к атомной картине мира.

Современная кинетическая теория должна рассматриваться в более широком контексте статистической механики, возникшей к концу 19 века в работах Максвелла, Больцмана и Гиббса. Основной задачей кинетической теории является объяснение различных макроскопических закономерностей среды на основании известных микроскопических свойств и взаимодействий. В общем смысле кинетическая теория – это теория неравновесных систем. Поскольку явления в микромире описываются на квантовом языке, кинетическая теория широко использует квантовые методы и основные уравнения кинетической теории могут быть получены из квантовой теории поля. Вместе с тем, существует тесная связь между кинетической теорией и теорией переноса излучения.

Формулировка кинетической теории в рамках специальной теории относительности была закончена в 60-х годах 20 века. В этот же период возникла релятивистская астрофизика. Начало ей было положено открытиями микроволнового реликтового излучения, пульсаров и квазаров. Наблюдения реликтового излучения подтвердили модель горячей Вселенной. Это дало толчок к развитию моделей материи при экстремальных плотностях и температурах, характерных для ранней Вселенной. Анализ кинетики термоядерных реакций привёл к созданию теории нуклеосинтеза. Аналогично открытие пульсаров и их интерпретация как быстро вращающихся намагниченных нейтронных звёзд дали толчок развитию моделей материи при экстремальных плотностях в сильных гравитационных и электромагнитных полях.

Таким образом, большинство приложений релятивистской кинетической теории связаны с астрофизикой и космологией. В этих областях фи-

зики экспериментальные данные получены путём *наблюдений*, причем наблюдатель не имеет возможности оказать влияние либо изменить условия, при которых происходит наблюдаемое явление. По этой причине численное моделирование является основным средством для развития теоретических моделей в астрофизике и космологии, которые затем сопоставляются с доступными наблюдениями.

Прогресс в астрофизике за последние десятилетия, включающий наблюдения в широком диапазоне спектра электромагнитного излучения, начиная от радиоволн до гамма-лучей высоких энергий, а также создание нейтринной и гравитационно-волновой астрономии, позволяют получать всё более детальную информацию о релятивистских астрофизических источниках. Моделирование таких источников в рамках упрощённых гидродинамических моделей, предполагающих состояние термодинамического равновесия в системе, часто оказывается недостаточным для адекватного описания наблюдений. Методы кинетической теории применяются в астрофизических задачах, однако часто они ограничены набором упрощённых моделей, таких как синхротронное излучение от частиц с заранее заданными функциями распределения: например, мотивированными механизмом Ферми ускорения частиц. Ввиду новых данных наблюдений, теории астрофизических объектов, построенные на таких упрощённых предположениях, не всегда выдерживают проверки. Яркий пример – кризис в теории гамма-всплесков, где феноменологический спектр Банда уже более 20 лет не находит теоретического объяснения на основе известных механизмов генерации излучения.

Помимо важных приложений в астрофизике, релятивистская кинетическая теория становится более доступной прямой проверке в других областях, особенно благодаря прогрессу, наметившемуся в инерционном ядерном синтезе и созданию сверхмощных лазеров. Интенсивность лазеров достигает таких величин, что становится технологически возможным создание электрон-позитронной плазмы в лаборатории. Оценки показывают, что такая плазма изначально неравновесна.

Таким образом, требуется разработка моделей на более фундаментальном уровне, позволяющая учитывать неравновесный характер релятивистских систем. В этой связи актуальны вопросы о возможных механизмах рождения релятивистской плазмы, существенным компонентом которой являются электрон-позитронные пары, её неравновесной динамики,

а также её наблюдаемых характеристиках. Необходимо применять самосогласованный подход к решению релятивистских уравнений Больцмана. В диссертации развит такой подход в применении к рождению электрон-позитронных пар во внешнем электрическом поле; термализации релятивистской плазмы; динамике и анализу фотосферного излучения релятивистских потоков плазмы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Диссертационное исследование выполнено в рамках программы международной докторантуры по релятивистской астрофизике (англ.: International Relativistic Astrophysics Doctorate Program), финансируемой Европейским Союзом как проект “Erasmus Mundus Joint Doctorate Program” (2010-2017).

Цель и задачи исследования

Целью исследования является установление кинетических, гидродинамических и радиационных свойств релятивистской непрозрачной плазмы на основе релятивистской кинетической теории.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Построить гидродинамическую модель рождения и осцилляций электрон-позитронных пар во внешнем электрическом поле с обратной связью, позволяющую учесть влияние рождённых пар на исходное внешнее поле; исследовать конверсию энергии из электрического поля в равновесную электрон-позитронную плазму на кинетическом уровне.
2. Провести моделирование термализации плазмы на основе релятивистских кинетических уравнений и прояснить необходимые условия достижения термодинамического равновесия в релятивистской плазме.
3. Разработать метод расчёта кинетики неравновесной непрозрачной релятивистской плазмы, использующий для интегралов столкновений матричные элементы квантовой электродинамики; определить характерные времена установления кинетического и термодинамического равновесия.
4. Разработать новый подход к фотосферному излучению ультрарелятивистских потоков, учитывающий их конечную протяжённость; построить теорию фотосферного излучения и классифицировать типы

потоков; создать методику расчёта потоков энергии и спектров фотосферного излучения для удалённого наблюдателя.

5. Исследовать комптонизацию фотосферного излучения в ультрарелятивистских потоках и определить условия, при которых спектры фотосферного излучения находятся в согласии с наблюдениями гамма-всплесков.

Научная новизна

В настоящей диссертации автором впервые:

1. сформулировано необходимое условие достижения термодинамического равновесия в релятивистской плазме;
2. предложен метод расчёта кинетики неравновесной непрозрачной релятивистской плазмы из первых принципов, использующий для интегралов столкновений матричные элементы квантовой электродинамики;
3. предложена теория фотосферного излучения ультрарелятивистских потоков, учитывающая их конечную протяжённость;
4. предсказана комптонизация фотосферного излучения в ультрарелятивистских потоках.

Положения, выносимые на защиту

1. Гидродинамическая модель рождения и осцилляций электрон-позитронных пар во внешнем электрическом поле с обратной связью, позволяющая учесть влияние рождённых пар на исходное внешнее поле, а также кинетическое описание конверсии энергии из электрического поля в равновесную электрон-позитронную плазму.
2. Доказательство необходимого условия достижения термодинамического равновесия в релятивистской плазме на основе кинетического моделирования термализации плазмы.
3. Метод расчёта кинетики неравновесной непрозрачной релятивистской плазмы из первых принципов, использующий для интегралов столкновений матричные элементы квантовой электродинамики; полученные характерные времена установления кинетического и термодинамического равновесия.

4. Новый подход к описанию фотосферного излучения ультрарелятивистских потоков, учитывающий их конечную протяжённость; построение теории фотосферного излучения и классификация типов потоков; методики расчёта потоков энергии и спектров фотосферного излучения для удалённого наблюдателя.
5. Предсказание комптонизации фотосферного излучения в ультрарелятивистских потоках и определение условий, при которых спектры фотосферного излучения находятся в согласии с наблюдениями гамма-всплесков.

Личный вклад соискателя

Все результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно, вклад автора в совместные публикации определяющий. Работы [2, 6, 27] опубликованы без соавторов. Профессор Р. Руффини участвовал в постановке задачи и обсуждении ряда результатов в публикациях [3, 4, 5, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23].

Соавтор А.Г. Аксенов участвовал в написании монографии [1] (1/3 текста), проводил численные расчёты и участвовал в обсуждении результатов в работах [5, 11, 19, 20, 21].

Соавтор И.А. Сивцов проводил численные расчёты, участвовал в обсуждении результатов и подготовке к публикации в работах [7, 8, 10, 12, 30]. В работе [10] им выведено уравнение диффузии и найдено его аналитическое решение. В работе [8] он произвёл расчёт теплового размывания сферической оболочки, расширяющейся с ультрарелятивистской скоростью.

Соавтор Д. Беге (D. Bégué) проводил численные расчёты и участвовал в обсуждении результатов в работах [9, 12].

Соавтор А. Бенедетти (A. Benedetti) проводил численные расчёты и участвовал в обсуждении результатов в работах [13, 17].

Соавтор К.Л. Бьянко (C.L. Bianco) проводил численные расчёты и участвовал в обсуждении результатов в работах [14, 16, 23].

Соавтор С.-С. Ксуэ (S.-S. Xue) проводил численные расчёты и участвовал в обсуждении результатов в работах [4, 18, 22, 23].

Апробация результатов диссертации

Результаты, содержащиеся в настоящей диссертации, были доложены на следующих конференциях:

- IX Italian-Korean Symposium on Relativistic Astrophysics, Seoul, Mt. Kumgang, Korea, 19-24 July 2005.
- The 1st Bego scientific rencontre, Nice, France, 5-16 February 2006.
- XI Marcel Grossmann Meeting, Berlin, Germany, 23-29 July 2006.
- Cesare Lattes Meeting on GRBs, Black Holes and Supernovae, Mangaratiba-Portobello, Brazil, 26 February - 3 March 2007.
- X Italian-Korean Symposium on Relativistic Astrophysics, Pescara, Italy, 25-30 June 2007.
- 4 Italian-Sino Workshop on Relativistic Astrophysics, Pescara, Italy, 20-29 July 2007.
- A Century of Cosmology, San Servolo, Venice, Italy, 27-31 August 2007.
- 2 Stueckelberg Workshop, Pescara, Italy, 3-7 September 2007.
- American Physical Society April Meeting, St. Luis, USA, 11-15 April, 2008.
- 3 Stueckelberg Workshop, Pescara, Italy, 8-18 July 2008.
- Probing Stellar Populations out to the Distant Universe, Cefalú, Italy, 7-19 September 2008.
- Международная конференция в честь 95-летия со дня рождения Я.Б. Зельдовича (Zeldovich Meeting), Минск, Беларусь, 20-23 апреля 2009.
- XII Marcel Grossmann Meeting, Paris, France, 12-18 July 2009.
- GRB 2010 / Dall'eV al TeV tutti i colori dei GRB, Secondo Congresso Italiano sui Gamma-ray Burst, Cefalú, Italy, 15-18 June 2010.
- Korean Physical Society 2010 Fall Meeting, Pyeong-chang, Korea, 20-22 October 2010.
- Recent News from the MeV, GeV and TeV Gamma-Ray Domains, Pescara, Italy, 21-26 March 2011.
- From Nuclei to White Dwarfs and Neutron Stars, Les Houches, France, 3-8 April 2011.
- GRBs, their progenitors and the role of thermal emission, Les Houches, France, 2-7 October 2011.

- XV Brazilian School of Cosmology and Gravitation, Mangaratiba - Rio de Janeiro – Brazil, August 19 - September 1 2012.
- XIII Marcel Grossmann Meeting, Stockholm, Sweden, 1-7 July 2012.
- Международная конференция в честь 100-летия Я.Б. Зельдовича (Zeldovich-100 Meeting), Минск, Беларусь, 11-14 марта 2014.
- Zeldovich-100 International Conference, Институт космических исследований, Москва, Россия, 16-20 июня 2014.
- 1st Scientific ICRANet Meeting in Armenia, Ереван, Армения, 30 июня - 4 июля 2014.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты, представленные в настоящей диссертации, опубликованы в монографии автора, рецензируемых журналах (21 статья), в коллективной монографии (1 глава), в сборниках трудов научных конференций (24 публикации). Общий объем опубликованного материала по теме диссертации, соответствующий пункту 18 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь, составляет 26 авторских листов. Полный объём публикаций – 48 авторских листов. 3 работы опубликовано без соавторов.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, обзорной главы и четырёх оригинальных глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 272 страницы, из которых 52 занимают 58 рисунков, а 23 страницы – список используемых источников из 322 наименований и список публикаций соискателя из 48 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Формулировка кинетической теории представлена в **главе 1** в лоренц-инвариантном виде, следуя монографии [1]. Описывается эволюция её основных концепций, таких как фазовое пространство и функция распределения, начиная с нерелятивистской физики, через специальную теорию относительности к общей теории относительности. Рассматривается соотношение механической и кинетической картин. Даётся физический смысл одночастичной функции распределения и доказывается её лоренц-инвариантность. Вводятся используемые в дальнейшем макроскопические величины, такие как четырёхмерный ток, четырёхмерный поток энтропии, тензор энергии-импульса, гидродинамическая скорость. Эти понятия существенны при формулировке кинетических уравнений, при установлении связей между кинетической теорией и гидродинамикой. Изложен аксиоматический подход к выводу кинетических уравнений для одночастичной функции распределения. Выводится кинетическое уравнение в специальной теории относительности. Выводится уравнение Больцмана в общей теории относительности, с использованием случайной функции Климонтовича. Рассматривается наиболее важный случай рассеяния двух частиц, для которого выводится интеграл столкновений. Рассматриваются также квантовые поправки к интегралу столкновений. Детализируется связь между кинетической теорией и теорией переноса излучения. Устанавливается связь между интегралом столкновений и сечением процесса. Вводится понятие времени релаксации. Обсуждается роль усреднения, как фундаментального инструмента кинетической теории. В нерелятивистском случае усреднение является простой операцией, но её обобщение на релятивистский случай нетривиально: временное и пространственное усреднение, рассматриваемые отдельно, не являются Лоренц-инвариантными. В общей теории относительности усреднение – это ещё более сложная операция, а полностью ковариантная формулировка кинетической теории пока отсутствует. Из уравнения Больцмана выводятся уравнения релятивистской гидродинамики. Показано, что существование микроскопических законов сохранения энергии и импульса при каждом индивидуальном взаимодействии частиц влечёт за собой законы сохранения для макроскопических величин: четырёхмерного тока и тензора энергии-импульса. Доказывается \mathcal{H} -теорема и формулируются условия для локального термодинамическо-

го равновесия. Получена одночастичная функция распределения, а также равновесные макроскопические величины: плотность частиц, плотность энергии, давление и энтропия. Выводятся обобщённые уравнения непрерывности для реагирующих смесей. Дается вывод цепочки уравнений Боголюбова для релятивистской плазмы. Основная идея, заложенная в этом подходе, состоит в том, что любая система многих тел может быть описана набором уравнений движения вместе с заданным взаимодействием. Применяя статистическое усреднение к функциям распределения Климонтовича, можно вывести цепочку уравнений для многочастичных функций распределения. Для получения компактных кинетических уравнений эта цепочка обрывается на определённом уровне, за счёт разложения по малым параметрам либо других физических соображений. Рассматриваются кинетические свойства разреженного газа и плазмы. В релятивистской плазме возникает много новых явлений: например, рождение пар частиц-античастиц. Для понимания этих явлений, а также для прояснения физических оснований для вывода уравнений Больцмана и Власова, обсуждаются характеристические величины: плазменный параметр, кулоновский логарифм, дебаевский радиус, параметр вырождения и число Кнудсена.

В **главе 2** рассматривается один из механизмов генерации электрон-позитронных пар: непerturbативное рождение пар в сильном электрическом поле (процесс Швингера). Дается вывод формулы Швингера в рамках квантовой электродинамики [18]. Этот процесс хорошо исследован в литературе, особенно в случае однородного и стационарного электрического поля. Для генерации непрозрачной электрон-позитронной плазмы необходимо рождение большого числа пар. В этой связи возникает вопрос об учёте обратного влияния пар на исходное электрическое поле. Этот вопрос недостаточно изучен в литературе, в основном ввиду технической сложности расчётов. Рассматривается процесс рождения электрон-позитронных пар во внешнем электрическом поле в рамках гидродинамической модели [22, 18, 17]. Как следствие обратного влияния большого числа пар на исходное поле возникают осцилляции электрон-позитронных пар. Показано, что, как следствие обратного влияния большого числа пар на исходное поле, возникают когерентные осцилляции электрон-позитронных пар и электрического поля. В рамках этой модели также показано, что система дифференциальных уравнений в частных производных для частиц и поля в этом приближении сводится к единственному обыкновенному дифферен-

циальному уравнению

$$\ddot{\tilde{u}} + \frac{\tilde{E}_0^2 - \dot{\tilde{u}}^2}{2(1 + \tilde{u}^2)} \tilde{u} + \frac{2\alpha}{\pi^2} (1 + \tilde{u}^2)^{1/2} \exp\left(-\frac{\pi}{|\dot{\tilde{u}}|}\right) \dot{\tilde{u}} = 0, \quad (1)$$

где $\tilde{E} = E/E_c$ – безразмерная напряжённость электрического поля,

$E_c = m_e^2 c^3 / (q\hbar)$ – критическая напряжённость электрического поля,

\hbar – приведённая постоянная Планка,

m_e – масса электрона,

q – заряд электрона,

c – скорость света,

$\tilde{u} = \gamma v/c$,

v – скорость электронов и позитронов.

Рассматриваются основные характеристики этих осцилляций, такие как длина осцилляций, максимальная скорость частиц, скорость рождения пар. Проясняются условия, необходимые для возникновения осцилляций. Рассматривается асимптотика системы плазма–электрическое поле. Исследуется тормозное излучение от осциллирующей электрон-позитронной плазмы. Показано, что спектр излучения достаточно узок и имеет характерный пик, а соответствующая частота практически совпадает с плазменной частотой [17]. На основе численного решения релятивистских уравнений Больцмана для электрон-позитронных пар и фотонов, а также уравнений Максвелла исследуется механизм конверсии энергии из электрического поля в электрон-позитронную плазму. Применяется численный метод решения уравнений Больцмана, учитывающий аксиальную симметрию в пространстве импульсов. Установлены максимальные значения среднего лоренц-фактора при осцилляциях плазмы. Найдены характерные времена генерации электрон-позитронных пар и фотонов. Показано, что относительный вклад различных компонент энергии изменяется со временем. С возрастанием времени увеличивается доля энергии, связанная с массой покоя частиц, как следствие рождения пар. Затем начинает доминировать кинетическая энергия частиц, связанная с когерентными осцилляциями плазмы. Наконец, начинает преобладать внутренняя энергия плазмы как следствие рождения пар с разбросом импульсов в направлении, ортогональном полю, а также как следствие изотропизации плазмы из-за столкновений частиц.

В качестве примера на рисунке 1 представлены плотности функций рас-

пределения электронов f_- и фотонов f_γ , соответственно, в левой и правой колонке, для начального условия $E_0 = 100E_c$, где E_c – критическая напряжённость электрического поля для рождения электрон-позитронных пар. Их временная эволюция показана последовательно сверху вниз для различных моментов времени. Спустя $2, 3 t_c$, где $t_c = h/(m_e c^2)$ – комптоновское время, обе функции распределения сильно анизотропны. На этой стадии электрическое поле сверхкритическое, и только малая часть начальной энергии превращена в пары. По этой причине электроны и позитроны легко ускоряются до релятивистских скоростей, что объясняет, почему электронная функция распределения сдвинута в фазовом пространстве в область положительных параллельных импульсов $p_{\parallel} > 0$. В этот момент электроны имеют ультрарелятивистскую среднюю скорость, соответствующую лоренц-фактору $\gamma \simeq 170$. На втором уровне сверху показаны функции распределения электронов и фотонов в момент времени $2, 3 \times 10^2 t_c$, они всё ещё сильно анизотропны. Однако, ситуация отлична от предыдущей, поскольку электрическое поле близко к критическому, и к этому моменту присутствует большое число пар и фотонов. Как следствие, скорости реакций значительно выше, чем раньше, и частицы эффективно обмениваются импульсами. Как относительно небольшое электрическое поле, так и высокая скорость взаимодействия частиц, не дают им достигать ультрарелятивистских скоростей, а функции распределения теперь симметричны относительно плоскости $p_{\parallel} = 0$. Значительно позже, в момент времени $4, 6 \times 10^6 t_c$ показанный на нижних графиках, столкновения определяют динамику системы, а присутствие электрического поля может быть игнорировано. Функции распределения уширяются по ортогональным импульсам. Такая динамика позволяет предсказать дальнейшую изотропизацию электрон-позитронной плазмы и последующее достижение термодинамического равновесия. Изотропизация функций распределения в пространстве импульсов указывает не только на достижение кинетического равновесия, но и на то, что система теряет информацию о изначально заданном выделенном направлении – направлении электрического поля.

В **главе 3** формулируется теория термализации неравновесной непрозрачной релятивистской плазмы [1, 2]. Актуальность такой работы обусловлена необходимостью интерпретации данных наблюдений астрофизических объектов, а также необходимостью создания теоретической базы для будущих экспериментов по созданию непрозрачной релятивистской плазмы в

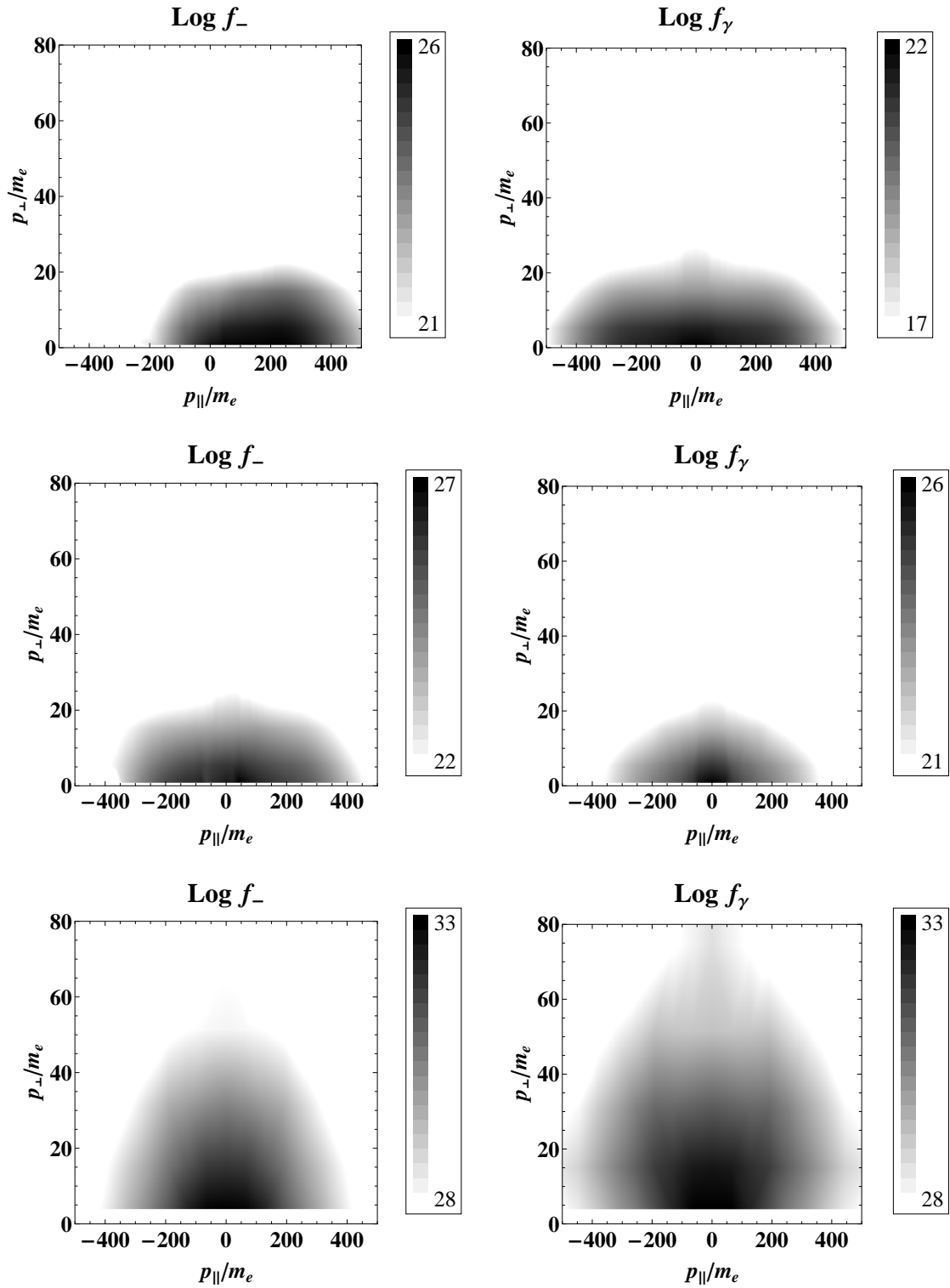


Рисунок 1. – Функции распределения электронов (слева) и фотонов (справа) для начального условия $E_0 = 100 E_c$. Вверху: $2, 3 t_c$, в центре: $2, 3 \times 10^2 t_c$, внизу: $4, 6 \times 10^6 t_c$

лаборатории. До настоящего момента исследование термализации релятивистской плазмы проводилось на качественном уровне, ввиду технической сложности решения уравнений Больцмана. Обсуждается роль электрон-позитронной плазмы в различных астрофизических явлениях. Приводятся основные параметры, характеризующие релятивистскую плазму. Формулируются уравнения Больцмана для однородной изотропной релятивистской плазмы, имеющие следующий вид:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial f_l}{\partial t} = \sum_q (\eta_l^q - \chi_l^q f_l), \quad (2)$$

где f_l – функции распределения,

η и χ – коэффициенты испускания и поглощения, соответственно,

индекс “ l ” обозначает сорт частиц,

индекс “ q ” нумерует реакции.

Это система связанных интегро-дифференциальных уравнений, которую можно решать численно. Вводится понятие кинетического равновесия. Обсуждаются потери энергии плазмы вследствие рождения пар нейтрино-антинейтрино. Формулируется общая теория термализации релятивистской плазмы, включая концепции теплового и кинетического равновесия. Обсуждается численное интегрирование уравнений Больцмана. Подход проиллюстрирован схемой конечных разностей на фиксированной сетке в 4-мерном фазовом пространстве, основанной на методе прямых. Этот метод сводит интегрирование уравнений в частных производных к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Последние решаются неявным методом Гира. Этот метод применим как в непрозрачных, так и в прозрачных областях. Приведены интегралы столкновений для различных двухчастичных взаимодействий между фотонами, электронами, позитронами и протонами записанные через матричные элементы, полученные в квантовой электродинамике. Вводятся также интегралы столкновений для трёхчастичных процессов. На нескольких примерах описан процесс термализации релятивистской плазмы [20]. Показано, что при учёте как двухчастичных, так и трёхчастичных реакций термодинамическое равновесие достигается независимо от начальных условий [21]. Показано, что в процессе термализации плазма сначала достигает метастабильного состояния

кинетического равновесия, в котором функция распределения имеет вид

$$f_i(\varepsilon) = \frac{2}{(2\pi\hbar)^3} \exp\left(-\frac{\varepsilon - \nu_i}{\theta_i}\right), \quad (3)$$

где k_b – постоянная Больцмана,

$$\nu_i = \frac{\varphi_i}{mc^2} - \text{безразмерный химический потенциал,}$$

$$\theta_i = \frac{k_B T_i}{mc^2} - \text{безразмерная температура,}$$

$$\varepsilon = \frac{\epsilon}{mc^2} - \text{безразмерная энергия частицы.}$$

Таким образом, функции распределения характеризуются одинаковыми химическими потенциалами φ и температурами θ частиц, причём химические потенциалы отличны от нуля. Отрицательные (положительные) значения химического потенциала приводят к увеличению (уменьшению) числа частиц при стремлении к термодинамическому равновесию. Поскольку полное число частиц увеличивается (уменьшается), энергия делится между большим (меньшим) количеством частиц, и, как следствие, температура плазмы уменьшается (увеличивается), см. рисунок 2. Ясно, что при достижении термодинамического равновесия химический потенциал фотонов стремится к нулю. Вертикальные линии соответствуют моментам времени достижения кинетического (левая) и термодинамического (правая) равновесия. Рассмотрены как чистая электрон-позитронная плазма, так и плазма с примесью протонов.

Вычислены времена релаксации к тепловому равновесию как функции двух основных параметров плазмы: полной плотности энергии и барионной нагрузки [19]. Обсуждается применение полученных результатов в теории гамма-всплесков [44]. Дана физическая интерпретация отличному от нуля химическому потенциалу фотонов. в состоянии кинетического равновесия плазмы.

В **главе 4** обсуждаются некоторые аспекты гидродинамики релятивистской плазмы в контексте явления гамма-всплесков. В настоящее время теория гамма-всплесков базируется на предположении о наличии в источнике гамма-всплеска плотной непрозрачной релятивистской плазмы, расширяющейся со временем вследствие радиационного давления. Расширение плазмы приводит к уменьшению плотности и, как следствие, её просветлению. До настоящего момента оставались нераскрытыми некоторые аспекты динамики расширения. В диссертации проясняются эти вопросы. Рассматривается сходство и различие между физическими условиями в

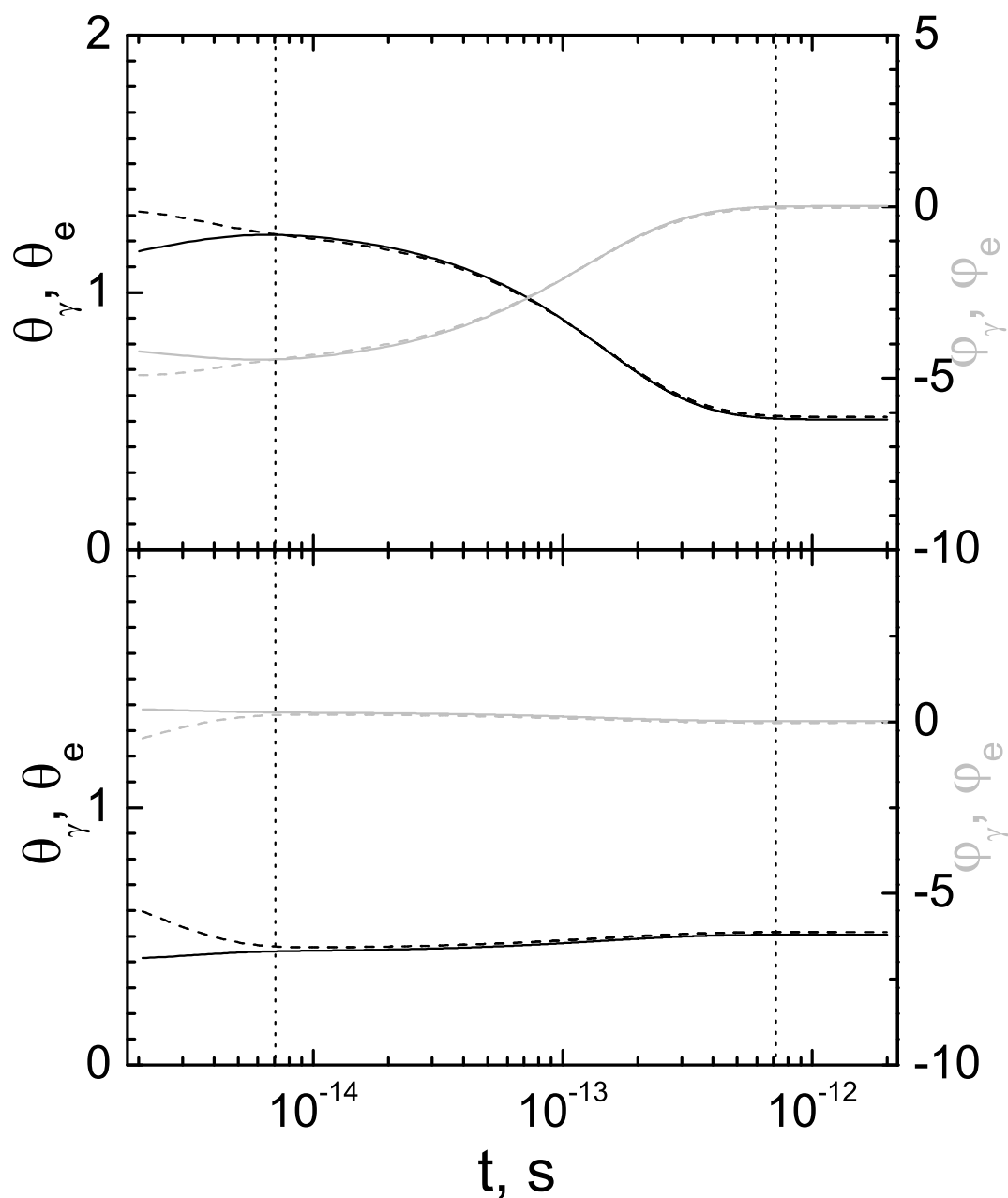


Рисунок 2. – Зависимость от времени безразмерных температур, измеряемых по левой оси (чёрный), и химических потенциалов, измеряемых по правой оси (серый), электронов (пунктирный) и фотонов (сплошной). Пунктирные вертикальные линии соответствуют моментам времени, когда достигаются кинетическое ($\sim 10^{-14}$ с) и термодинамическое ($\sim 10^{-12}$ с) равновесия. Верхний (нижний) рисунок соответствуют случаю, когда изначально присутствовали пары (фотоны)

электрон-позитронной плазме в ранней Вселенной и в источниках гамма-всплесков. Особое внимание уделяется: а) динамике, а именно тепловому ускорению сферического потока плазмы в источниках гамма-всплесков с одной стороны, и космологическому расширению с замедлением с другой; б) отличию в ядерном составе плазмы в ранней Вселенной и синтезу лёгких элементов с одной стороны, и возможной диссоциации тяжёлых элементов в плазме гамма-всплесков с другой; в) различным физическим условиям в момент последнего рассеяния фотонов на электронах [15]. Оказывается, что основным отличием в плане отщеплении фотонов от вещества является невозможность рекомбинации водорода в расширяющейся плазме гамма-всплесков. Получен нижний предел на температуру на фотосфере в модели оболочки

$$T_{\min}^{(s)} \simeq 42 (E_{54} R_8)^{-1/12} \text{ эВ}, \quad (4)$$

где $E_{54} = E_{iso}/10^{54}$ эрг – изотропная энергия гамма-всплеска,

$R_8 = R_0/10^8$ см – начальный размер плазмы.

Аналогичный предел в модели ветра имеет вид

$$T_{\min}^{(w)} \simeq 22 L_{50}^{-1/12} R_8^{1/6} \Delta t_1^{-1/3} \text{ эВ}, \quad (5)$$

где $L_{50} = L_{iso}/10^{50}$ эрг/с – изотропная светимость гамма-всплеска,

$t_1 = \Delta t/10$ с – длительность ветра.

Эти результаты оказываются нечувствительными к основным параметрам моделей, и всегда превышают энергию ионизации атома водорода $I = 13,6$ эВ. Обсуждаются два механизма размывания сферической оболочки, расширяющейся с ультрарелятивистской скоростью. Дана оценка величины размывания для гидродинамического и теплового механизмов. Показано, что при достаточно больших значениях параметра барионной нагрузки длительность сигнала фотосферного излучения не зависит от начального размера плазмы, а определяется только величиной гидродинамического размывания и может достигать нескольких секунд, что находится в согласии с наблюдениями [8]. На основе релятивистских уравнений Больцмана рассматривается динамика и наблюдательные характеристики для изначально ограниченной в сферической области электрон-позитронной плазмы пар макроскопического размера. Показана возможность гидродинамического описания динамики плазмы. Установлено, что фотосферное излучение плазмы в такой задаче имеет тепловой спектр [30, 1].

Заключительная **5 глава** диссертации, посвящена фотосферному излучению от сферических релятивистских потоков. В настоящий момент механизм генерации излучения на фотосфере рассматривается как лидирующий при объяснении излучения гамма-всплесков. Автором разработана теория такого фотосферного излучения. Вводятся основные понятия и обсуждаются основные модели гидродинамического расширения релятивистских потоков, использующиеся в теориях гамма-всплесков [14, 16, 23]. Вводится понятие оптической толщи потоков и даётся определение радиуса фотосферы. Строится теория фотосферного излучения от сферически симметричных релятивистских потоков. В рамках модели релятивистского ветра *конечной протяжённости* исследуются все асимптотики оптической толщи, имеющие вид

$$\tau = \begin{cases} \frac{1}{6}\tau_0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^3, & R_0 \ll R \ll \eta R_0, \\ \frac{1}{2\eta^2}\tau_0 \left(\frac{R_0}{R}\right), & \eta R_0 \ll R \ll \eta^2 l, \\ \tau_0 \frac{R_0 l}{R^2}, & R \gg \eta^2 l, \end{cases} \quad (6)$$

где начальная оптическая толщина определяется как

$$\tau_0 = \frac{\sigma E_0}{4\pi m_p c^2 R_0 l \eta} = \frac{\sigma L}{4\pi m_p c^3 R_0 \eta}, \quad (7)$$

σ – сечение рассеяния,

m_p – масса протона,

R_0 – область энерговыделения,

$\eta = E_0/(Mc^2)$ – безразмерная энтропия,

E_0 – выделенная энергия,

M барионная масса,

l – протяжённость потока,

L – светимость,

\dot{M} – скоростью выброса массы,

$R(t)$ – радиус внутренней границы потока.

Вычисляется радиус фотосферы, как функция параметров модели. Даётся классификация релятивистских потоков по отношению к фотосферному излучению, и вводятся понятия “фотонно-толстого” и “фотонно-тонкого” потоков. Исследована форма и динамика фотосферы как для потоков, расширяющихся с ускорением, так и для потоков, расширяющихся

баллистически. Предлагаются два метода расчёта кривых блеска и спектров для удалённого наблюдателя: метод “смазанной фотосферы” выводится из уравнения переноса, а уступающий ему в точности, но значительно более быстрый с вычислительной точки зрения метод “резкой фотосферы” выводится из метода “смазанной фотосферы” [10]. В частности, показано,

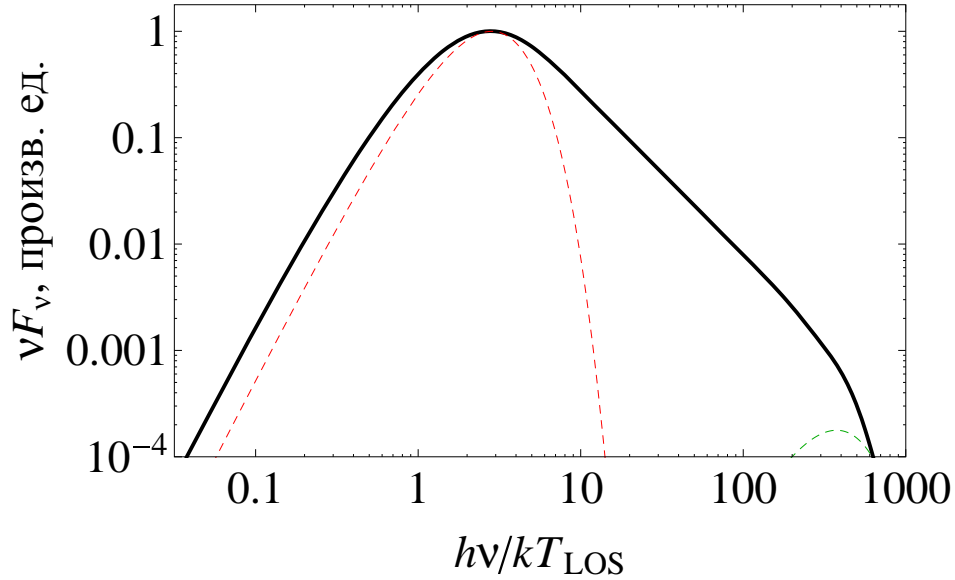


Рисунок 3. – Интегрированный по времени спектр фотосферного излучения фотонно-тонкого потока (толстая кривая, $\eta = 100$, $R_D = 10^5 R_0$), вместе с двумя мгновенными спектрами, соответствующими времени прибытия фотонов, испущенных на переходе между фазами ускорения и баллистического расширения (штриховая кривая справа) и времени диффузии (штриховая кривая слева)

что интегрированный по времени спектр фотосферного излучения описывается известной феноменологической функцией Банда, широко используемой при анализе наблюдательных данных гамма-всплесков, см. рисунок 3, имеющие фотонные индексы: для низких энергий $\alpha = 1$, а для высоких энергий $\beta \simeq -3, 5$. Приводятся результаты вычислений спектров и кривых блеска фотосферного излучения методом Монте-Карло, подтверждающие результаты теории фотосферного излучения. Рассмотрены отличия “фотонно-толстого” и “фотонно-тонкого” потоков и определены плотности вероятности последнего рассеяния фотонов в таких потоках [12, 6]. На рисунке 4 показан интегрированный по времени спектр фотосферного излучения для фотонно-толстого потока, полученный в различных приближениях. Для получения каждого спектра использовано 5×10^7 фотонов. Результаты, полученные в приближении размазанной фотосферы, находятся в хо-

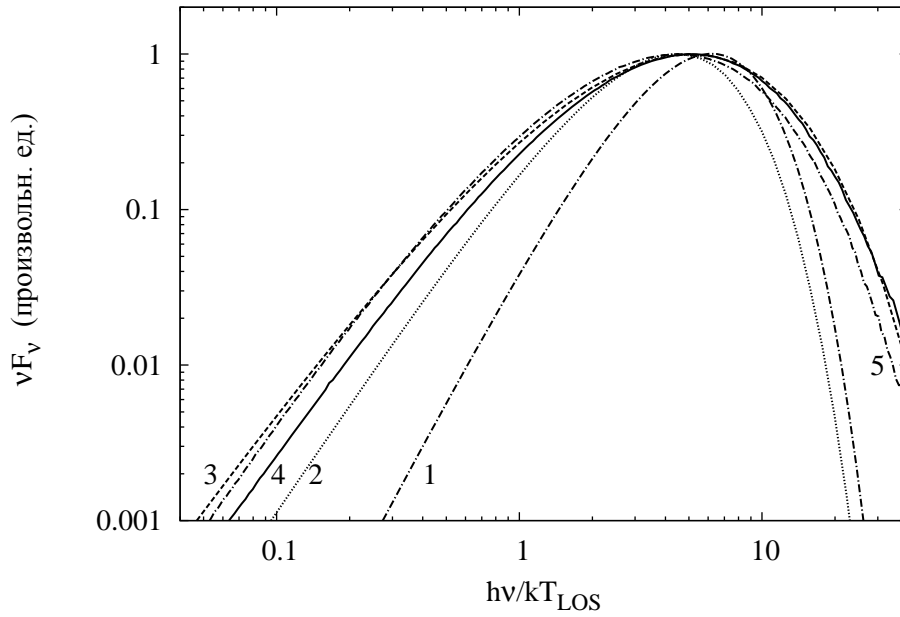


Рисунок 4. – Интегрированный по времени спектр фотосферного излучения от фотонно-толстого потока, вычисленный в различных приближениях: планковский спектр (1), резкая фотосферы (2), размазанная фотосферы (3), метод Монте-Карло для комптоновского рассеяния (4), метод Монте-Карло для когерентного рассеяния (5). T_{LOS} – лабораторная температура потока по лучу зрения на радиусе фотосферы

рошем согласия с результатами, полученными методом Монте-Карло. Последний даёт для показателя степени фотонного спектра в низких энергиях значения $\alpha = 0,24$ для комптоновского рассеяния и $\alpha = 0,19$ для когерентного рассеяния, что близко к значению $\alpha = 0$, найденному в работе [10]. На основе приближённого аналитического решения уравнений релятивистской гидродинамики исследуется фотосферное излучение от точечного взрыва, порождающего релятивистскую плазму. Найдены кривая блеска и спектр фотосферного излучения и показаны отличия спектра от планковского [9]. Рассматривается комптонизация фотонов в релятивистски расширяющейся среде. Обсуждаются условия, при которых комптонизованный спектр фотонов находится в согласии с наблюдениями гамма-всплесков [11, 7, 5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертации

1. Построена гидродинамическая модель рождения и осцилляций электрон-позитронных пар во внешнем электрическом поле с обратной связью, позволяющая учесть влияние рождённых пар на исходное внешнее поле. В рамках этой модели определены условия для существования плазменных осцилляций [18, 22, 43, 46].
2. Показано, что исследование осцилляций плазмы вследствие рождения электрон-позитронных пар может быть сведено к анализу одного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка для гидродинамической скорости. Установлена форма спектра тормозного излучения от осциллирующей электрон-позитронной плазмы. Показано, что характерный пик в спектре дипольного излучения, возникающего вследствие осцилляций пар, находится около плазменной частоты, но всегда ниже её [17].
3. На основе численного решения уравнений Максвелла и системы релятивистских кинетических уравнений для электрон-позитронных пар и фотонов и раскрыт механизм конверсии энергии из электрического поля в равновесную электрон-позитронную плазму. Показано, что относительный вклад различных компонент энергии изменяется со временем: с увеличением времени внутренняя энергия начинает доминировать над энергией покоя и кинетической энергией. Доказана изотропизация и термализация плазмы с течением времени [1, 13].
4. Представлено количественное описание термализации неравновесной релятивистской плазмы, на основе численного интегрирования релятивистских уравнений Больцмана с интегралами столкновений для двухчастичных и трёхчастичных реакций. Построена теория термализации, в которой, наряду с состоянием термодинамического равновесия, важную роль играет также метастабильное состояние системы, соответствующее кинетическому равновесию [1, 2, 4, 18, 20, 21, 25, 32, 34, 37, 39].
5. Впервые получены характерные времена термализации как функции полной плотности энергии и барионной нагрузки плазмы, изменяющихся в широком диапазоне. Показано, что эти времена могут отли-

- чатся от существующих в литературе оценок на порядки величины [1, 19].
6. Проведено сопоставление между электрон-позитронной плазмой в ранней Вселенной и источниках гамма-всплесков. Установлено важное отличие: в первом случае плазма рекомбинирует и испускает реликтовое излучение; во втором случае рекомбинация не происходит и плазма испускает фотосферное излучение [15, 23].
 7. Дана количественная оценка величины гидродинамического и теплового размывания сферической оболочки, расширяющейся с ультрарелятивистской скоростью. Показано, что при достаточно больших значениях параметра барионной нагрузки длительность сигнала фотосферного излучения не зависит от начального радиального размера плазмы, а определяется только величиной гидродинамического размывания [6, 8].
 8. На основе численного интегрирования релятивистских уравнений Больцмана для электрон-позитронных пар и фотонов исследована динамика и наблюдаемые характеристики излучения от изначально непрозрачного шара релятивистской плазмы макроскопических размеров. Установлено, что его фотосферное излучение имеет тепловой спектр [1, 28, 30].
 9. Сформулирована теория фотосферного излучения с единым подходом к ультрарелятивистским потокам, возникающим как при мгновенном, так и при постепенном энерговыделении. Исследована геометрия и динамика фотосферы в релятивистском сферически симметричном потоке конечной протяжённости. Предложена классификация потоков, на основании которой разработаны новые методы расчёта спектральных и фотометрических характеристик фотосферного излучения [1, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].
 10. Проведено моделирование взаимодействия фотонов со сферически симметричными ультрарелятивистскими потоками методом Монте-Карло и найдено хорошее согласие с представленной теорией фотосферного излучения. Показаны отличия фотонно-толстых и фотонно-тонких потоков, выраженные в различных зависимостях вероятности последнего рассеяния от радиуса [12, 24].
 11. Вычислены поток энергии и спектр фотосферного излучения для удалённого наблюдателя от точечного взрыва в вакууме, создающего ре-

лятивистскую плазму. Показано, что полученный спектр шире планковского, что позволяет осуществлять диагностику релятивистских источников по их спектру [9].

12. Показано, что комптонизация фотосферного излучения на ультрарелятивистских потоках может приводить к искажению формы спектра фотонов при низких энергиях. Получена зависимость температуры электронов от радиуса, при которой спектры фотосферного излучения находятся в согласии с наблюдениями гамма-всплесков [1, 5, 6, 11, 14].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертации носят теоретический характер и относятся к фундаментальным представлениям о взаимодействии вещества и излучения. Результаты глав 2 и 3 представляют интерес для планирования и осуществления будущих экспериментов по созданию непрозрачной релятивистской плазмы в лаборатории, а также для интерпретации данных астрофизических наблюдений. Результаты глав 3,4 и 5 используются в ICRANet в теоретических моделях астрофизических объектов, в частности, гамма-всплесков, а также для интерпретации данных наблюдений.

По результатам исследований, отражённых в диссертации, подготовлен курс “Релятивистская кинетическая теория”, читающийся в Нице (Франция) на протяжении нескольких лет в рамках международной программы IRAP PhD, частично финансируемой Европейским Союзом как проект “Erasmus Mundus Joint Doctorate Program” (2010-2017).

Подготовлена и опубликована в 2017 году монография “Relativistic kinetic theory” в издательстве Cambridge University Press.

Результаты диссертации могут быть использованы при чтении спецкурсов по кинетической теории и астрофизике в университетах Республики Беларусь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Список публикаций соискателя

Монографии

1. Vereshchagin, G. V. Relativistic Kinetic Theory / G. V. Vereshchagin, A. G. Aksenov. — Cambridge University Press, 2017 (334 pages).
2. Vereshchagin, G. V. Relativistic kinetic theory with some applications / G. V. Vereshchagin // Cosmology and Gravitation: XVth Brazilian School of Cosmology and Gravitation / Ed. by M. Novello, S. Perez Bergliaffa. — Cambridge Scientific Publishers, 2014 (40 pages).

Статьи в рецензируемых журналах

3. Ruffini, R. Thermal emission in the early afterglow of gamma-ray bursts from their interaction with supernova ejecta / R. Ruffini, G. V. Vereshchagin, Y. Wang // Astronomy and Astrophysics. — 2017. — Vol. 600. — P. A131 (7 pages).
4. Ruffini, R. Cosmic absorption of ultra high energy particles / R. Ruffini, G. V. Vereshchagin, S.-S. Xue // Astrophysics and Space Science. — 2016. — Vol. 361. — P. 82 (11 pages).
5. Aksenov, A. G. Radiative transfer in relativistic plasma outflows and comptonization of photons near the photosphere / A. G. Aksenov, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // Astronomy Reports. — 2015. — Vol. 59. — P. 418–424.
6. Vereshchagin, G. V. Physics of Nondissipative Ultrarelativistic Photospheres / G. V. Vereshchagin // International Journal of Modern Physics D. — 2014. — Vol. 23. — P. 1430003–125 (21 pages).
7. Siutsou, I. A. Relativistic spotlight / I. A. Siutsou, G. V. Vereshchagin // Physics Letters B. — 2014. — Vol. 730. — P. 190–192.
8. Ruffini, R. Spreading of ultrarelativistically expanding shell: An application to GRBs / R. Ruffini, I. A. Siutsou, G. V. Vereshchagin // New Astronomy. — 2014. — Vol. 27. — P. 30–33.
9. Bégué, D. Transparency of an instantaneously created electron-positron-photon plasma / D. Bégué, G. V. Vereshchagin // MNRAS. — 2014. — Vol. 439. — P. 924–928.

10. Ruffini, R. A Theory of Photospheric Emission from Relativistic Outflows / R. Ruffini, I. A. Siutsou, G. V. Vereshchagin // *The Astrophysical Journal*. — 2013. — Vol. 772. — P. 11 (10 pages).

11. Aksenov, A. G. Comptonization of photons near the photosphere of relativistic outflows / A. G. Aksenov, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // *MNRAS*. — 2013. — Vol. 436. — P. L54–L58.

12. Bégué, D. Monte Carlo Simulations of the Photospheric Emission in Gamma-Ray Bursts / D. Bégué, I. A. Siutsou, G. V. Vereshchagin // *The Astrophysical Journal*. — 2013. — Vol. 767. — P. 139 (5 pages).

13. Benedetti, A. Phase space evolution of pairs created in strong electric fields / A. Benedetti, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // *Physics Letters A*. — 2013. — Vol. 377. — P. 206–215.

14. Analysis of GRB 080319B and GRB 050904 within the Fireshell Model: Evidence for a Broader Spectral Energy Distribution / B. Patricelli, M. G. Bernardini, C. L. Bianco, L. Caito, G. de Barros, L. Izzo, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — Vol. 756. — P. 16 (15 pages).

15. Ruffini, R. Electron-positron plasma in GRBs and in cosmology / R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // *Il Nuovo Cimento*. — 2013. — Vol. C 36. — P. 255–266.

16. a New Spectral Energy Distribution of Photons in the Fireshell Model of GRBS / B. Patricelli, M. G. Bernardini, C. L. Bianco, L. Caito, L. Izzo, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin, // *International Journal of Modern Physics D*. — 2011. — Vol. 20. — P. 1983–1987.

17. On the frequency of oscillations in the pair plasma generated by a strong electric field / A. Benedetti, W.-B. Han, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // *Physics Letters B*. — 2011. — Vol. 698. — P. 75–79.

18. Ruffini, R. Electron-positron pairs in physics and astrophysics: From heavy nuclei to black holes / R. Ruffini, G. Vereshchagin, S.-S. Xue // *Physics Reports*. — 2010. — Vol. 487. — P. 1–140.

19. Aksenov, A. G. Pair plasma relaxation time scales / A. G. Aksenov, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // *Phys. Rev. E*. — 2010. — Vol. 81, № 4. — P. 046401 (5 pages).

20. Aksenov, A. G. Thermalization of the mildly relativistic plasma / A. G. Aksenov, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // *Phys. Rev. D*. — 2009. — Vol. 79, № 4. — P. 043008 (22 pages).

21. Aksenov, A. G. Thermalization of Nonequilibrium Electron-Positron-Photon Plasmas / A. G. Aksenov, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // *Physical Review Letters*. — 2007. — Vol. 99, № 12. — P. 125003 (5 pages).

22. Ruffini, R. Vacuum polarization and plasma oscillations / R. Ruffini, G. V. Vereshchagin, S.-S. Xue // *Physics Letters A*. — 2007. — Vol. 371. — P. 399–405.

23. Equations of motion, initial and boundary conditions for GRB / C. L. Bianco, R. Ruffini, G. Vereshchagin, S.-S. Xue // *J.Korean Phys.Soc.* — 2006. — Vol. 49. — P. 722–731.

Статьи в трудах конференций и школ

24. Bégué, D. On the Decoupling of Photons from Relativistically Expanding Outflows / D. Bégué, I. Siutsou, G. Vereshchagin // *Thirteenth Marcel Grossmann Meeting: On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories* / Ed. by K. Rosquist. — 2015. — P. 1760–1761.

25. Siutsou, I. A. On thermalization of electron-positron-photon plasma / I. A. Siutsou, A. G. Aksenov, G. V. Vereshchagin // *American Institute of Physics Conference Series*. — Vol. 1693 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2015. — P. 070007 (7 pages).

26. Ruffini, R. Photon Thick and Photon Thin Relativistic Outflows and GRBS / R. Ruffini, I. A. Siutsou, G. V. Vereshchagin // *Thirteenth Marcel Grossmann Meeting: On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories* / Ed. by K. Rosquist. — 2015. — P. 1748–1750.

27. Vereshchagin, G. Physics of Non-Dissipative Ultrarelativistic Photospheres / G. Vereshchagin // *Thirteenth Marcel Grossmann Meeting: On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories* / Ed. by K. Rosquist. — 2015. — P. 708–728.

28. Aksenov, A. G. Radiative Transfer Near the Photosphere of Mildly and Ultrarelativistic Outflows / A. G. Aksenov, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // *Thirteenth Marcel Grossmann Meeting: On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories* / Ed. by K. Rosquist. — 2015. — P. 1754–1756.

29. A New Spectral Energy Distribution of Photons in the Fireshell Model of GRBs / B. Patricelli, M. G. Bernardini, C. L. Bianco, L. Caito, L. Izzo, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin, // Twelfth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity / Ed. by A. H. Chamseddine. — 2012. — P. 1627–1630.

30. Dynamics and Emission of Mildly Relativistic Plasma / A. G. Aksenov, R. Ruffini, I. A. Siutsou, G. V. Vereshchagin // International Journal of Modern Physics Conference Series. — Vol. 12 of *International Journal of Modern Physics Conference Series*. — 2012. — P. 1–9.

31. High Energetic Gamma Ray Bursts and Their Spectral Properties Within the Fireshell Model / B. Patricelli, M. G. Bernardini, C. L. Bianco, L. Caito, L. Izzo, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // International Journal of Modern Physics Conference Series. — Vol. 12 of *International Journal of Modern Physics Conference Series*. — 2012. — P. 385–389.

32. Aksenov, A. G. Plasma Thermalization / A. G. Aksenov, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // Twelfth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity / Ed. by A. H. Chamseddine. — 2012. — P. 859–861.

33. Black Holes Energetics and GRBs / R. Ruffini, A. G. Aksenov, M.G. Bernardini, C. L. Bianco, L. Caito, P. Chardonnet, M. G. Dainotti, G. De Barros, R. Guida, L. Izzo, B. Patricelli, L. J. Rangel Lemos, M. Rotondo, J. A. Rueda Hernandez, G. V. Vereshchagin, S.-S. Xue // The Sun, the Stars, the Universe and General Relativity / Ed. by S. E. Perez Berliaffa, M. Novello, R. Ruffini. — 2011. — P. 67–164.

34. Aksenov, A. G. Kinetics of the mildly relativistic plasma and GRBs / A. G. Aksenov, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by R. Ruffini, G. Vereshchagin. — Vol. 1205 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2010. — P. 11–16.

35. The Blackholic energy and the canonical Gamma-Ray Burst IV: the “long,” “genuine short” and “fake-disguised short” GRBs / R. Ruffini, A. G. Aksenov, M.G. Bernardini, C. L. Bianco, L. Caito, P. Chardonnet, M. G. Dainotti, G. De Barros, R. Guida, L. Izzo, B. Patricelli, L. J. Rangel Lemos, M. Rotondo, J. A. Rueda Hernandez, G. V. Vereshchagin, S.-S. Xue // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by M. Novello, S. Perez. — Vol. 1132 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2009. — P. 199–266.

36. The canonical Gamma-Ray Bursts: long, “fake”-“disguised” and “genuine” short bursts / R. Ruffini, A. G. Aksenov, M.G. Bernardini,

C. L. Bianco, L. Caito, M. G. Dainotti, G. De Barros, R. Guida, G. V. Vereshchagin, S.-S. Xue // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by G. Giobbi, A. Tornambe, G. Raimondo [et al]. — Vol. 1111 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2009. — P. 325–332.

37. Aksenov, A. G. Thermalization of pair plasma with proton loading / A. G. Aksenov, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by G. Giobbi, A. Tornambe, G. Raimondo [et al]. — Vol. 1111 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2009. — P. 344–350.

38. Fireshell versus Fireball scenarios / G. de Barros, A. Aksenov, C. L. Bianco, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by Y.-F. Huang, Z.-G. Dai, B. Zhang. — Vol. 1065 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2008. — P. 234–237.

39. GRBs and the thermalization process of electron-positron plasmas / A. G. Aksenov, C. L. Bianco, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by M. Galassi, D. Palmer, E. Fenimore. — Vol. 1000 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2008. — P. 309–312.

40. On Gamma-Ray Bursts / R. Ruffini, M.G. Bernardini, C. L. Bianco, L. Caito, P. Chardonnet, C. Cherubini, M. G. Dainotti, F. Frascchetti, A. Geralico, R. Guida, B. Patricelli, M. Rotondo, J. A. Rueda Hernandez, G. V. Vereshchagin, S.-S. Xue // The Eleventh Marcel Grossmann Meeting On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Gravitation and Relativistic Field Theories / Ed. by H. Kleinert, R. T. Jantzen, R. Ruffini. — 2008. — P. 368–505.

41. The canonical Gamma-Ray Bursts and their “precursors” / R. Ruffini, A. G. Aksenov, M.G. Bernardini, C. L. Bianco, L. Caito, M. G. Dainotti, G. de Barros, R. Guida, G. V. Vereshchagin, S.-S. Xue // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by Y.-F. Huang, Z.-G. Dai, B. Zhang. — Vol. 1065 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2008. — P. 219–222.

42. The Equations of motion of the “fireshell” / C. L. Bianco, M. G. Bernardini, L. Caito, M. G. Dainotti, R. Guida, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin, S.-S. Xue // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by S. K. Chakrabarti, A. S. Majumdar. — Vol. 1053 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2008. — P. 259–265.

43. Ruffini, R. Vacuum polarization and electron-positron plasma oscillations / R. Ruffini, G. V. Vereshchagin, S.-S. Xue // *Relativistic Astrophysics* / Ed. by C. L. Bianco, S.-S. Xue. — Vol. 966 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2008. — P. 207–212.

44. Aksenov, A. G. Thermalization of Electron-Positron-Photon Plasmas with an application to GRB / A. G. Aksenov, R. Ruffini, G. V. Vereshchagin // *American Institute of Physics Conference Series*. — Vol. 966 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2008. — P. 191–196.

45. Baryonic Loading and e^+e^- Rate Equation in GRB Sources / R. Ruffini, C. L. Bianco, G. Vereshchagin, S.-S. Xue // *Relativistic Astrophysics Legacy and Cosmology - Einstein's Legacy* / Ed. by B. Aschenbach, V. Burwitz, G. Hasinger, B. Leibundgut. — 2007. — P. 402–407.

46. The Blackholic energy and the canonical Gamma-Ray Burst / R. Ruffini, M. G. Bernardini, C. L. Bianco, L. Caito, P. Chardonnet, M. G. Dainotti, F. Fraschetti, R. Guida, M. Rotondo, G. V. Vereshchagin, L. Vitagliano, S.-S. Xue // *XIIth Brazilian School of Cosmology and Gravitation* / Ed. by M. Novello, S. E. Perez Bergliaffa. — Vol. 910 of *American Institute of Physics Conference Series*. — 2007. — P. 55–217.

47. The Role of GRB 031203 in Clarifying the Astrophysical GRB Scenario / R. Ruffini, M. G. Bernardini, C. L. Bianco, L. Caito, P. Chardonnet, M. G. Dainotti, F. Fraschetti, R. Guida, G. V. Vereshchagin, S.-S. Xue // *The Obscured Universe. Proceedings of the VI INTEGRAL Workshop*. — Vol. 622 of *ESA Special Publication*. — 2007. — P. 561–569.



РЕЗЮМЕ**Верещагин Григорий Викторович****Кинетика, динамика и излучение релятивистской плазмы**

Ключевые слова: релятивистская кинетическая теория, электрон-позитронные пары, термализация плазмы, фотосферное излучение.

Цель работы: описание кинетических, гидродинамических и радиационных свойств релятивистской непрозрачной плазмы на основе кинетической теории.

Разработана гидродинамическая модель рождения и осцилляций электрон-позитронных пар во внешнем электрическом поле, учитывающая обратное влияние пар на исходное поле. Определены условия существования плазменных осцилляций. На основе релятивистских кинетических уравнений и уравнений Максвелла описан процесс конверсии энергии из электрического поля в равновесную электрон-позитронную плазму.

Для описания кинетики неравновесной непрозрачной релятивистской плазмы разработан метод численного решения релятивистских уравнений Больцмана, использующий для интегралов столкновений матричные элементы квантовой электродинамики. Построена теория термализации, в которой важную роль играет понятие кинетического равновесия. Впервые получены характерные времена установления кинетического и термодинамического равновесия как функции основных параметров плазмы.

Исследованы механизмы размывания сферической оболочки, расширяющейся с релятивистской скоростью. Дана количественная оценка величины гидродинамического и теплового размывания. Показано, что при достаточно больших значениях параметра барионной нагрузки длительность сигнала фотосферного излучения определяется только величиной гидродинамического размывания.

Сформулирована теория фотосферного излучения ультрарелятивистских потоков конечной протяжённости. Предложена классификация потоков, на её основе разработаны новые методы расчёта спектральных и фотометрических характеристик фотосферного излучения. Показано, что комптонизация излучения приводит к искажению формы спектра. Найдены условия, при которых спектры фотосферного излучения находятся в согласии с наблюдениями гамма-всплесков.

Область применения: релятивистская кинетика и астрофизика.

РЭЗІЮМЭ

Верашчагін Рыгор Віктаравіч

Кінетыка, дынаміка і выпраменьванне рэлятывісцкай плазмы

Ключавыя словы: рэлятывісцкай кінетычная тэорыя, электрон-пазітронныя пары, тэрмалізацыя плазмы, фатасфернае выпраменьванне.

Мэта даследвання: апісанне кінэтычных, гідрадынамічных і радыяцыйных уласцівасцяў рэлятывісцкай непразрыстай плазмы на аснове кінэтычнай тэорыі.

Распрацавана гідрадынамічная мадэль нараджэння і асцыляцый электрон-пазітронных пар ў вонкавым электрычным полі, якая ўлічвае адваротны ўплыў пар на зыходнае поле. Вызначаны ўмовы існавання плазменных асцыляцый. На аснове рэлятывісцкіх кінэтычных раўнанняў і раўнанняў Максвелла апісаны працэс канверсіі энергіі з электрычнага поля ў раўнаважкую электрон-пазітронную плазму.

Для апісання кінетыкі нераўнаважнай непразрыстай рэлятывісцкай плазмы распрацаваны метады колькаснага рашэння рэлятывісцкіх раўнанняў Больцмана, які выкарыстоўваюць для інтэгралаў сутыкненняў матрычныя элементы квантавай электрадынамікі. Пабудавана тэорыя тэрмалізацыі, у якой важную ролю адыгрывае паняцце кінэтычнай раўнавагі. Упершыню атрыманы характэрныя часы ўсталявання кінэтычнай і тэрмадынамічнай раўнавагі як функцыі асноўных параметраў плазмы.

Даследаваны механізмы размывання сферычнай абалонкі, якая папыраецца з рэлятывісцкай хуткасцю. Дана колькасная ацэнка велічыні гідрадынамічнага і цеплавога размывання. Паказана, што пры дастаткова вялікіх значэннях параметру бар'ённай нагрузкі працягласць сігналу фатасфернага выпраменьвання вызначаецца толькі велічынёй гідрадынамічнага размывання.

Сфармуляваная тэорыя фатасфернага выпраменьвання ультрарэлятывісцкіх патокаў канчатковай працягласці. Прапанавана класіфікацыя патокаў, на яе аснове распрацаваны новыя метады разліку спектральных і фотаметрычных характарыстык фатасфернага выпраменьвання. Паказана, што кампанізацыя выпраменьвання прыводзіць да скажэння формы спектру. Знойдзеныя ўмовы, пры якіх спектры фатасфернага выпраменьвання знаходзяцца ў згодзе з назіраннямі гама-воплескаў.

Вобласць ужывання: рэлятывісцкая кінетыка і астрафізіка.

SUMMARY

Vereshchagin Gregory Viktorovich

Kinetics, hydrodynamics and radiation of relativistic plasma

Key words: relativistic kinetic theory, electron-positron pairs, plasma thermalization, photospheric emission.

The aim of the work is the description of kinetic, hydrodynamic and emission properties of relativistic opaque plasma based on kinetic theory.

Hydrodynamic model of creation and oscillation of electron-positron pairs in external electric field is developed, which takes into account backreaction of pairs on external field. The conditions for oscillation existence are determined. The process of energy conversion from electric field into thermalized electron-positron plasma is analyzed based on relativistic kinetic equations and Maxwell equations.

A new method of numerical solution of relativistic Boltzmann equations is developed for kinetic description of out of equilibrium opaque relativistic plasma, which uses for collision integrals matrix elements of quantum electrodynamics. A theory of thermalization is proposed, where the notion of kinetic equilibrium plays an important role. Characteristic time scales for establishment of kinetic and thermal equilibrium as functions of basic plasma parameters are obtained for the first time.

Spreading mechanisms of relativistically expanding relativistic shell are studied. Quantitative estimates for hydrodynamic and thermal spreading are given. It is shown, that for relatively large baryonic loading the duration of the photospheric emission depends only on the amount of hydrodynamic spreading.

A theory of photospheric emission from ultrarelativistic outflows is formulated. A classification of outflows is presented. Based on this classification new methods for calculation of spectral and photometric characteristics of the photospheric emission are developed. It is shown, that comptonization of radiation leads to spectral distortion. Conditions, leading to spectra of photospheric emission compatible with observations of gamma-ray bursts are determined.

Application domain of obtained results includes relativistic kinetic theory and astrophysics.

ВЕРЕЩАГИН Григорий Викторович

**КИНЕТИКА, ДИНАМИКА И ИЗЛУЧЕНИЕ
РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ПЛАЗМЫ**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.02 - теоретическая физика

Подписано в печать “ ____ ” _____ г. Формат 60 x 90 1/16

Бумага офисная. Печать офсетная. Печ. л. 2.2

Учетн. изд. л. 1.7. Тираж 60 экз. Заказ №

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,

220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68.

Отпечатано на ризографе Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, лицензия ЛП № 20 от 27.05.2003 г.