

Н. Б. БРАНДТ
В. А. КУЛЬБАЧИНСКИЙ

**КВАЗИЧАСТИЦЫ
В ФИЗИКЕ
КОНДЕНСИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ**



**Н. Б. БРАНДТ
В. А. КУЛЬБАЧИНСКИЙ**

**КВАЗИЧАСТИЦЫ
В ФИЗИКЕ
КОНДЕНСИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ**

Издание третье, исправленное
и дополненное



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2016

УДК 538.9
ББК 22.36; 22.37
Б 87

Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А. **Квазичастицы в физике конденсированного состояния.** — 3-е изд., испр. и доп. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 632 с. — ISBN 978-5-9221-1209-3.

С единой точки зрения рассматриваются общая концепция квазичастиц в физике конденсированного состояния вещества, позволяющая описывать возбужденные состояния ансамблей сильно взаимодействующих частиц слабо неидеальным газом элементарных возбуждений, и ее различные приложения. Наряду с классическими квазичастицами — фононами, экситонами, плазмонами и т. п., рассматриваются менее известные квазичастицы нового поколения — холоны, спиноны, вортексоны, квазичастицы с дробной статистикой, дробным и переменным зарядом, а также гибридные и составные квазичастицы.

Для студентов, аспирантов, преподавателей физических специальностей, научных сотрудников и специалистов в области конденсированного состояния вещества.

© ФИЗМАТЛИТ, 2005, 2007, 2016

© Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский, 2005, 2007, 2016

ISBN 978-5-9221-1209-3

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	13
Список обозначений	15

Глава 1

Конденсированное состояние как ансамбль взаимодействующих частиц

§ 1.1. Элементарные частицы в квантовой механике	19
§ 1.2. Структурные единицы вещества	21
§ 1.3. Роль структурных единиц в формировании свойств конденсированных сред	23
1.3.1. Ядра (23). 1.3.2. Электронная оболочка атомов (26).	
1.3.3. Статистика ансамблей структурных единиц (26).	
1.3.4. Силы взаимодействия (27).	

Глава 2

Структура электронных оболочек атомов

§ 2.1. Движение электрона в поле центральных сил	28
2.1.1. Атом водорода (29). 2.1.2. Волновые функции ψ_{nlm} с $n = 2$ и $n = 3$ (31).	
§ 2.2. Структура энергетических уровней в одноэлектронном приближении	33
§ 2.3. Многоэлектронные атомы	35
§ 2.4. Заполнение уровней электронами. Правила Хунда	37
§ 2.5. Возбуждённые состояния атома	38
§ 2.6. Гибридизация атомных орбиталей	39
2.6.1. Построение гибридных орбиталей как линейной комбинации исходных (41). 2.6.2. Построение гибридных орбиталей, соответствующих заданной пространственной конфигурации связей атома (42). 2.6.3. Основные типы атомных гибридных орбиталей (44).	
§ 2.7. Многоатомные частицы, молекулярные орбитали	46
2.7.1. Связывающие и разрыхляющие орбитали (46). 2.7.2. σ -орбитали (49). 2.7.3. π -орбитали (49). 2.7.4. δ -орбитали (51).	
§ 2.8. Энергия молекулярных орбиталей	51
2.8.1. Методы молекулярных орбиталей и валентных связей (53). 2.8.2. Прочность химической связи (57).	
§ 2.9. Несвязывающие орбитали	58
§ 2.10. Комплексные соединения	59

Глава 3

**Свойства молекул
и силы взаимодействия между частицами**

§ 3.1. Дипольные моменты молекул	62
§ 3.2. Магнитные свойства молекул	65
§ 3.3. Нековалентные взаимодействия	67
3.3.1. Ионная (гетерополярная) связь (67).	
3.3.2. Взаимодействия Ван дер Ваальса (дипольные взаимодействия) (68).	
3.3.3. Водородная связь (73).	
§ 3.4. Жидкости	74
§ 3.5. Твёрдые тела	75
3.5.1. Ионные кристаллы (76).	
3.5.2. Молекулярные кристаллы (76).	
3.5.3. Ковалентные кристаллы (77).	
3.5.4. Металлы (78).	
3.5.5. Решётки с комбинированными типами связи (78).	
3.5.6. Структура вещества в конденсированном состоянии (80).	
§ 3.6. Трёхмерные кристаллические решётки Браве	80
3.6.1. Элементарные ячейки трёхмерных решёток Браве (81).	
3.6.2. Ячейка Вигнера-Зейтца, обратная решётка (83).	

Глава 4

Квазичастицы и их характеристики

§ 4.1. Квазичастицы	85
§ 4.2. Основные характеристики квазичастиц	87

Глава 5

Тепловые возбуждения решётки

§ 5.1. Основное состояние кристалла. Нулевые колебания	89
§ 5.2. Методы описания тепловых колебаний кристаллической решётки. Фононы	91
5.2.1. Стоячие волны (91).	
5.2.2. Бегущие волны (92).	
5.2.3. Закон дисперсии акустических фононов (93).	
5.2.4. Изменение закона дисперсии акустических фононов при учёте взаимодействия вторых соседей (96).	
§ 5.3. Акустические фононы в трёхмерных кристаллических решётках	99
5.3.1. Энергетический спектр акустических фононов (101).	
5.3.2. Спектральная плотность акустических фононов (104).	
§ 5.4. Особенности ван Хова	114
5.4.1. Трёхмерная система (114).	
5.4.2. Двумерная система (117).	
5.4.3. Одномерная система (118).	
§ 5.5. Статистика акустических фононов	118
5.5.1. Среднее число фононов (119).	
5.5.2. Средняя энергия (120).	
5.5.3. Температура Дебая (120).	

§ 5.6. Оптические фононы	123
5.6.1. Закон дисперсии оптических фононов для линейной цепочки чередующихся атомов двух сортов с одной степенью свободы (124). 5.6.2. Закон дисперсии оптических фононов для линейной цепочки двух чередующихся сортов атомов с тремя степенями свободы (128). 5.6.3. Оптические фононы в трёхмерных кристаллах (130). 5.6.4. Статистика оптических фононов (131). 5.6.5. Спектральная плотность оптических фононов (132).	
§ 5.7. Локальные и квазилокальные фононы	133
§ 5.8. Взаимодействие фононов	137
5.8.1. Ангармонизм колебаний атомов (137). 5.8.2. Механизм фонон-фононного рассеяния (139). 5.8.3. Нормальное рассеяние и процессы переброса (140). 5.8.4. Трёхфононные процессы (142). 5.8.5. Температурная зависимость частоты фонон-фононного рассеяния (145).	
§ 5.9. Теплоёмкость решётки	147
5.9.1. Энергия тепловых колебаний решётки (147). 5.9.2. Теория теплоёмкости Дебая (148). 5.9.3. Теплоёмкость двумерной решётки (149).	
§ 5.10. Теплопроводность решётки	150
5.10.1. Вклад нормальных процессов рассеяния в теплопроводность (151). 5.10.2. Рассеяние фононов на точечных дефектах (153). 5.10.3. Рассеяние фононов на границах кристалла (153).	
§ 5.11. Поверхностные фононы	154
§ 5.12. Фононы и ротоны в жидком гелии	158
5.12.1. Жидкий гелий ^4He (158). 5.12.2. Фононы и ротоны (159). 5.12.3. Статистика фононов и ротонов (162). 5.12.4. О природе сверхтекучести (164).	
§ 5.13. Рипплоны	167
§ 5.14. Жидкий гелий ^3He	170
5.14.1. Теплоёмкость жидкого ^3He (172). 5.14.2. Сверхтекучесть гелия ^3He (172).	

Глава 6

Элементарные возбуждения в электронной ферми-жидкости

§ 6.1. Основное состояние ферми-жидкости	175
6.1.1. Невзаимодействующие электроны в потенциальном ящике (175). 6.1.2. Энергия и импульс Ферми (176). 6.1.3. Два способа введения элементарных возбуждений (178). 6.1.4. Модель ферми-жидкости (183).	
§ 6.2. Квазичастицы на дырочной поверхности Ферми	184
§ 6.3. Время жизни квазичастиц	185

§ 6.4. Электрон в поле периодического потенциала кристаллической решётки	187
6.4.1. Адиабатическое приближение (188). 6.4.2. Теорема Блоха (188).	
§ 6.5. Квазиимпульс фермиевского электрона	190
§ 6.6. Зоны Бриллюэна	191
6.6.1. Зоны Бриллюэна двумерных решёток (193). 6.6.2. Первая зона Бриллюэна ГЦК-решётки (196). 6.6.3. Первая зона Бриллюэна ОЦК-решётки (198). 6.6.4. Первая зона Бриллюэна ГПУ-решётки (199). 6.6.5. Зоны Бриллюэна для простой кубической решётки (201). 6.6.6. Первая зона Бриллюэна — ячейка Вигнера–Зейтца обратной решётки (202).	
§ 6.7. Поверхность Ферми	203
6.7.1. Модель почти свободных электронов (203). 6.7.2. Электронная волна в цепочке атомов (204). 6.7.3. Заполнение зоны Бриллюэна электронами на примере плоской квадратной решётки (207).	
§ 6.8. Построение изоэнергетических поверхностей	209
6.8.1. Поверхности Ферми щелочных металлов (209). 6.8.2. Поверхности Ферми благородных металлов (211). 6.8.3. Метод Харрисона построения поверхностей Ферми (213). 6.8.4. Построение поверхности Ферми в схеме расширенных зон Бриллюэна (215). 6.8.5. Построение поверхности Ферми в схеме повторяющихся зон Бриллюэна (219).	
§ 6.9. Общая схема построения поверхностей Ферми. Классификация топологии поверхностей Ферми	221
6.9.1. Поверхность Ферми для простой кубической решётки (221). 6.9.2. Поверхность Ферми одновалентного металла с тетрагональной решёткой (224). 6.9.3. Поверхность Ферми алюминия (226). 6.9.4. Поверхность Ферми свинца (229).	
§ 6.10. Динамика квазичастиц в кристаллической решётке	231
§ 6.11. Эффективная масса фермиевских электронов	236
§ 6.12. Рассеяние квазичастиц в кристаллах. Общее представление о рассеянии электронов	239
6.12.1. Рассеяние электронов на фононах (242). 6.12.2. Рассеяние с процессами переброса (244).	
§ 6.13. Электропроводность	245
6.13.1. Феноменологическое описание электропроводности (245). 6.13.2. Электропроводность в модели фермиевских электронов (246). 6.13.3. Формула Лифшица (249). 6.13.4. Электропроводность в модели «частиц» и «античастиц» (251). 6.13.5. Температурная зависимость электропроводности (253).	
§ 6.14. Спектральная плотность состояний элементарных возбуждений	254
6.14.1. Электронные системы с квадратичным законом дисперсии (254). 6.14.2. Системы с произвольным законом дисперсии (258). 6.14.3. Особенности ван Хова в плотности состоя-	

ний (259). 6.14.4. Перенормировка плотности состояний в результате электрон-фононного взаимодействия (262).	
§ 6.15. Электронная теплоёмкость.	264
§ 6.16. Электронная теплопроводность.	265
§ 6.17. Фермиевские электроны в постоянном магнитном поле	268
6.17.1. Траектория квазичастицы в реальном пространстве (270). 6.17.2. Циклотронная масса фермиевских электронов (275). 6.17.3. Модель почти свободных электронов (277). 6.17.4. Циклотронная масса при произвольном законе дисперсии (278). 6.17.5. Общие замечания о перенормировке массы электрона в металле (282).	
§ 6.18. Энергетический спектр квазичастиц в квантующем магнитном поле.	283
6.18.1. Идеальный газ электронов в квантующем магнитном поле (284). 6.18.2. Энергетический спектр идеального газа электронов в кристаллической решётке в квантующем магнитном поле (287). 6.18.3. Спиновое расщепление (290). 6.18.4. Распределение электронов в p -пространстве в присутствии квантующего магнитного поля (292). 6.18.5. Плотность электронных состояний в магнитном поле (298). 6.18.6. Энергетический спектр электронов в квантующем магнитном поле с учётом ферми-жидкостного взаимодействия (300).	

Глава 7

Квазичастицы в сверхпроводниках

§ 7.1. Куперовские пары	302
7.1.1. Модель поляризационного электрон-электронного притяжения (302). 7.1.2. Куперовские пары в реальном металле (305).	
§ 7.2. Электрон-фононное взаимодействие. Теория сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера	308
§ 7.3. Основное состояние сверхпроводника	308
§ 7.4. Энергия связи куперовских пар	312
§ 7.5. Элементарные возбуждения в сверхпроводниках	313
7.5.1. «Частица»- и «античастица»-подобные возбуждения (313). 7.5.2. Закон дисперсии «частица»- и «античастица»-подобных возбуждений в сверхпроводниках (317). 7.5.3. Плюсоны и минусоны (318). 7.5.4. Плотность состояний плюсонов и минусонов (320). 7.5.5. Время жизни квазичастиц (324). 7.5.6. Заряд квазичастиц (325). 7.5.7. Время релаксации заряда плюсонов и минусонов (326). 7.5.8. Скорость квазичастиц (327). 7.5.9. Эффективная масса квазичастиц (328).	
§ 7.6. Элементарные возбуждения и свойства сверхпроводников.	329
7.6.1. Поглощение ультразвука в сверхпроводниках (329). 7.6.2. Электронная теплоёмкость (330). 7.6.3. Электронная теплопроводность (330). 7.6.4. Релаксация ядерных спинов (331).	

7.6.5. Сверхпроводящий ток (333). 7.6.6. Андреевское отражение (339).

Глава 8

Тяжёлые фермионы

§ 8.1. Общая характеристика тяжёлых фермионов	342
§ 8.2. Эффект Кондо. Природа пика плотности состояний в системах с тяжёлыми фермионами	342
§ 8.3. Резонанс Абрикосова–Сула	347
§ 8.4. Классификация кондо-систем с тяжёлыми фермионами	349
§ 8.5. Ферми-жидкостные эффекты в системе тяжёлых фермионов	350
§ 8.6. Сверхпроводимость систем с тяжёлыми фермионами	351
§ 8.7. Системы с тяжёлыми фермионами — особый класс веществ	352

Глава 9

Элементарные возбуждения в полупроводниках

§ 9.1. Общие положения	354
§ 9.2. Электроны и дырки	355
§ 9.3. Закон дисперсии электронов и дырок	357
§ 9.4. Плотность состояний электронов и дырок	359
§ 9.5. Статистика электронов и дырок и их концентрации	360

Глава 10

Экситоны

§ 10.1. Экситоны Френкеля и Ванье–Мотта	365
10.1.1. Экситоны Френкеля (365). 10.1.2. Экситоны Ванье–Мотта (367). 10.1.3. Прямые экситоны (368). 10.1.4. Непрямые экситоны (371).	
§ 10.2. Экситоны в двумерных и одномерных системах	372
10.2.1. Экситоны в низкоразмерных полупроводниковых структурах (373). 10.2.2. Экситоны в гетероструктурах полупроводник–диэлектрик (377). 10.2.3. Практические приложения (378).	
§ 10.3. Экзотические экситоны	378
§ 10.4. Экситонный диэлектрик	379
10.4.1. Переход полупроводник — экситонный диэлектрик (380). 10.4.2. Переход полуметалла в состояние экситонного диэлектрика (381).	
§ 10.5. Экситоны в сильном магнитном поле	383
§ 10.6. Бизекситоны	385
§ 10.7. Конденсация экситонов в электронно-дырочную жидкость	387
§ 10.8. Многочастичные экситон-примесные комплексы	393

Глава 11

Поляроны

§ 11.1. Поляроны	396
11.1.1. Поляроны в металлах (396). 11.1.2. Поляроны в полупроводниках (398).	
§ 11.2. Поляроны в ионных кристаллах	398
11.2.1. Поляроны малого радиуса (400). 11.2.2. Поляроны большого радиуса (402). 11.2.3. Константа связи между электронами и оптическими фононами (402). 11.2.4. Энергия электрона в потенциальной (поляризационной) яме (403).	
§ 11.3. Энергия поляронов	404
§ 11.4. Подвижность поляронов	405
§ 11.5. Структура поляронов	406
§ 11.6. Биполяроны	407

Глава 12

Плазмоны

§ 12.1. Плазмоны	408
12.1.1. Плазмоны в металлах (408). 12.1.2. Взаимодействие плазмонов с решёткой (410).	
§ 12.2. Учёт связанных электронов в металлах	415
§ 12.3. Закон дисперсии плазмонов	417
§ 12.4. Время жизни плазмонов	419
§ 12.5. Звуковые плазмоны	421
§ 12.6. Поверхностные плазмоны	424
12.6.1. Плазмоны на границе металла с вакуумом (424). 12.6.2. Плазмоны на границе раздела двух сред (426). 12.6.3. Цилиндрические поверхностные плазмоны (430). 12.6.4. Возбуждение поверхностных плазмонов (430).	
§ 12.7. Практическое использование поверхностных плазмонов	432
12.7.1. Измерение коэффициента поглощения (433). 12.7.2. Микроскоп на поверхностных плазмонах (433).	

Глава 13

Холоны и спионы

§ 13.1. Общая характеристика	437
13.1.1. Спионы (437). 13.1.2. Холоны (438). 13.1.3. Возможность существования холонов и спионов в двумерной системе (439).	
§ 13.2. Холоны и спионы в полиацетиле	440
§ 13.3. Квазичастицы, с зарядом, отличным от заряда электрона	446

- 13.3.1. Почему заряд квазичастиц может отличаться от $|e|$ (446).
 13.3.2. Возможность существования квазичастиц с дробным зарядом (447).

Глава 14

Семионы и анионы, дробная статистика

- § 14.1. Общая характеристика квазичастиц с дробной статистикой . . . 451
 § 14.2. Специфика двумерных систем 452
 14.2.1. Легирование квазидвумерной системы (453).
 14.2.2. Преобразование статистики бозонов в поле векторного потенциала вихря (456).
 § 14.3. Термодинамика анионных систем 460
 § 14.4. Физические эффекты, обусловленные частицами с промежуточной статистикой. 461

Глава 15

Магноны

- § 15.1. О природе магнетизма 462
 § 15.2. Энергия магнитного взаимодействия 467
 15.2.1. Магнитное диполь-дипольное взаимодействие (467).
 15.2.2. Обменное взаимодействие (468).
 § 15.3. Магнитная структура атомов 472
 15.3.1. Основное состояние магнитной структуры (473).
 § 15.4. Спиновые волны 474
 § 15.5. Ферромагноны. 479
 § 15.6. Спектральная плотность ферромагнонов 481
 § 15.7. Эффективная масса ферромагнонов. 483
 § 15.8. Тепловое возбуждение магнонов 484
 § 15.9. Магнонная теплоёмкость. 486
 § 15.10. Магноны в антиферромагнетиках 487
 § 15.11. Спектральная плотность антиферромагнонов 488
 § 15.12. Теплоёмкость антиферромагнонов. 489

Глава 16

Флуктуоны

- § 16.1. Флуктуоны 491
 16.1.1. Бифлуктуоны (492). 16.1.2. Флуктуоны в бинарных растворах (493). 16.1.3. Термодинамический потенциал системы движущихся флуктуонов (497).
 § 16.2. Подвижность флуктуонов 498
 § 16.3. Эффективная масса флуктуона. 500
 § 16.4. Влияние флуктуонов на свойства полупроводников 501

16.4.1. Электропроводность (501). 16.4.2. Взаимодействие флуктуонов с электромагнитным излучением (502).

Глава 17

Автолокализованные состояния носителей тока в магнитных полупроводниках

§ 17.1. Спин-поляроны	503
§ 17.2. Квазиосцилляторные состояния носителей тока в магнитных полупроводниках	504
17.2.1. Энергия и эффективные массы зонных электронов в магнитных полупроводниках (504). 17.2.2. Квазиосцилляторное состояние электрона в антиферромагнитном ($A < 0$) полупроводнике (507). 17.2.3. Движение электрона в полупроводниках с ферромагнитным ($A > 0$) упорядочением (509).	
§ 17.3. Ферроны	510
17.3.1. Ферроны в полупроводниках с широкой зоной проводимости (511). 17.3.2. Ферроны в полупроводниках с узкими зонами (512). 17.3.3. Феррон-поляронные состояния (513). 17.3.4. Локализованные ферроны (513). 17.3.5. Термодинамический метод описания ферронов (514). 17.3.6. Ферроны в парамагнетиках (515). 17.3.7. Подвижность магнитных флуктуонов (518). 17.3.8. Эффективная масса магнитного флуктуона (518). 17.3.9. Влияние ферронов на свойства антиферромагнитных полупроводников (519).	
§ 17.4. Ферронные капли	520

Глава 18

Фазоны, вакансионы

§ 18.1. Фазоны	522
§ 18.2. Вакансионы	525
18.2.1. Вакансии в кристаллах при $T = 0$ (525). 18.2.2. Вакансии в кристаллах при $T \neq 0$ (527).	
§ 18.3. Вакансионы в квантовых кристаллах.	529
§ 18.4. Влияние вакансионов на свойства кристаллов.	531
§ 18.5. Краудионы	532
§ 18.6. Фокусоны.	532

Глава 19

Солитоны

§ 19.1. Общие свойства.	534
§ 19.2. Солитоны в кристаллах.	536
19.2.1. Модель Френкеля–Конторовой (538). 19.2.2. Бисолитоны-бризеры (544).	

§ 19.3. Магнитные солитоны	546
19.3.1. Топологические вихри (546). 19.3.2. Энергия ферромагнитного состояния (550). 19.3.3. Домены в ферромагнетиках (553). 19.3.4. Магнитные солитоны в ферромагнетике с лёгкой осью (553). 19.3.5. Солитон в цепочке магнитных моментов (556).	
§ 19.4. Флуксоны	559
§ 19.5. Полевая интерпретация солитонов	563
§ 19.6. Солитон в поле синус-Гордона	565
§ 19.7. Инстантоны	571
§ 19.8. Оптические солитоны	573
§ 19.9. Оптические тахионы	577

Глава 20

Композитные квазичастицы

§ 20.1. Гибридные квазичастицы	583
§ 20.2. Поляритоны	584
20.2.1. Фонон-поляритоны (584). 20.2.2. Двухатомная модель (585).	
§ 20.3. Экситон-поляритоны	589
§ 20.4. Усилитель поляритонов	592
§ 20.5. Композитные фермионы и композитные бозоны	592
20.5.1. Целочисленный квантовый эффект Холла (593). 20.5.2. Дробный квантовый эффект Холла, композитные бозоны и композитные фермионы (598).	
§ 20.6. Вортексоны	602
20.6.1. Бивортексоны малого радиуса (604).	
§ 20.7. Сегнетомагноны	607
§ 20.8. Магнон-фононы	610
§ 20.9. Геликон-фононы	613
20.9.1. Геликоны (613). 20.9.2. Геликон-фононы (615).	
§ 20.10. Экситон-поляроны	617
20.10.1. Экситон-поляроны большого радиуса (617). 20.10.2. Экситон-поляроны малого радиуса (617).	
Список литературы	620
Предметный указатель	627