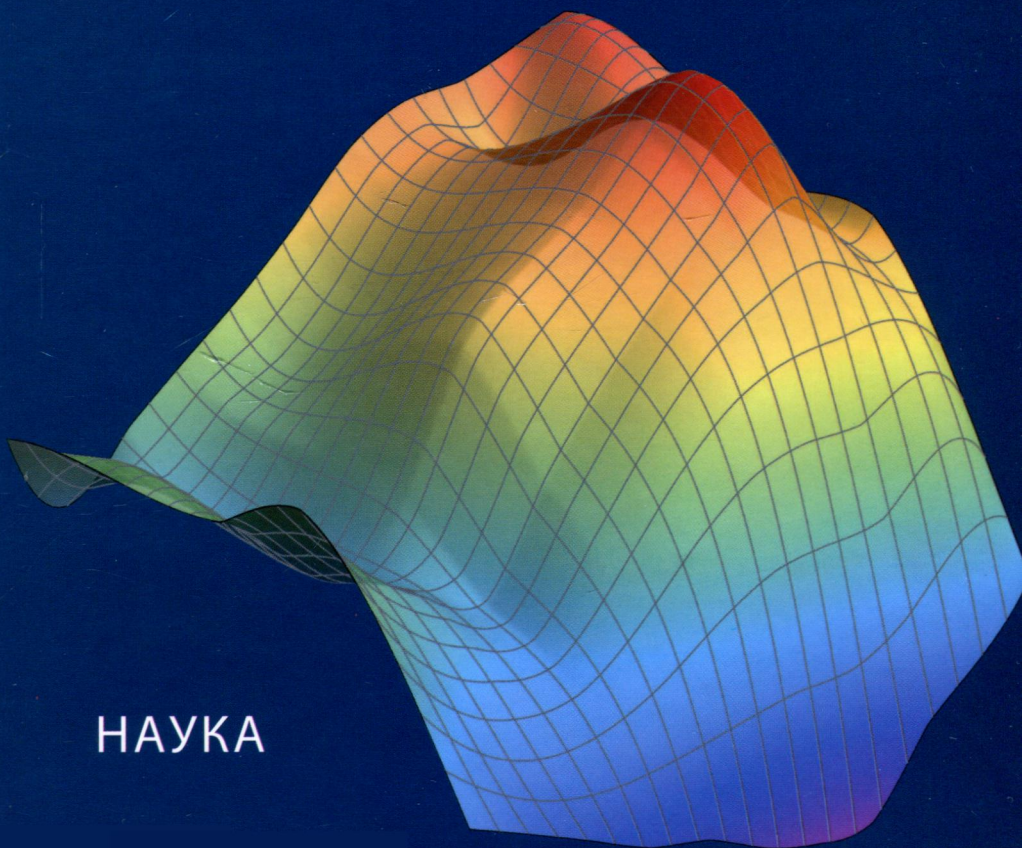


Г.В. Верещагин А.Г. Аксенов

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

с приложениями
в астрофизике
и космологии



НАУКА

Г.В. Верещагин А.Г. Аксенов

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

с приложениями
в астрофизике
и космологии



МОСКВА НАУКА 2018

УДК 524

ББК 22.38; 22.382; 22.193

В31



*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 18-12-00027, не подлежит продаже*

Верещагин Г.В., Аксенов А.Г.

Релятивистская кинетическая теория с приложениями в астрофизике и космологии / Г.В. Верещагин, А.Г. Аксенов. — М. : Наука, 2018. — 471 с. — ISBN 978-5-02-040144-0

Релятивистская кинетика широко применяется в астрофизике и космологии. В последние годы интерес к этой теории вырос, поскольку появилась возможность ставить эксперименты при таких условиях, где релятивистские эффекты становятся существенными. Настоящая монография состоит из трех частей. В первой части представлены основные идеи и концепции, уравнения и методы теории, включая вывод кинетических уравнений из релятивистской цепочки Боголюбова, а также соотношение кинетического и гидродинамического описаний. Вторая часть — это введение в вычислительную физику, причем особое внимание уделяется численному интегрированию уравнений Больцмана и смежным вопросам, а также многокомпонентной гидродинамике. В третьей части дан обзор приложений, который охватывает вопросы ковариантной теории отклика, термализации плазмы, комптонизации в статических и динамических средах, кинетики самогравитирующих систем, образования структуры в космологии и излучения нейтрино при гравитационном коллапсе.

Для студентов старших курсов университетов, аспирантов и исследователей, специализирующихся в области теоретической физики, астрофизики и космологии.

ISBN 978-5-02-040144-0

© Верещагин Г.В., Аксенов А.Г.,
2018

© ФГУП Издательство «Наука»,
редакционно-издательское
оформление, 2018

Оглавление

От авторов	3
Благодарности	4
Принятые сокращения и определения	5
Введение	7
ЧАСТЬ I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ	15
Глава 1. Основные концепции	17
1.1. Нерелятивистская кинетическая теория	17
1.2. Кинетика в специальной теории относительности	19
1.3. Общерелятивистская кинетическая теория	20
1.4. Одночастичная функция распределения	21
1.5. Инвариантность одночастичной функции распределения	22
1.6. Макроскопические величины	24
Глава 2. Кинетическое уравнение	26
2.1. Формулировка кинетического уравнения	26
2.2. Интеграл столкновений для рассеяния частиц	28
2.3. Уравнение Больцмана в общей теории относительности	30
2.4. Квантовые поправки к интегралам столкновений	32
2.5. Перенос излучения	33
2.6. Сечение рассеяния	36
2.7. Время релаксации	38

Глава 3. Усреднение	39
3.1. Ковариантное статистическое усреднение	39
3.2. Усреднение по пространству-времени	41
3.3. Роль усреднения в кинетической теории	42
Глава 4. Законы сохранения и равновесие	44
4.1. Законы сохранения и релятивистская гидродинамика	44
4.2. \mathcal{H} -теорема	47
4.3. Равновесие	49
4.4. Релятивистское распределение Максвелла.	53
4.5. Обобщенное уравнение непрерывности	54
Глава 5. Релятивистская цепочка Боголюбова	56
5.1. Иерархия кинетических уравнений	56
5.2. Первое и второе приближения в релятивистских уравнениях переноса.	62
5.3. Система Власова—Максвелла.	63
5.4. Система Эйнштейна—Власова	67
Глава 6. Основные параметры в газах и плазмах	69
6.1. Плазменная частота	69
6.2. Корреляции в плазме	70
6.3. Кулоновское рассеяние	72
6.4. Характерные длины	74
6.5. Микроскопические масштабы в кинетической теории и гидродинамике	76
6.6. Релятивистское вырождение	77

ЧАСТЬ II. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ. 79**Глава 7. Основы вычислительной физики 81**

7.1. Конечные разности и вычислительная сетка . . . 82

7.2. Устойчивость и точность разностных схем 85

7.3. Численные методы для уравнений в частных
производных 89

7.4. Метод прямых 110

7.5. Система ОДУ и методы их решения 110

7.6. Жесткие системы и метод Гира 114

7.7. Численные методы линейной алгебры 119

Глава 8. Прямое интегрирование уравнений**Больцмана 125**

8.1. Конечные разности и метод прямых 125

8.2. Метод Монте-Карло 131

Глава 9. Многомерная гидродинамика. 1409.1. Годуновские схемы высокого порядка
точности. 1419.2. Многомерная многотемпературная
годуновская схема высокого порядка точности. . . 1459.3. Решение задачи Римана в специальной теории
относительности 164

9.4. Методы на основе частиц 168

ЧАСТЬ III. ПРИЛОЖЕНИЯ. 177**Глава 10. Дисперсия волн в релятивистской****плазме 179**

10.1. Бесстолкновительная плазма 182

10.2. Отклик в изотропном случае 183

10.3. Дисперсия в равновесной релятивистской плазме	185
10.4. Затухание Ландау.	187
10.5. Плазменные неустойчивости	190
10.6. Неустойчивость Вейбеля.	192
10.7. Двухпоточковая неустойчивость	196
10.8. Бесстолкновительные ударные волны	198
Глава 11. Термализация релятивистской плазмы.	201
11.1. Плазма пар в астрофизике и космологии.	201
11.2. Качественное описание плазмы пар.	205
11.3. Интегралы столкновений	206
11.4. Релятивистское уравнение Больцмана на сетке	223
11.5. Процесс термализации	224
11.6. Времена термализации	232
11.7. Динамика и излучение умеренно релятивистской плазмы.	238
11.8. Кинетическое равновесие и химический потенциал фотонов	243
Глава 12. Кинетика частиц в сильных полях	245
12.1. Лавины в сильных лазерных полях.	247
12.2. Рождение и термализация пар в сильных электрических полях	250
12.3. Излучение горячей голой кварковой звезды	267
Глава 13. Комптоновское рассеяние в астрофизике и космологии.	273
13.1. Уравнение Больцмана для комптоновского рассеяния.	274

13.2. Среднее число рассеяний	275
13.3. Уравнение Компанейца.	277
13.4. Эффект Сюняева—Зельдовича.	283
13.5. Комптонизация в статической среде	289
13.6. Комптонизация в релятивистских потоках	292
13.7. Расчет фотосферного излучения от релятивистских потоков методом Монте-Карло	297
Глава 14. Самогравитирующие системы	305
14.1. Кинетическая теория самогравитирующих систем	307
14.2. Гравитационная неустойчивость	320
14.3. Бесстолкновительная (бурная) релаксация	339
14.4. Квазистационарные состояния	344
14.5. Самогравитирующие системы в равновесии.	347
14.6. Космологическое формирование структуры	354
Глава 15. Нейтрино, гравитационный коллапс и сверхновая	356
15.1. Модели сверхновой и нейтрино	356
15.2. Сферически-симметричный коллапс железного ядра с нейтринным переносом	361
15.3. Механизм взрыва сверхновой с учетом крупномасштабной конвекции и переноса нейтрино	373
Приложение А. Уравнения гидродинамики в ортогональных криволинейных координатах	378

Приложение В. Интегралы столкновений в электрон-позитронной плазме	381
В.1. Интегралы столкновений для двухчастичных реакций	381
В.2. Интегралы столкновений для двухчастичных реакций с участием протонов	390
В.3. Интегралы столкновений для тройных взаимодействий	393
В.4. Масштабирование массы для реакций протонов и пар	396
Приложение С. Интегралы столкновений для слабого взаимодействия	398
С.1. Рассеяние нейтрино на электронах	398
С.2. Поглощение нейтрино нейтронами	401
С.3. Рождение нейтрино	403
Литература	405
Предметный указатель	456