

**В. Н. Цытович**

**НЕЛИНЕЙНЫЕ  
ЭФФЕКТЫ**

**В ПЛАЗМЕ**

---

---

---



**IHPPS**

---

**Цытович Вадим Николаевич**

**Нелинейные эффекты в плазме.** Изд. 2-е, испр. и доп. — М.: ЛЕНАНД, 2014. — 296 с.

Настоящая книга посвящена исследованию нелинейных эффектов в плазме, учет которых необходим для понимания важнейших физических процессов, происходящих в плазме. В основу изложения положены представления об индуцированных процессах, которые используются в физике квантовых генераторов и поэтому известны широкому кругу ученых. Обсуждаются физические предпосылки, лежащие в основе динамического описания, заимствованного из нелинейной оптики, и статистического описания нелинейных взаимодействий. Описывается большое число разнообразных приложений нелинейных эффектов, касающихся многих проблем — от происхождения космических лучей, физики космической плазмы до нагрева плазмы, эффективности взаимодействия пучков с плазмой и т. п.

Книга рекомендуется широкому кругу физиков — студентам, преподавателям, научным работникам.

Формат 60×90/16. Печ. л. 18,5. Зак. № 3М-56.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978-5-9710-0861-3

© ЛЕНАНД, 2014

13306 ID 168057



НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА	
	E-mail: <a href="mailto:URSS@URSS.ru">URSS@URSS.ru</a>
	Каталог изданий в Интернете: <a href="http://URSS.ru">http://URSS.ru</a>
	Тел./факс (многоканальный): + 7 (499) 724 25 45
	URSS

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию . . . . .	III
Предисловие . . . . .	3
<b>Глава I. Нелинейные эффекты и физика плазмы . . . . .</b>	<b>7</b>
1. Роль нелинейных эффектов в физике плазмы (7). 2. Классификация нелинейностей плазмы (19).	
<b>Глава II. Слабые нелинейности холодной плазмы . . . . .</b>	<b>23</b>
1. Нелинейное уравнение для поля в плазме (23). 2. Линейное приближение (24). 3. Нелинейные колебания зарядов холодной плазмы (25). 4. Нелинейные колебания плотности плазмы (29). 5. Нелинейный ток плазмы (30). 6. Нелинейные уравнения для поперечных и продольных электромагнитных полей (30). 7. Уравнения для амплитуд волн (32). 8. Нелинейное взаимодействие слабозатухающих и слабораскачивающихся волн (33). 9. Некоторые следствия полученных уравнений (37).	
<b>Глава III. Нелинейное взаимодействие трех пакетов волн . . . . .</b>	<b>39</b>
1. Пакеты волн (39). 2. Фазовые соотношения для пакетов волн (40). 3. Взаимодействие пакетов волн фиксированных фаз (44). 4. Взаимодействие незатухающих пакетов волн в устойчивой плазме (45). 5. Неустойчивость интенсивных волн в плазме (48). 6. Пакеты волн, имеющих случайные фазы (49). 7. Квази стационарные равновесные состояния волн случайных фаз и их устойчивость (54). 8. Возбуждение продольных волн интенсивными случайными поперечными волнами (62). 9. Некоторые качественные следствия (65).	
<b>Глава IV. Индуцированные процессы в плазме . . . . .</b>	<b>70</b>
1. Процессы спонтанного и вынужденного излучений в двухуровневой системе (70). 2. Взаимодействие электромагнитных волн с двухуровневой системой (72). 3. Пакеты взаимодействующих волн как системы с отрицательной температурой (75). 4. Плотность числа квантов в плазме (76). 5. Нелинейное взаимодействие волн как результат баланса эффектов индуцированного излучения и поглощения (78). 6. Спонтанное излучение волн волнами (82). 7. Аналогия с эффектом Вавилова — Черенкова (82). 8. Кинетическое уравнение для плазмовов (84). 9. Индуцированное комбинационное рассеяние (86).	
<b>Глава V. Общие свойства и приложения распадных процессов в плазме . . . . .</b>	<b>88</b>
1. Распадные процессы (88). 2. Диффузионное приближение (90). 3. Законы сохранения для распадных процессов (94). 4. Вероятности распадных процессов (95). 5. Распадные процессы изотропной плазмы (97). 6. Трехплазменные распадные процессы и нелинейное поглощение волн (100). 7. Распадные взаимодействия ленгмюровских и ионнозвуковых волн (101). 8. Четырехплазменные распады и нелинейное поглощение волн (107). 9. Распадные взаимодействия и нелинейная стабилизация неустойчивости плазмы (108). 10. Прохождение интенсивной электромагнитной волны через плазму (111). 11. Стабилизация продольных волн, генерируемых пучком поперечных волн (112). 12. Распадные про-	

цессы и диагностика плазмы (115). 13. Распадные процессы и тепловое излучение плазмы (117). 14. Распадные процессы для волн отрицательной энергии. Механизм нелинейной генерации волн (119). 15. Распадные нелинейные неустойчивости поперечных и продольных волн в частично ионизированной плазме (122). 16. Астрофизические приложения распадных взаимодействий (127).

## Глава VI. Индуцированное излучение волн частицами плазмы . . . . . 130

1. Резонансные частицы (130). 2. Квазилинейное приближение (133). 3. Законы сохранения (136). 4. Вероятности излучения волн частицами плазмы (137). 5. Затухание волн Ландау (140). 6. Одномерные квазилинейные уравнения (141). 7. Одномерная теория эффектов насыщения для поглощения волн Ландау (143). 8. Устойчивость изотропного распределения частиц (145). 9. Ускорение частиц при взаимодействии с волнами плазмы (147). 10. Изотропизация частиц в плазме (152). 11. Астрофизические приложения эффектов ускорения и изотропизации частиц на волнах плазмы (153). 12. Об ускорении электронов и ионов в лабораторных условиях (154). 13. Эффективная частота соударений частиц и волн (155). 14. Квазилинейная теория неустойчивости пучков в плазме (157). 15. Эффекты накопления колебаний при развитии пучковой неустойчивости (162). 16. О границах применимости квазилинейного приближения. Гидродинамические пучковые неустойчивости продольных волн (167). 17. Гидродинамические неустойчивости пучков, связанные с анизотропией функции распределения (175).

## Глава VII. Индуцированное рассеяние волн частицами плазмы . . . . . 182

1. Резонансы частиц плазмы с несколькими волнами (182). 2. Кинетическое уравнение для волн (184). 3. Законы сохранения (185). 4. Некоторые общие следствия кинетических уравнений для индуцированного рассеяния (187). 5. Индуцированное рассеяние волн при наличии в плазме пучков частиц (189). 6. Механизмы рассеяния (191). 7. Комптоновское рассеяние продольных волн (194). 8. Нелинейное рассеяние продольных волн (201). 9. Нелинейное взаимодействие ленгмюровских волн при рассеянии на электронах плазмы (205). 10. Вероятности рассеяния (211).

## Глава VIII. Индуцированное рассеяние электромагнитных волн в изотропной плазме . . . . . 213

1. Нелинейные взаимодействия ленгмюровских волн при рассеянии на электронах (213). 2. Нелинейное рассеяние на электронах через виртуальные поперечные волны (216). 3. Индуцированное рассеяние ленгмюровских волн на ионах (219). 4. Относительное сравнение эффектов перекачки при индуцированном рассеянии и распадах ленгмюровских волн на ионнозвуковые (221). 5. Индуцированное рассеяние ионнозвуковых волн (222). 6. Индуцированное рассеяние ленгмюровских волн с превращением в ионнозвуковые (224). 7. Индуцированное рассеяние поперечных волн в поперечные (225). 8. Индуцированное рассеяние ленгмюровских волн в поперечные (227).

## Глава IX. Некоторые приложения эффектов индуцированного рассеяния волн в плазме . . . . . 231

1. Конверсия продольных волн в поперечные (231). 2. Стабилизация пучковых неустойчивостей из-за индуцированного рассеяния ленгмюровских волн в ленгмюровские (234). 3. Ускорение электронов при развитии пучковой неустойчивости (237). 4. О стабилизации пучковых неустойчивостей из-за индуцированного рассеяния ленгмюровских волн в ионнозвуковые (238). 5. Устойчивость релятивистских пучков относительно генерации ленгмюровских волн (241). 6. Эффективность взаимодействия нерелятивистских пучков с плазмой (243). 7. Квазистационарные спектры звуковых колебаний, возбуждаемых электронным током (243). 8. Эффекты индуцированного рассеяния и нагрева плазмы (246). 9. Эффективная частота соударений частиц и волн при индуцированном рассеянии (246). 10. Индуцированное рассеяние волн и ускорение ионов (247). 11. Перекачка ленгмюровских волн при индуцированном рассеянии и ускорение частиц больших энергий (248).

Глава X. Направления развития исследований по нелинейным эффектам в плазме . . . . .	250
1. Развитие теории, базирующейся на кинетических уравнениях для плазмов (250). 2. Развитие исследований нелинейных дисперсионных свойств плазмы (251). 3. Развитие теории низкочастотных нелинейных свойств плазмы (256). 4. Нелинейные дисперсионные свойства плазмы в поле волны фиксированной фазы (260). 5. Сильные нелинейные волны (261). 6. Заключение (263)	
Приложение 1. Вывод нелинейных уравнений для медленно меняющихся амплитуд взаимодействующих полей . . . . .	265
Приложение 2. Усреднение нелинейных уравнений по фазам взаимодействующих волн . . . . .	268
Фазы всех волн случайны (268). Фазы интенсивных волн случайны (273).	
Приложение 3. Общий метод расчета вероятностей распада, излучения и рассеяния волн . . . . .	276
Сводка вероятностей распадов волн в изотропной плазме (279). Сводка приближенных выражений для вероятностей рассеяния волн в изотропной плазме (280).	
Приложение 4. Методы расчета нелинейных дисперсионных характеристик плазмы . . . . .	281
Расчет нелинейной проницаемости плазмы при наличии интенсивных случайных волн (281). Расчет нелинейной проницаемости плазмы методом дисперсионных соотношений (282). Сводка формул для нелинейных проницаемостей изотропной плазмы (283)	