



# КОМПЛЕКСНАЯ И ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА

ИЗ ЛАБОРАТОРИИ В КОСМОС

Под редакцией В. Фортнова и Г. Морфилла

УДК 533.9  
ББК 22.632  
К 63

**Комплексная и пылевая плазма: из лаборатории в космос** / Под ред. В. Е. Фортова, Г. Е. Морфилла. Пер. с англ. под ред. А. Г. Храпака. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 444 с. — ISBN 978-5-9221-1432-5.

Исследование пылевой или комплексной плазмы — быстро развивающееся направление современной физики, включающее в себя различные разделы физики неидеальной низкотемпературной плазмы. Пылевая плазма представляет собой ионизованный газ, содержащий заряженные мелкодисперсные частицы конденсированного вещества. Пылевая плазма широко распространена в природе и используется в ряде технологических процессов. Рассматривая различные типы пылевой плазмы, монография содержит детальное описание уникальных экспериментальных и теоретических результатов, полученных как в наземных экспериментах, так и в условиях микрогравитации. Ведущие в этой области специалисты обсуждают свойства газоразрядной, криогенной, замагниченной, ядерно-возбуждаемой пылевой плазмы, а также плазмы, возбуждаемой ультрафиолетовым излучением. Особое внимание уделено астрофизическим аспектам физики пылевой плазмы, численному моделированию ее свойств, междисциплинарным вопросам и возможным приложениям.

Монография может быть полезна специалистам, аспирантам и студентам, занимающимся изучением физики низкотемпературной плазмы и газового разряда, исследованием процессов кристаллизации и плавления, разработкой материалов и покрытий с заданными свойствами, а также методов диагностики дисперсных сред.

Перевод выполнен А. М. Апфельбаумом, С. В. Владимировым, Б. А. Клумовым, В. И. Молотковым и С. А. Храпаком.

ISBN 978-1-4200-8311-8 (англ.)  
ISBN 978-5-9221-1432-5 (русск.)

© CRC Press, 2010 (англ.)  
© ФИЗМАТЛИТ, 2013 (русск.)

---

# Оглавление

Авторы . . . . .	10
Введение . . . . .	11
<b>1. Типы экспериментальной комплексной плазмы . . . . .</b>	<b>15</b>
<i>В. Е. Фортон, А. Г. Храпак, В. И. Молотков, Г. Е. Морфилл, О. Ф. Петров, Х. М. Томас, О. С. Ваулина, С. В. Владимиров</i>	
1.1. Комплексная плазма в ВЧ-разрядах . . . . .	17
1.1.1. Стандартная газоразрядная камера . . . . .	18
1.1.2. Симметрично возбуждаемый ВЧ-разряд для экспериментов в усло- виях микрогравитации . . . . .	25
1.1.3. Комплексная плазма в индукционных разрядах . . . . .	29
1.2. Комплексная плазма в разрядах постоянного тока . . . . .	31
1.2.1. Лабораторные эксперименты . . . . .	31
1.2.2. Эксперименты в условиях микрогравитации . . . . .	43
1.3. Термическая пылевая плазма . . . . .	48
1.3.1. Источник термической плазмы с макрочастицами . . . . .	49
1.3.2. Диагностика плазмы . . . . .	49
1.3.3. Диагностика частиц . . . . .	50
1.3.4. Пространственно упорядоченные структуры в термической плазме . . . . .	51
1.4. Другие виды пылевой плазмы . . . . .	52
1.4.1. Пылевая плазма при криогенных температурах . . . . .	52
1.4.2. Эксперименты в пылевой плазме, индуцированной УФ-излучением . . . . .	56
1.4.3. Ядерно-возбуждаемая и трековая пылевая плазма . . . . .	59
1.4.4. Структуры частиц в разряде постоянного тока при наличии магнит- ного поля . . . . .	63
1.4.5. «Малые» пылевые структуры: кулоновские или юкавские кластеры и шары . . . . .	68
1.4.6. Комплексная плазма с несферическими частицами . . . . .	75
1.5. Формирование и рост пылевых частиц . . . . .	83
1.5.1. Причина и механизмы роста пыли в плазме силана . . . . .	84
1.5.2. Рост пыли в углеводородной плазме . . . . .	87
1.5.3. Рост пылевых частиц в плазме фторуглеродов . . . . .	90
1.5.4. Рост пылевых частиц в установках плазменного напыления . . . . .	92

<b>2. Основы плазменно-пылевых взаимодействий</b> . . . . .	108
<i>С. А. Храпак и А. В. Ивлев</i>	
2.1. Зарядка частиц в пылевой плазме . . . . .	108
2.1.1. Зарядка в бесстолкновительной плазме . . . . .	110
2.1.2. Влияние столкновений электронов и ионов плазмы на зарядку частиц . . . . .	119
2.1.3. Экспериментальное определение заряда частиц . . . . .	128
2.1.4. Эмиссионные процессы . . . . .	132
2.1.5. Квазинейтральность комплексной плазмы . . . . .	134
2.1.6. Флуктуации заряда частиц . . . . .	135
2.2. Распределение электрического потенциала в окрестности частицы . . . . .	137
2.2.1. Изотропная плазма . . . . .	137
2.2.2. Анизотропная плазма . . . . .	144
2.3. Взаимодействия между частицами . . . . .	147
2.3.1. Изотропная плазма . . . . .	147
2.3.2. Анизотропная плазма . . . . .	149
2.3.3. Эксперименты . . . . .	149
2.4. Обмен импульсами . . . . .	152
2.4.1. Сечение передачи импульса . . . . .	152
2.4.2. Частоты передачи импульса . . . . .	158
2.4.3. Диаграмма обмена импульсом . . . . .	160
2.5. Силы, действующие на частицы . . . . .	164
2.5.1. Сила ионного увлечения . . . . .	164
2.5.2. Другие силы . . . . .	178
2.6. Температура поверхности частиц . . . . .	180
<b>3. Динамика частиц</b> . . . . .	195
<i>А. В. Ивлев</i>	
3.1. Вертикальные колебания в приэлектродном слое высокочастотного разряда . . . . .	195
3.2. Негамильтонова динамика . . . . .	197
3.2.1. Роль вариаций заряда . . . . .	197
3.2.2. Роль кильватерного потенциала . . . . .	200
3.3. Кинетика ансамблей частиц с переменным зарядом . . . . .	203
<b>4. Волны и неустойчивости</b> . . . . .	209
<i>А. В. Ивлев, С. А. Храпак</i>	
4.1. Методика возбуждения колебаний . . . . .	210
4.2. Волны в идеальной (газообразной) комплексной плазме . . . . .	211
4.2.1. Основные ветви колебаний . . . . .	213
4.2.2. Затухание и неустойчивости . . . . .	216

4.3. Волны в сильно неидеальной (жидкостной) комплексной плазме . . . . .	221
4.3.1. Продольные волны . . . . .	223
4.3.2. Поперечные волны . . . . .	224
4.4. Волны в плазменных кристаллах . . . . .	225
4.4.1. Одномерные цепочки . . . . .	225
4.4.2. Двухмерная треугольная решетка . . . . .	225
4.4.3. Трехмерные плазменные кристаллы . . . . .	230
4.4.4. Неустойчивости в плазменных кристаллах . . . . .	231
4.5. Нелинейные волны . . . . .	232
4.5.1. Ионные солитоны и ударные волны . . . . .	233
4.5.2. Пылевые солитоны и ударные волны . . . . .	234
4.5.3. Конусы Маха . . . . .	237
<b>5. Исследование кинетических процессов в конденсированных средах с помощью комплексной плазмы . . . . .</b>	<b>248</b>
<i>А. В. Ивлев, Г. Е. Морфилл и С. А. Храпак</i>	
5.1. Фазовая диаграмма комплексной плазмы . . . . .	249
5.2. Сильно неидеальные жидкости . . . . .	254
5.2.1. Атомарная динамика в жидкостях . . . . .	254
5.2.2. Кинетика стабильных сдвиговых потоков . . . . .	258
5.2.3. Кинетика теплопереноса . . . . .	262
5.2.4. Гидродинамика в пределе дискретности . . . . .	265
5.2.5. Жидкости в ограниченном пространстве . . . . .	270
5.2.6. Электрореологические жидкости . . . . .	274
5.3. Твердые тела. . . . .	278
5.3.1. Динамика кристаллов на атомарном уровне . . . . .	278
5.3.2. Скэйлинговые соотношения при двумерной кристаллизации . . . . .	280
5.3.3. Динамика дислокаций . . . . .	284
5.3.4. Трехмерная кристаллизация . . . . .	287
<b>6. Пылевая плазма в Солнечной системе . . . . .</b>	<b>301</b>
<i>М. Хораньи, О. Хавнес, Г. Е. Морфилл</i>	
6.1. Введение. . . . .	301
6.2. Серебристые облака . . . . .	301
6.3. Кольца планет. . . . .	306
6.3.1. Упрощенная динамика . . . . .	306
6.3.2. Кольцо Е Сатурна . . . . .	309
6.3.3. Спицы . . . . .	312
6.4. Поверхность Луны . . . . .	317

6.4.1. Визуализация . . . . .	318
6.4.2. Измерения плазмы и электрического поля . . . . .	319
6.4.3. Измерения пыли . . . . .	322
6.4.4. Пылевое окружение Луны . . . . .	324
6.5. Заключение. . . . .	325
<b>7. Численное моделирование комплексной плазмы . . . . .</b>	<b>334</b>
<i>Б. А. Клумов, О. С. Ваулина</i>	
7.1. Метод молекулярной динамики: базовые понятия. . . . .	334
7.1.1. Методы моделирования динамики пылевых частиц . . . . .	334
7.1.2. Уравнения движения пылевых частиц . . . . .	335
7.1.3. Параметры масштабирования уравнений движения . . . . .	338
7.2. Численное моделирование пространственной корреляции пылевых частиц	339
7.2.1. Парные и трехчастичные корреляционные функции . . . . .	339
7.2.2. Парные корреляционные функции и фазовое состояние пылевой подсистемы . . . . .	345
7.3. Транспортные свойства комплексной плазмы: численный анализ . . . . .	347
7.3.1. Микроскопический транспорт частиц в неидеальных средах . . . . .	347
7.3.2. Диффузия . . . . .	350
7.3.3. Вязкость . . . . .	354
7.4. Комплексная плазма в узких каналах . . . . .	356
7.4.1. Двумерная комплексная плазма в узких каналах . . . . .	356
7.4.2. Трехмерная комплексная плазма в узких каналах . . . . .	360
7.5. Волны кристаллизации в комплексной плазме . . . . .	368
7.5.1. Определение локального порядка для трехмерных систем . . . . .	373
7.5.2. Трехмерная комплексная плазма в разряде постоянного тока . . . . .	376
7.5.3. Трехмерная комплексная плазма на борту международной космической станции . . . . .	378
7.5.4. Особенности плавления двумерных систем на примере системы Юкавы . . . . .	381
7.6. О роли микрочастиц в кометной комплексной плазме . . . . .	393
7.7. Электроотрицательная комплексная плазма . . . . .	400
<b>8. Оптическая диагностика комплексной плазмы . . . . .</b>	<b>412</b>
<i>О. Ф. Петров и О. С. Ваулина</i>	
8.1. Введение. . . . .	412
8.2. Измерения рассеяния и поглощения света . . . . .	412
8.2.1. Теория Ми . . . . .	413
8.2.2. Определение размера, концентрации и показателя преломления частиц . . . . .	414
8.3. Спектральные методы определения параметров частиц. . . . .	418

---

8.3.1. Температура частиц . . . . .	418
8.3.2. Спектрометрический метод определения размера и показателя преломления частиц . . . . .	422
8.3.3. Одновременное определение размера, показателя преломления и температуры частиц . . . . .	423
8.3.4. Влияние частиц на определение температуры газа . . . . .	424
<b>9. Приложения пылевой плазмы . . . . .</b>	<b>427</b>
<i>В. Е. Фортон, А. Г. Храпак, С. В. Владимиров</i>	
9.1. Технологические и промышленные аспекты . . . . .	427
9.2. Пыль в термоядерных реакторах . . . . .	431
9.3. Ядерные фотогальванические электрические элементы (батареи) . . . . .	433
Предметный указатель . . . . .	439