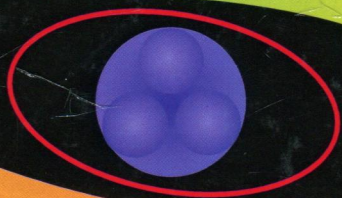


Ю. М. ЦИПЕНЮК

КВАНТОВАЯ
МИКРО-
И МАКРОФИЗИКА



Ю. М. ЦИПЕНЮК

КВАНТОВАЯ МИКРО- И МАКРОФИЗИКА

Издание второе, исправленное и дополненное

Учебное пособие для студентов вузов



Москва
ФИЗМАТКНИГА
2019

ББК 22.36
Ц67
УДК 338.945

Рецензенты:

Кафедра общей ядерной физики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, зав. кафедрой проф. *Б. С. Ишханов*

профессор *А. С. Кингсен*

Ю. М. ЦИПЕНЮК. Квантовая микро- и макрофизика. 2-е изд., испр. и доп. — М.: Физматкнига, 2019. — 664 с. ISBN 978-5-89155-258-6.

Книга является заключительным разделом общего курса физики, посвященного рассмотрению фундаментальных основ современной квантовой физики и адресована студентам технических университетов с углубленным изучением физики, а равно и студентам физико-математических факультетов классических университетов. Предметом этой книги является квантовая физика атома, молекул, ядра и элементарных частиц, а также квантовая физика макроскопических систем. В раздел физики систем многих частиц включены вопросы квантовой теории излучения, основы физики лазеров, физические основы сверхтекучести и сверхпроводимости, физические свойства металлов, изоляторов и полупроводников, магнитные свойства веществ, квантовые свойства низкоразмерных и мезоскопических систем.

Книга основана на курсе лекций, читавшихся автором в течение многих лет студентам III курса Московского физико-технического института (МФТИ).

Интернет-магазин специализированной литературы
www.fizmatkniga.ru

ISBN 978-5-89155-258-6



9 785891 552586

© Ю. М. Ципенюк, 2006, 2018

© Физматкнига, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Ю. М. ЦИПЕНЮК — САМ О СЕБЕ	10
ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ	40
ВВЕДЕНИЕ.....	47
ГЛАВА 1	
КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ МИКРОЧАСТИЦ. ФОТОЭФФЕКТ И ЭФФЕКТ КОМПТОНА	52
§ 1.1. Корпускулы и волны	52
§ 1.2. Фотоэффект и его закономерности	55
§ 1.3. Эффект Комптона	64
§ 1.4. Корпускулярно-волновой дуализм электромагнитного излучения	72
ГЛАВА 2	
ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ. СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ И ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ	73
§ 2.1. Волны де Бройля	73
§ 2.2. Физический смысл волн де Бройля. Волновая функция	79
§ 2.3. Операторы физических величин и их средние значения	85
§ 2.4. Соотношения неопределенностей и принцип дополнительности	90
ГЛАВА 3	
УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА. ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ	106
§ 3.1. Уравнение Шредингера и его основные свойства	106
§ 3.2. Движение частицы в поле «прямоугольной ступеньки»	113
§ 3.3. Прямоугольный барьер. Туннельный эффект	117
ГЛАВА 4	
ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА И ПОСТУЛАТЫ БОРА. СТАЦИОНАРНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЧАСТИЦ В ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ.....	122
§ 4.1. Атомные спектры и планетарная модель атома	122
§ 4.2. Постулаты Бора	129
§ 4.3. Частица в потенциальной яме	134
§ 4.4. Частица в трехмерной и одномерной ямах конечной глубины	139

ГЛАВА 5

ГАРМОНИЧЕСКИЙ ОСЦИЛЛЯТОР. КУЛОНОВСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ КВАНТОВАНИЕ. КВАНТОВЫЙ РОТАТОР. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СПЕКТРЫ 144

§ 5.1. Квазиклассический метод нахождения стационарных состояний	144
§ 5.2. Гармонический осциллятор	145
§ 5.3. Кулоновский потенциал	148
§ 5.4. Пространственное квантование	151
§ 5.5. Молекулярные спектры	156

ГЛАВА 6

УГЛОВОЙ МОМЕНТ АТОМОВ. МАГНЕТИЗМ АТОМОВ. СПИН ЭЛЕКТРОНА 161

§ 6.1. Состояния атомных электронов с разными моментами импульса	161
§ 6.2. Магнетизм атомов	169
§ 6.3. Спин электрона	171
§ 6.4. Сложение угловых моментов	178

ГЛАВА 7

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ. ПРИНЦИП ПАУЛИ. ТАБЛИЦА МЕНДЕЛЕЕВА. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ 182

§ 7.1. Законы сохранения в квантовой механике	182
§ 7.2. Право-левая симметрия	183
§ 7.3. Принцип Паули	187
§ 7.4. Роль обменной энергии в образовании молекул	190
§ 7.5. Таблица Менделеева	196
§ 7.6. Квантовые характеристики сложных атомов	199
§ 7.7. Характеристическое излучение	203

ГЛАВА 8

ПРАВИЛА ОТБОРА ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДАХ. АТОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ 206

§ 8.1. Спин фотона	206
§ 8.2. Электромагнитные переходы	211
§ 8.3. Правила отбора	215
§ 8.4. Эффект Зеемана	218

ГЛАВА 9

АТОМНОЕ ЯДРО 228

§ 9.1. Параметры атомных ядер	229
§ 9.2. Мезонная теория ядерного взаимодействия	235

ГЛАВА 10

МОДЕЛИ ЯДРА 239

§ 10.1. Модель жидкой капли. Формула Вайцзеккера	239
§ 10.2. Оболочечная модель ядра	245
§ 10.3. Возбужденные состояния ядер	253

ГЛАВА 11	
РАДИОАКТИВНОСТЬ	260
§ 11.1. Законы радиоактивного распада	262
§ 11.2. Альфа-распад	264
§ 11.3. Бета-распад	270
§ 11.4. Гамма-излучение	279
§ 11.5. Деление ядер	283
§ 11.6. Экзотическая радиоактивность	293
§ 11.7. Эволюция Вселенной и происхождение элементов	294
§ 11.8. Синтез новых элементов, трансураны	299
ГЛАВА 12	
ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ	306
§ 12.1. Эффективное сечение реакции	306
§ 12.2. Законы сохранения в ядерных реакциях	309
§ 12.3. Качественные оценки сечений ядерных реакций	311
ГЛАВА 13	
ФИЗИКА НЕЙТРОНОВ И ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА	323
§ 13.1. Особенности взаимодействия нейтронов с ядрами	324
§ 13.2. Замедление нейтронов	326
§ 13.3. Потенциальное рассеяние	327
§ 13.4. Оптика нейтронов	332
§ 13.5. Ядерные реакторы	337
§ 13.6. Термоядерный синтез	344
§ 13.7. Энергия Солнца и звезд	352
ГЛАВА 14	
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ	356
§ 14.1. Основные свойства элементарных частиц. Фундаментальные взаимодействия в природе	357
§ 14.2. Законы сохранения в микромире	368
§ 14.3. Кварковая структура адронов	374
§ 14.4. Электрослабое взаимодействие	389
ВВЕДЕНИЕ	401
ГЛАВА 15	
КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ. ЛАЗЕРЫ	402
§ 15.1. Равновесное тепловое излучение	403
§ 15.2. Интегральные характеристики теплового излучения	411
§ 15.3. Вынужденное и спонтанное излучения. Лазеры	415
§ 15.4. Ширина линии лазерного излучения	427
ГЛАВА 16	
КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	431
§ 16.1. Симметрия кристаллов	433
§ 16.2. Классификация кристаллов	440

§ 16.3. Обозначения плоскостей и направлений в кристалле	443
§ 16.4. Типы связей в кристаллах	445
§ 16.5. Жидкие кристаллы	449
§ 16.6. Дефекты кристаллов	456
§ 16.7. Упругое рассеяние рентгеновских лучей и нейтронов в кристаллах	459
ГЛАВА 17	
ДИНАМИКА АТОМОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ.	
ФОНОНЫ	464
§ 17.1. Характер теплового движения атомов кристалла	464
§ 17.2. Изучение фононного спектра кристаллов методом неупругого рассеяния нейтронов	474
§ 17.3. Эффект Мессбауэра	476
§ 17.4. Теплоемкость решетки	480
§ 17.5. Решеточная теплопроводность	485
ГЛАВА 18	
МЕТАЛЛЫ	492
§ 18.1. Распределение Ферми–Дирака	493
§ 18.2. Зонная структура энергетических состояний электронов в кристаллах	498
§ 18.3. Динамика электронов в кристаллической решетке	509
§ 18.4. Электронная теплопроводность	513
§ 18.5. Электропроводность металлов	517
ГЛАВА 19	
ПОЛУПРОВОДНИКИ	521
§ 19.1. Уровень Ферми в полупроводниках	522
§ 19.2. Роль примесей	525
§ 19.3. Электропроводность полупроводников	533
§ 19.4. Контактные явления в полупроводниках	538
§ 19.5. Полупроводниковые триоды (транзисторы)	542
ГЛАВА 20	
МАГНЕТИЗМ ВЕЩЕСТВ	547
§ 20.1. Классификация магнетиков	548
§ 20.2. Диамагнетизм	552
§ 20.3. Парамагнетизм	555
§ 20.4. Ферромагнетизм	557
§ 20.5. Квантово-механическое описание ферромагнетизма	558
§ 20.6. Возбуждение спиновой системы (спиновые волны)	569
ГЛАВА 21	
СВЕРХТЕКУЧЕСТЬ И СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ	572
§ 21.1. Основные свойства сверхпроводников	572
§ 21.2. Эффект Мейсснера и глубина проникновения	578
§ 21.3. Сверхтекучесть жидкого гелия	584
§ 21.4. Энергетическая щель сверхпроводящего состояния	590

§ 21.5. Микроскопический механизм сверхпроводимости.....	592
§ 21.6. Незатухающий сверхпроводящий ток и критическое магнитное поле с точки зрения микротeorии	599
§ 21.7. Длина когерентности	601
§ 21.8. Энергия границы между фазами	603
§ 21.9. Квантование потока	606
§ 21.10. Вихревая структура сверхпроводников II рода	608
§ 21.11. Первое и второе критическое поле	612
§ 21.12. Высокотемпературные сверхпроводники	613
§ 21.13. Применения сверхпроводимости	615

ГЛАВА 22

КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ И МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

620

§ 22.1. Квантовые эффекты в проводимости	621
§ 22.2. Эффект Ааронова–Бома	628
§ 22.3. Интерференционные эффекты в магнитном поле	633
§ 22.4. Мезоскопические эффекты	635
§ 22.5. Двумерный электронный газ	637
§ 22.6. Квантующее магнитное поле	639
§ 22.7. Классический эффект Холла	643
§ 22.8. Целочисленный квантовый эффект Холла	644
§ 22.9. Сопротивление, проводимость и потенциал в условиях квантования холловского сопротивления	649
§ 22.10. Дробный квантовый эффект Холла и композитные частицы	652

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

657

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

658

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

660