

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	11
Глава 1. Кинетический и гидродинамический методы описания плазмы	17
§ 1.1. Иерархия кинетических уравнений	17
1.1.1. Экранированное кулоновское взаимодействие и существование плазменных колебаний (17). 1.1.2. Многочастичные функции распределения и корреляционные функции (19). 1.1.3. Цепочка уравнений для многочастичных функций (22).	
§ 1.2. Кинетическое уравнение Власова	24
1.2.1. Плазменный параметр (24). 1.2.2. Самосогласованное поле (25). 1.2.3. Система кинетических уравнений с самосогласованным полем для многокомпонентной плазмы (27).	
§ 1.3. Парная корреляционная функция равновесной плазмы и интеграл столкновений Ландау	28
1.3.1. Парная корреляционная функция (28). 1.3.2. Интеграл столкновений Ландау (33).	
§ 1.4. Релаксация плазмы	36
1.4.1. Время релаксации плазмы (36). 1.4.2. Процесс выравнивания температур электронов и ионов (39). 1.4.3. H-теорема Больцмана для спокойной плазмы (40).	
§ 1.5. Гидродинамический метод описания плазмы	43
1.5.1. Гидродинамическое описание (43). 1.5.2. Переход от кинетики к гидродинамике (45). 1.5.3. Уравнения магнитной гидродинамики (52).	
Глава 2. Магнитогиродинамические волны	58
§ 2.1. Магнитозвуковые и альвеновские волны	58
2.1.1. Фазовые скорости и поляризации (58). 2.1.2. Поляры (62). 2.1.3. Затухание магнитогиродинамических волн (65). 2.1.4. Возбуждение магнитогиродинамических волн (67). 2.1.5. Характеристики магнитогиродинамических уравнений (71).	
§ 2.2. Простые волны в магнитной гидродинамике	75
2.2.1. Связь простых волн с волнами малой амплитуды (75). 2.2.2. Типы простых волн (77). 2.2.3. Искажение профиля простой волны (79). 2.2.4. Интегрирование уравнений простых волн (82). 2.2.5. Инварианты Римана (87). 2.2.6. Теорема Фридрикса (89).	

Глава 3. Ударные волны	92
§ 3.1. Разрывы	92
3.1.1. Граничные условия (92). 3.1.2. Классификация разрывов (96). 3.1.3. Теорема Цемплена (100). 3.1.4. Простые и ударные волны в релятивистской магнитной гидродинамике (102).	
§ 3.2. Устойчивость и структура ударных волн	107
3.2.1. Эволюционность ударных волн (107). 3.2.2. Структура ударных волн (114). 3.2.3. Осцилляционная структура ударной волны при наличии внешнего магнитного поля (120). 3.2.4. Случаи вырождения (125).	
§ 3.3. Исследование разрывов	131
3.3.1. Скачки различных величин (131). 3.3.2. Порядок следования волн (135). 3.3.3. Задача о поршне (137). 3.3.4. Расщепление разрыва (143).	
Глава 4. Высокочастотные колебания свободной плазмы	145
§ 4.1. Гидродинамическая теория высокочастотных колебаний свободной плазмы	145
4.1.1. Электромагнитные волны в плазме (145). 4.1.2. Ленгмюровские колебания (149). 4.1.3. Ионно-звуковые колебания (152).	
§ 4.2. Кинетическая теория продольных плазменных колебаний	154
4.2.1. Развитие начального возмущения (154). 4.2.2. Частота и затухание ленгмюровских колебаний (163). 4.2.3. Физическая интерпретация затухания Ландау (168). 4.2.4. Кинетическая теория ионно-звуковых колебаний (174).	
§ 4.3. Кинетическая теория электромагнитных волн в плазме	176
4.3.1. Тензор диэлектрической проницаемости и дисперсионное уравнение электромагнитных волн для однородной плазмы (176). 4.3.2. Поляризация плазменных волн (181). 4.3.3. Возбуждение волн в плазме (183). 4.3.4. Тензор диэлектрической проницаемости в случае изотропного распределения частиц (184).	
Глава 5. Колебания плазмы, находящейся в магнитном поле	190
§ 5.1. Гидродинамическая теория колебаний плазмы в магнитном поле	190
5.1.1. Тензор диэлектрической проницаемости холодной плазмы в магнитном поле (190). 5.1.2. Плазменные (гибридные) резонансы в холодной плазме (193). 5.1.3. Общий вид спектров колебаний холодной магнитоактивной плазмы (197). 5.1.4. Высокочастотные (электронные) ветви колебаний холодной магнитоактивной плазмы (199). 5.1.5. Низкочастотные ветви колебаний холодной магнитоактивной плазмы (201). 5.1.6. Распространение электромагнитных волн в холодной магнитоактивной плазме параллельно магнитному полю (203). 5.1.7. Поперечное распространение электромагнитных волн в холодной магнитоактивной плазме (203).	
§ 5.2. Кинетическая теория колебаний плазмы в магнитном поле	205
5.2.1. Тензор диэлектрической проницаемости магнитоактивной плазмы в кинетическом приближении (205). 5.2.2. Тензор диэлектрической проницаемости плазмы с максвелловским распределением (211). 5.2.3. Кинетическая теория плазменных резонансов (213).	

§ 5.3. Затухание высокочастотных электромагнитных волн в магнитоактивной плазме	219
5.3.1. Электронное циклотронное затухание необыкновенной волны в горячей плазме малой плотности (219). 5.3.2. Электронное циклотронное поглощение медленной необыкновенной волны и обыкновенной волны в плазме большой плотности (221). 5.3.3. Электронный циклотронный резонанс на кратных гармониках и электронное черенковское затухание высокочастотных волн (225). 5.3.4. Затухание волн вблизи плазменных резонансов (227).	
§ 5.4. Поглощение альвеновской и быстрой магнитозвуковой волн	229
5.4.1. Черенковское поглощение альвеновской и быстрой магнитозвуковой волн в плазме низкого давления (229). 5.4.2. Ионный циклотронный резонанс (233).	
§ 5.5. Низкочастотные колебания горячей плазмы в магнитном поле	237
5.5.1. Продольные колебания плазмы с горячими электронами и холодными ионами (237). 5.5.2. Низкочастотные электромагнитные волны в плазме конечного давления при $T_e \gg T_i$ (242). 5.5.3. Высокочастотный электронный звук (246). 5.5.4. Низкочастотный электронный звук (249).	
§ 5.6. Циклотронные волны в плазме в случае квазипоперечного распространения	250
5.6.1. Продольные ионно-циклотронные колебания плазмы при квазипоперечном распространении (250). 5.6.2. Непотенциальные ионно-циклотронные колебания в изотермической плазме малого давления при квазипоперечном распространении (254).	
§ 5.7. Циклотронные волны в случае поперечного распространения	259
5.7.1. Обыкновенные циклотронные волны (259). 5.7.2. Продольные электронные циклотронные колебания (262). 5.7.3. Продольные ионные циклотронные колебания (264). 5.7.4. Необыкновенные электронные циклотронные волны (265). 5.7.5. Необыкновенные ионные циклотронные волны (267).	
Глава 6. Взаимодействие потоков заряженных частиц с плазмой. Устойчивые и неустойчивые распределения частиц в плазме	271
§ 6.1. Взаимодействие потоков заряженных частиц с колебаниями свободной плазмы	271
6.1.1. Дисперсионное уравнение системы плазма—пучок (271). 6.1.2. Возбуждение продольных колебаний плазмы резонансными частицами пучка (274). 6.1.3. Возбуждение продольных колебаний моноэнергетическим пучком (277). 6.1.4. Неустойчивость плазмы, электроны которой движутся относительно ионов (281). 6.1.5. Возбуждение электромагнитных волн в плазме потоками заряженных частиц (285). 6.1.6. Неустойчивость плазмы с анизотропным распределением частиц по скоростям (291).	
§ 6.2. Взаимодействие потоков заряженных частиц с колебаниями плазмы в магнитном поле	292
6.2.1. Тензор диэлектрической проницаемости системы плазма—пучок в магнитном поле (292). 6.2.2. Возбуждение продольных колебаний плазмы в магнитном поле пучком электронов (295). 6.2.3. Неустойчивость магнитоактивной плазмы в поле низкочастотных электромагнитных волн (300). 6.2.4. Возбуждение быстрых магнитозвуковых и альвеновских волн потоками электронов и ионов (305).	

§ 6.3. Возбуждение электромагнитных волн в плазме потоками осцилляторов	310
6.3.1. Тензор диэлектрической проницаемости системы плазма — поток осцилляторов (310). 6.3.2. Возбуждение продольных высокочастотных колебаний потоком осцилляторов-электронов (313). 6.3.3. Возбуждение быстрых магнитозвуковых и альвеновских волн потоками осцилляторов (318).	
§ 6.4. Возбуждение электромагнитных волн в плазме релятивистскими потоками заряженных частиц	320
6.4.1. Тензор диэлектрической проницаемости релятивистского потока плазмы (320). 6.4.2. Возбуждение электромагнитных волн в свободной плазме релятивистским потоком (325). 6.4.3. Дисперсионное уравнение для косо́го распространения волн (327). 6.4.4. Поперечное распространение волн (330).	
§ 6.5. Общие критерии устойчивости распределений частиц в плазме	332
6.5.1. Критерии устойчивости и неустойчивости распределений частиц в свободной плазме (332). 6.5.2. Двухпучковая неустойчивость (336). 6.5.3. Критерии устойчивости распределений электронов плазмы в магнитном поле (339).	
§ 6.6. Абсолютная и конвективная неустойчивости	341
6.6.1. Критерии абсолютной и конвективной неустойчивости (341). 6.6.2. Метод бегущих волн (347). 6.6.3. Критерии усиления и непропускания колебаний (349). 6.6.4. Правила Стёррока (351). 6.6.5. Глобальная неустойчивость (357). 6.6.6. Неинвариантный характер понятий абсолютной и конвективной неустойчивостей (360). 6.6.7. Характер пучковой неустойчивости (361).	
Глава 7. Колебания частично ионизованной плазмы	364
§ 7.1. Функция распределения электронов и высокочастотные электронные колебания во внешнем электрическом поле	364
7.1.1. Кинетическое уравнение (364). 7.1.2. Стационарная функция распределения электронов (369). 7.1.3. Высокочастотные электронные колебания (371).	
§ 7.2. Ионно-звуковые колебания в сильном электрическом поле	374
7.2.1. Ионно-звуковые колебания в отсутствие внешнего магнитного поля (374). 7.2.2. Ионно-звуковые колебания во внешних электрическом и магнитном полях (377).	
§ 7.3. Низкочастотные колебания частично ионизованной плазмы	380
7.3.1. Колебания с несохранением чисел частиц отдельных компонент плазмы (380). 7.3.2. Однородные низкочастотные колебания большой амплитуды (383).	
Глава 8. Нелинейные волны в бесстолкновительной плазме	386
§ 8.1. Нелинейные высокочастотные волны в холодной плазме	386
8.1.1. Нелинейные нерелятивистские ленгмюровские колебания (386). 8.1.2. Уравнения, описывающие нелинейные волны в релятивистской плазме в отсутствие тепловых эффектов (388). 8.1.3. Продольные волны в релятивистской плазме (392). 8.1.4. Поперечные волны в релятивистской плазме (394). 8.1.5. Связанные продольно-поперечные волны в релятивистской плазме (396).	
§ 8.2. Нелинейные волны в свободной двухтемпературной плазме	400
8.2.1. Уравнения, описывающие нелинейную волну в квазиравновесной плазме (400). 8.2.2. Простые волны в квазиравновес-	

ной плазме (403). 8.2.3. Периодические и уединенные волны (406). 8.2.4. Квазиударные волны (409).	
§ 8.3. Нелинейные волны в свободной неравновесной плазме	411
8.3.1. Уравнения, описывающие нелинейную волну в неравновесной плазме (411). 8.3.2. Простые волны в неравновесной плазме (412). 8.3.3. Стационарные волны (415). 8.3.4. Многопоточковые течения в неравновесной плазме (419).	
§ 8.4. Нелинейные волны в магнитоактивной плазме с горячими электронами	424
8.4.1. Уравнения, описывающие нелинейную волну в плазме, находящейся в магнитном поле (424). 8.4.2. Простые магнитозвуковые волны (426). 8.4.3. Стационарные магнитозвуковые волны (428).	
§ 8.5. Нелинейные низкочастотные волны в холодной плазме, находящейся в магнитном поле	431
8.5.1. Уравнения, описывающие нелинейную волну в холодной магнитоактивной плазме (431). 8.5.2. Нелинейные волны в случае сильного магнитного поля (433). 8.5.3. Нелинейные волны в случае слабого магнитного поля (435).	
Глава 9. Теория колебаний плазмы в квазилинейном приближении	438
§ 9.1. Квазилинейная теория колебаний свободной плазмы	438
9.1.1. Квазилинейное приближение (438). 9.1.2. Квазилинейная релаксация (445). 9.1.3. Релаксация одномерных волновых пакетов (447). 9.1.4. Влияние кулоновских столкновений на квазилинейную релаксацию и затухание Ландау ленгмюровских колебаний (449).	
§ 9.2. Квазилинейная теория колебаний магнитоактивной плазмы	451
9.2.1. Основные уравнения (451). 9.2.2. Квазилинейная релаксация в магнитоактивной плазме (461). 9.2.3. Релаксация одномерных волновых пакетов в магнитоактивной плазме (467). 9.2.4. Влияние столкновений на квазилинейную релаксацию и черенковское и циклотронное затухание колебаний (473).	
Глава 10. Нелинейное взаимодействие волн и частиц	479
§ 10.1. Кинетическое уравнение для волн	479
10.1.1. Нелинейное уравнение для амплитуды волны (479). 10.1.2. Уравнение для корреляционной функции (482). 10.1.3. Трехволновые процессы и нелинейное затухание Ландау (486).	
§ 10.2. Турбулентные процессы с участием ленгмюровских волн	489
10.2.1. Взаимодействие ленгмюровских волн с ионно-звуковыми (489). 10.2.2. Распадная неустойчивость ленгмюровской волны (491). 10.2.3. Нелинейное затухание ленгмюровских волн (494).	
§ 10.3. Ионно-звуковая турбулентность	499
10.3.1. Нелинейное затухание ионного звука (499). 10.3.2. Стационарные распределения турбулентных волн (503).	
§ 10.4. Взаимодействие между магнитозвуковыми и альвеновскими волнами	506
10.4.1. Интеграл столкновений и H-теорема для газа плазмонов (506). 10.4.2. Гамильтониан системы плазмонов (509). 10.4.3. Вероятности трехплазмонных процессов (512). 10.4.4. Времена жизни плазмонов (515).	

Глава 11. Флуктуации в плазме	518
§ 11.1. Флуктуационно-диссипативное соотношение	518
11.1.1. Пространственно-временные корреляционные функции (518). 11.1.2. Спектральное распределение флуктуаций и диссипация энергии (519). 11.1.3. Симметрия тензора отклика (523).	
§ 11.2. Электромагнитные флуктуации в равновесной плазме	525
11.2.1. Электромагнитные флуктуации в средах с пространственно-временной дисперсией (525). 11.2.2. Электромагнитные флуктуации в изотропной плазме (528). 11.2.3. Флуктуации плотности заряда (530). 11.2.4. Флуктуации плотности тока (533). 11.2.5. Флуктуации электромагнитного поля (534). 11.2.6. Флуктуации плотностей электронов и ионов (535). 11.2.7. Флуктуации в плазме, находящейся в магнитном поле (536).	
§ 11.3. Обращение флуктуационно-диссипативного соотношения	538
11.3.1. Связь между диэлектрической проницаемостью плазмы и корреляционной функцией флуктуаций для системы невзаимодействующих частиц (538). 11.3.2. Диэлектрическая проницаемость изотропной плазмы (540). 11.3.3. Тензор диэлектрической проницаемости плазмы в магнитном поле (542).	
§ 11.4. Электромагнитные флуктуации в неизотермической плазме	544
11.4.1. Флуктуации в изотропной неизотермической плазме (544). 11.4.2. Флуктуации в анизотропной неизотермической плазме (548). 11.4.3. Флуктуации в неизотермической плазме, находящейся в магнитном поле (549).	
§ 11.5. Электромагнитные флуктуации в неравновесной плазме	550
11.5.1. Спектральные распределения флуктуаций в плазме с неравновесными, но устойчивыми функциями распределения (550). 11.5.2. Коллективные флуктуации и эффективная температура (554). 11.5.3. Критические флуктуации вблизи границы неустойчивости плазмы (555). 11.5.4. Флуктуации в неравновесной плазме, находящейся в магнитном поле (559).	
§ 11.6. Кинетическая теория флуктуаций	562
11.6.1. Флуктуации функции распределения (562). 11.6.2. Флуктуации функций распределения в неизотермической плазме (566). 11.6.3. Временное развитие флуктуаций (568). 11.6.4. Флуктуации в системе плазма—лучок (572). 11.6.5. Влияние столкновений между частицами на флуктуации в плазме (573). 11.6.6. Переход к гидродинамической теории флуктуаций (576).	
§ 11.7. Флуктуации в частично ионизованной плазме, находящейся во внешнем электрическом поле	582
11.7.1. Флуктуации в отсутствие внешнего магнитного поля (582). 11.7.2. Критические флуктуации в электрическом и магнитном полях (584).	
Глава 12. Рассеяние и трансформация волн в плазме	587
§ 12.1. Рассеяние электромагнитных волн в свободной плазме	587
12.1.1. Ток рассеяния (587). 12.1.2. Сечение рассеяния (593). 12.1.3. Спектральное распределение рассеянного излучения (595). 12.1.4. Критическая опалесценция (597).	

§ 12.2. Трансформация поперечных и продольных волн в плазме	599
12.2.1. Трансформация поперечной волны в продольную (599). 12.2.2. Трансформация и рассеяние продольных волн (600). 12.2.3. Спонтанное свечение неравновесной плазмы (605).	
§ 12.3. Некогерентное отражение электромагнитных волн от плазмы	607
12.3.1. Коэффициент отражения (607). 12.3.2. Спектральное распределение отраженного излучения (609).	
§ 12.4. Рассеяние и трансформация волн в плазме, находящейся в магнитном поле	612
12.4.1. Поле рассеянных волн. Сечения рассеяния и трансформации (612). 12.4.2. Рассеяние и трансформация электромагнитных волн на некогерентных флуктуациях (615). 12.4.3. Рассеяние и трансформация электромагнитных волн на резонансных флуктуациях (617). 12.4.4. Рассеяние и трансформация ленгмюровских волн (621). 12.4.5. Трансформация низкочастотных волн на ленгмюровских флуктуациях (623).	
§ 12.5. Рассеяние и трансформация волн в частично ионизованной плазме, находящейся во внешнем электрическом поле	624
12.5.1. Рассеяние поперечных волн в отсутствие внешнего магнитного поля (624). 12.5.2. Рассеяние поперечных волн при наличии внешнего магнитного поля (626). 12.5.3. Критическая опалесценция при рассеянии и трансформации продольных волн (629).	
§ 12.6. Рассеяние и трансформация волн в турбулентной плазме	634
12.6.1. Трансформация продольных волн в поперечные (634). 12.6.2. Рассеяние электромагнитных волн на турбулентных ионно-звуковых колебаниях (638). 12.6.3. Рассеяние электромагнитных волн на турбулентных высокочастотных колебаниях (641).	
§ 12.7. Эхо в плазме	643
12.7.1. Незагугающие колебания функции распределения и эффекты эха в плазме (643). 12.7.2. Эховые колебания продольного поля (645). 12.7.3. Эхо при антипараллельной ориентации волновых векторов возмущений (648).	
Глава 13. Рассеяние заряженных частиц в плазме	651
§ 13.1. Прохождение заряженных частиц через свободную плазму	651
13.1.1. Поле заряда в плазме (651). 13.1.2. Поляризационные потери энергии при движении заряженной частицы в плазме (652). 13.1.3. Изменение энергии движущегося заряда, обусловленное флуктуациями поля в плазме (657). 13.1.4. Вероятность рассеяния и потери энергии частицы (662).	
§ 13.2. Коэффициенты динамического трения и диффузии в плазме	671
13.2.1. Уравнение Фоккера—Планка для пробных частиц (671). 13.2.2. Коэффициенты динамического трения и диффузии в электронной плазме (673). 13.2.3. Коэффициенты трения и диффузии в двухтемпературной плазме (675).	
§ 13.3. Прохождение заряженных частиц через равновесную плазму в магнитном поле	678

13.3.1. Вероятность рассеяния в магнитоактивной плазме (678). 13.3.2. Поляризационные потери энергии частицы, обусловленные взаимодействием с продольным полем (679). 13.3.3. Учет закручивания (682). 13.3.4. Черенковское излучение заряда, движущегося в плазме в магнитном поле (683).	
§ 13.4. Взаимодействие заряженных частиц с неравновесной плазмой	689
13.4.1. Рассеяние заряженных частиц на критических флуктуациях (689). 13.4.2. Взаимодействие заряженных частиц с турбулентной плазмой (694). 13.4.3. Взаимодействие заряженных частиц с турбулентной плазмой в магнитном поле (702).	
Литература	705