

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени В. Н. КАРАЗИНА

Серия «Проблемы теоретической
и математической физики»

ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Научные труды

Выпуск 1

Под редакцией профессора В. М. Куклина

Харьков – 2014

УДК 53.01
ББК 22.3
П-78

Серия «Проблемы теоретической и математической физики. Научные труды»
под общей редакцией академика А. Г. Загороднего, академика Н. Ф. Шульги
Выпуск 1 под редакцией проф. В. М. Куклина

Рецензенты:

почетный директор ИРЭ НАН Украины, академик НАН Украины,
доктор физ.-мат. наук, профессор **Яковенко В. М.**;
директор ФТИНТ НАН Украины, академик НАН Украины, доктор
физ.-мат. наук, профессор **Гнатченко С. Л.**

*Утверждено к печати решением Ученого совета
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина
(протокол № 10 от 3.11.2014 г.)*

П-78 **Проблемы** теоретической физики. Научные труды / В. А. Буц,
А. Г. Загородний, В. Е. Захаров, В. И. Карась, В. М. Куклин, А. В. Тур,
С. П. Фомин, Н. Ф. Шульга, В. В. Яновский ; ред. вып. В. М. Куклин. – Х. : ХНУ
имени В. Н. Каразина, 2014. – Вып. 1. – 532 с. (Сер. «Проблемы теоретической и
математической физики» ; под общ. ред. А. Г. Загороднего, Н. Ф. Шульги).

ISBN 978-966-285-144-1

Рассмотрены процессы излучения потоков заряженных частиц и осцилляторов. Представлены механизмы повышения частоты и степени когерентности излучения. Описаны механизмы прямого преобразования энергии частиц среды в электрическую энергию. Исследуются явления переноса, обусловленные вихревыми структурами в двумерной гидродинамике, плазме и квантовых жидкостях, особенности тормозного излучения релятивистских электронов в случае, когда существенное влияние на процесс оказывает многократное рассеяние.

Для ученых в области естествознания, преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов физических факультетов.

**УДК 53.01
ББК 22.3**

ISBN 978-966-285-144-1

© Национальная академия наук Украины, 2014
© Харьковский национальный университет имени
В. Н. Каразина, 2014
© Буц В. А., Загородний А. Г., Захаров В. Е.,
Карабась В. И., Куклин В. М., Тур А. В.,
Фомин С. П., Шульга Н. Ф.,
Яновский В. В., 2014
© Дончик И. Н., макет обложки, 2014

О ГЛАВЛЕНИЕ

От редакторов научных трудов	9
От авторов выпуска	11

ЧАСТЬ I. ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

В НЕРАВНОВЕСНЫХ СРЕДАХ

А. Г. Загородний, В. М. Куклин	13
--------------------------------------	----

ВВЕДЕНИЕ

14

РАЗДЕЛ 1. Излучение в инвертированных средах

18

1.1. Двухуровневая система	18
----------------------------------	----

1.2. Сверхизлучение	21
---------------------------	----

1.3. Новый порог индуцированного излучения	22
--	----

1.4. Генерация когерентных импульсов	26
--	----

1.5. Роль нелокальности взаимодействия	30
--	----

1.6. Режим постоянной накачки	31
-------------------------------------	----

1.7. Спонтанные и индуцированные эффекты	
--	--

в процессах излучения и поглощения	32
--	----

1.8. Излучение и поглощение высокоэнергетичных квантов	
--	--

осцилляторами, захваченными в потенциальные ямы.....	33
--	----

1.9. Учет процессов релаксации НЧ возбуждений	
---	--

в сплошных средах	37
-------------------------	----

РАЗДЕЛ 2. Излучение и поглощение при развитии пучковой

неустойчивости в плазме

40

2.1. Спонтанное излучение частиц электронного пучка в плазме	40
--	----

2.2. Случайное или регулярное спонтанное излучение?	42
---	----

2.3. Учет индуцированных процессов	43
--	----

2.4. Затухание Ландау	46
-----------------------------	----

2.5. Рост флуктуаций при приближении к порогу неустойчивости ...	46
--	----

2.6. Уровень шума.....	47
------------------------	----

2.7. Развитие неустойчивости	48
------------------------------------	----

2.8. Обратное воздействие излучения на пучок. Влияние спонтанных	
--	--

процессов на развитие пучковой неустойчивости	48
---	----

2.9. Особенности динамики развитой кинетической	
---	--

неустойчивости в одномодовом режиме.....	50
--	----

2.10. Модулированные пучки	51
2.11. Реактивная гидродинамическая неустойчивость в одномодовом режиме.....	52
2.12. Диссипативная гидродинамическая неустойчивость.....	53
2.13. Многомодовые режимы гидродинамических пучковых неустойчивостей.....	54
2.14. Режимы сверхизлучения сгустков заряженных частиц.....	55
2.15. О применимости описания.....	61
2.16. О динамике протяженных сгустков-пучков заряженных частиц.....	64
РАЗДЕЛ 3. Описание многоволновых взаимодействий	65
3.1. О характере возбуждения длинноволнового излучения пакетами ВЧ волн.....	65
3.2. Об интерпретации спонтанного излучения токами	66
3.3. Спонтанные и индуцированные эффекты в рамках трехвольнового взаимодействия.....	67
3.4. Об описании процессов самовоздействия.....	72
3.5. Процессы в турбулентной среде	74
Заключение	74
Список литературы	77
 ЧАСТЬ II. МЕХАНИЗМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ И СТЕПЕНИ КОГЕРЕНТНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ 82	
V. А. Буц.....	82
ВВЕДЕНИЕ	83
ГЛАВА I. Механизмы возбуждения коротковолнового излучения	87
РАЗДЕЛ 1. Возбуждение высоких номеров гармоник нерелятивистскими осцилляторами	87
1.1. Умножение частоты при отражении излучения от движущихся границ	90
1.2. Качественная теория излучения высоких номеров гармоник нерелятивистскими осцилляторами	92
1.3. Строгая теория излучения осциллятора при наличии слабой периодической неоднородности диэлектрической проницаемости	95
1.4. Квантовая теория излучения нерелятивистских осцилляторов в периодических потенциалах	102
1.5. Излучение потока осцилляторов	114
1.6. Экспериментальные исследования возбуждения высоких номеров гармоник нерелятивистскими осцилляторами.....	122
1.7. Выводы.....	124
РАЗДЕЛ 2. Преобразование энергии низкочастотных колебаний в энергию высокочастотных с помощью использования эффектов вторичных резонансов	128
2.1. Постановка задачи и общие уравнения	129
2.2. Динамика систем без вырождения	130

2.3. Динамика систем с вырождением	131
2.4. Связанные линейные осцилляторы.....	132
2.5. Системы с бесконечным числом степеней свободы.....	135
2.6. Параметрическое усиление рентгеновского излучения в кристаллах	139
2.7. Распространение волн в гиротропных средах	141
2.8. Необходимость наличия невзаимности в коэффициентах связи.....	145
2.9. Низкочастотные нормальные частоты ансамбля связанных линейных осцилляторов.....	149
2.10. Преобразование энергии НЧ шумовых колебаний в энергию ВЧ- колебаний	152
2.11. Выводы	165
РАЗДЕЛ 3. Создание ансамбля долгоживущих высоковозбужденных квантовых и классических систем на основе использования квантового эффекта Зенона и эффекта квантовой юлы.....	166
3.1. Квантовый эффект Зенона	169
3.2. Эффект квантовой юлы	171
3.3. Подавление синхротронного излучения	175
3.4. Подавление пучковых неустойчивостей.....	179
3.5. Подавление распадных и взрывных неустойчивостей.....	183
3.6. Экспериментальные исследования эффекта квантовой юлы	190
3.7. Механизм юлы в классической механике	196
3.8. Выводы	197
ГЛАВА II. Преобразование потоков некогерентного излучения в потоки излучения с высокой степенью когерентности и с высокой плотностью энергии.....	198
РАЗДЕЛ 4. Преобразование потоков излучения при рассеянии на периодически неоднородных средах	199
4.1. Постановка задачи. Основные уравнения	200
4.2. Рассеивание волн на периодически неоднородном полупространстве	205
4.3. Рост уровня когерентности при рассеянии волн на периодически-неоднородной среде	207
4.4. Рост степени когерентности рентгеновского излучения при распространении в идеальных кристаллах.	
Обобщение формулы Ван-Циттерта-Цернике	209
4.5. Многоволновая дифракция	213
4.6. Выводы	215
РАЗДЕЛ 5. Плохая обусловленность второго начала термодинамики	217
5.1. Второе начало термодинамики.....	219
5.2. «Плохая обусловленность» второго начала	224
5.3. «Липкость» стохастических слоев и особенности динамики частиц	227

5.4. Пример плохой обусловленности второго начала.	
Динамика трехволнового взаимодействия	233
5.5. Выводы.....	237
Заключение	239
Список литературы	244
ЧАСТЬ III. НЕРАВНОВЕСНЫЕ КОЛМОГОРОВСКОГО ТИПА	
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ 248	
В. Е. Захаров, В. И. Карась	248
ВВЕДЕНИЕ.....	249
РАЗДЕЛ 1. Теоретические исследования стационарных	
неравновесных функций распределения частиц	
с потоком по спектру	253
1.1. Точные решения для интеграла столкновений Ландау	255
1.2. Точные решения для интеграла столкновений Больцмана.....	256
1.3. Условия формирования стационарных неравновесных	
функций распределения частиц в конечных	
энергетических интервалах	259
РАЗДЕЛ 2. Теоретические исследования нестационарных	
неравновесных функций распределения частиц	
с потоком по спектру	266
2.1. Численное моделирование формирования функций	
распределения для уравнений типа Ландау–Фоккера–Планка.....	266
<i>2.1.1. Полностью консервативные разностные схемы</i>	
для уравнений типа Ландау –Фоккера–Планка.....	267
<i>2.1.2. Релаксация функции распределения, сравнение</i>	
результатов численного моделирования с аналитическими	
выражениями для уравнения Ландау–Фоккера–Планка	278
2.2. Численное моделирование формирования	
неравновесных функций распределения частиц	
для стационарных согласованных источников и стоков	287
2.3. Численное моделирование формирования неравновесных	
функций распределения частиц для нестационарных	
несогласованных источников и стоков	299
2.4. Механизм формирования электронной функции	
распределения при взаимодействии потоков	
электромагнитного излучения и быстрых	
заряженных частиц с твердотельной плазмой.....	303
РАЗДЕЛ 3. Экспериментальные исследования	
неравновесных функций распределения частиц..... 306	
3.1. Экспериментальные исследования неравновесных	
функций распределения электронов эмиссии,	
индуцируемой лазерным излучением	307
3.2. Экспериментальные исследования неравновесных	
функций распределения электронов эмиссии, индуцируемой	
потоками быстрых ионов	308

<i>3.2.1. Исследования кинетической электронной эмиссии из металлов</i>	312
<i>3.2.2. Исследования кинетической электронной эмиссии из полупроводников</i>	317
<i>3.3. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования формирования неравновесных функций распределения частиц.....</i>	323
РАЗДЕЛ 4. Прямое преобразование кинетической энергии частиц в электрическую энергию на основе неравновесных распределений частиц.....	328
4.1. Непосредственное преобразование ядерной энергии в электрическую	328
4.2. Вторично-эмиссионный радиоизотопный источник тока.....	332
РАЗДЕЛ 5. Кинетика электрон-фононной системы кристалла, находящегося в сильном электрическом поле	337
5.1. Кинетическое описание эффекта электропластической деформации.....	338
5.2. Математическая модель	339
5.3. Результаты численного моделирования и их обсуждение.....	344
Заключение	351
Список литературы.....	352
ЧАСТЬ IV. ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ДВУМЕРНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ	357
A. B. Тур, B. B. Яновский	357
РАЗДЕЛ 1. Модели плоских вихревых движений (вместо введения)..	359
РАЗДЕЛ 2. Теория движения точечных сингулярностей в двумерной идеальной гидродинамике	364
2.1. Уравнения движения 2D сингулярностей	364
2.2. Свойства системы взаимодействующих вихрей	369
РАЗДЕЛ 3. Движение точечных вихрей	373
3.1. О точной интегрируемости системы двух и трех вихрей.....	373
3.2. О возможных режимах движения вихрей.....	374
РАЗДЕЛ 4 . Эволюция точечного обычного вихря и точечного дипольного вихря.....	377
4.1. Уравнения движения взаимодействующих точечного вихря и точечного дипольного вихря.....	377
4.2. Режимы взаимодействия	382
РАЗДЕЛ 5. Движение дипольного точечного вихря в областях с границами.....	390
5.1. Функция тока точечного дипольного вихря у плоской границы и в углу.....	391
5.2. Уравнение движения у плоской границы.....	394
5.3. Уравнение движения в прямоугольном углу	399

РАЗДЕЛ 6. Нетривиальные вихревые конфигурации.....	401
6.1. Интегрирование стационарных уравнений Эйлера.....	402
6.2. Точные стационарные решения	405
РАЗДЕЛ 7. Стационарные вихревые конфигурации со сложными особыми точками.....	412
7.1. Обобщение анзаца стационарности	413
7.2. Стационарные решения со сложными особыми точками	417
7.3. Сложные особые точки	425
РАЗДЕЛ 8. Спиральные квазидвумерные крупномасштабные вихри	430
8.1. Крупномасштабная неустойчивость, приводящая к генерации спиральных вихревых структур	431
8.2. Уравнения нелинейной теории генерации крупномасштабных вихревых структур	433
8.3. Линейная теория генерации крупномасштабных вихревых структур.....	444
8.4. Нелинейные спиральные вихревые структуры	445
РАЗДЕЛ 9. Точечные вихри в дваждыкостной гидродинамике плазмы	448
9.1. Уравнения для функции тока точечных вихрей.....	449
9.2. Электронный и ионный вихри	458
9.3. Уравнения движения точечных плазменных вихрей	460
Заключение	468
Список литературы	471
ЧАСТЬ V. ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ.....	474
Н. Ф. Шульга, С. П. Фомин	474
ВВЕДЕНИЕ	475
РАЗДЕЛ 1. Длина когерентности процесса излучения	478
1.1. Возможность интерференционного эффекта при больших энергиях	478
1.2. Учет экранировки потенциала атома.....	479
1.3. Введение длины когерентности Тер-Микаеляном	481
1.4. Интерпретация Ландау и Померанчука	484
РАЗДЕЛ 2. Эффект Ландау-Померанчука-Мигдала	487
РАЗДЕЛ 3. Излучение в тонком слое вещества	491
РАЗДЕЛ 4. Экспериментальные исследования ЛПМ эффекта	497
Заключение	503
Список литературы	505