

УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

Н. П. Калашников, М. А. Смондырев

# ОСНОВЫ ФИЗИКИ

## Том 2

2-Е ИЗДАНИЕ, ЭЛЕКТРОННОЕ



Москва  
Лаборатория знаний  
2021

УДК 53(075.8)  
ББК 22.3я73  
К17

*Серия основана в 2009 г.*

**Калашников Н. П.**

**К17** Основы физики : в 3 т. Т. 2 / Н. П. Калашников, М. А. Смондырев. — 2-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2021. — 609 с. — (Учебник для высшей школы). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-075-3 (Т. 2)

ISBN 978-5-00101-072-2

Учебник соответствует программе дисциплины «Физика» для естественнонаучных и технических университетов. Два его тома входят в состав учебного комплекта, включающего также учебное пособие «Основы физики. Упражнения и задачи» тех же авторов.

Во многих отношениях данный учебник не имеет аналогов. Ряд оригинальных методических приемов и способов изложения материала, включение новых, зачастую неожиданных тем и ярких примеров, отсутствующих в традиционных курсах физики, позволяют учащимся приобрести навыки уверенного самостоятельного мышления, глубже понять физические основы самых различных природных явлений, делать практические, качественные оценки, оперируя размерностями и порядками величин.

Для студентов естественнонаучных и инженерно-технических специальностей.

**УДК 53(075.8)**

**ББК 22.3я73**

**Деривативное издание на основе печатного аналога:** Основы физики : в 3 т. Т. 2 / Н. П. Калашников, М. А. Смондырев. — М. : Лаборатория знаний, 2017. — 606 с. : ил. — (Учебник для высшей школы). — ISBN 978-5-00101-005-0 (Т. 2); ISBN 978-5-00101-003-6.

**В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации**

ISBN 978-5-00101-075-3 (Т. 2)

ISBN 978-5-00101-072-2

© Лаборатория знаний, 2017

# Оглавление

<b>Часть IV</b>	<b>Колебания и волны</b>	<b>3</b>
<b>Глава 24</b>	<b>Колебательное движение</b>	<b>5</b>
24.1	Уравнение гармонических колебаний . . . . .	5
	Пружинный маятник . . . . .	5
	Математический маятник . . . . .	6
	Физический маятник . . . . .	7
	Движение поршня в сосуде с идеальным газом . . . . .	8
	Электромагнитный контур . . . . .	8
24.2	Гармонические колебания . . . . .	9
24.3	Сохранение энергии при гармонических колебаниях . . . . .	13
24.4	Сложение однонаправленных колебаний . . . . .	15
	Сложение колебаний с одинаковыми частотами . . . . .	15
	Битания . . . . .	16
	Колебания двух связанных осцилляторов . . . . .	18
24.5	Сложение взаимно перпендикулярных колебаний . . . . .	21
24.6	Свободные затухающие колебания . . . . .	23
	Уравнение затухающих колебаний . . . . .	23
	Анализ решений . . . . .	24
24.7	Вынужденные колебания . . . . .	28
	Контрольные вопросы . . . . .	31
<b>Глава 25</b>	<b>Переменный ток</b>	<b>33</b>
25.1	Квазистационарные токи . . . . .	33
25.2	Переменный ток через элементы цепи . . . . .	33
	Переменный ток через сопротивление . . . . .	33
	Переменный ток через индуктивность . . . . .	34
	Переменный ток через емкость . . . . .	35
25.3	Цепь переменного тока . . . . .	35
25.4	Резонансные явления . . . . .	37
	Резонанс напряжений . . . . .	38
	Резонанс токов . . . . .	38
25.5	Мощность в цепи переменного тока . . . . .	41
	Контрольные вопросы . . . . .	42

<b>Глава 26</b>	<b>Нелинейные колебания</b>	<b>43</b>
26.1	Нелинейные колебания маятника . . . . .	44
26.2	Фазовый портрет . . . . .	47
26.3	Автоколебания . . . . .	50
26.4	Эволюция и взаимодействие популяций . . . . .	54
	Популяция в отсутствие сдерживающих факторов . . . . .	54
	Внутривидовая конкуренция . . . . .	55
	О взаимоотношениях зайцев и волков . . . . .	57
	Контрольные вопросы . . . . .	60
<b>Глава 27</b>	<b>Волновые процессы</b>	<b>61</b>
27.1	Волны в упругих средах . . . . .	61
	Колебания струны . . . . .	61
	Колебания в идеальном газе . . . . .	62
	Колебания в твердых телах . . . . .	64
27.2	Решение волнового уравнения . . . . .	64
27.3	Энергия волны . . . . .	69
	Применения к звуковой волне . . . . .	70
27.4	Стоячие волны . . . . .	72
	Струна, закрепленная на одном конце . . . . .	73
	Гармоники . . . . .	74
	Сложение гармоник . . . . .	75
	Спектр колебаний . . . . .	78
27.5	Сферические волны . . . . .	80
	Трехмерное волновое уравнение . . . . .	81
	Эффект Доплера для звуковых волн . . . . .	82
	Сверхзвуковые скорости . . . . .	87
	Контрольные вопросы . . . . .	90
<b>Часть V</b>	<b>Основы волновой оптики</b>	<b>93</b>
<b>Глава 28</b>	<b>Волновая теория света и законы геометрической оптики</b>	<b>95</b>
28.1	Принцип Гюйгенса . . . . .	95
28.2	Законы отражения и преломления света . . . . .	96
	Закон отражения . . . . .	96
	Закон преломления . . . . .	97
	Принцип Ферма . . . . .	100
	Контрольные вопросы . . . . .	101
<b>Глава 29</b>	<b>Интерференция света</b>	<b>103</b>
29.1	Интенсивность света . . . . .	103
29.2	Когерентность световых волн . . . . .	104
29.3	Интерференция света от двух источников . . . . .	107
29.4	Способы наблюдения интерференции света . . . . .	109

29.5	Интерференция света в тонких пленках . . . . .	110
29.6	Полосы равной толщины. Кольца Ньютона . . . . .	112
29.7	Интерферометры . . . . .	114
	Контрольные вопросы . . . . .	116

## Глава 30 Дифракция света 117

30.1	Принцип Гюйгенса—Френеля . . . . .	117
30.2	Метод зон Френеля . . . . .	119
30.3	Дифракция на круглом отверстии и диске . . . . .	122
30.4	Дифракция Фраунгофера от щели . . . . .	124
30.5	Дифракционная решетка . . . . .	129
	Дифракция от двух щелей . . . . .	130
	Дифракция на решетке . . . . .	131
	Характеристики дифракционной решетки . . . . .	134
30.6	Дифракция рентгеновских лучей . . . . .	136
30.7	Голография . . . . .	138
	Контрольные вопросы . . . . .	141

## Глава 31 Влияние среды на свойства света 143

31.1	Поляризация света . . . . .	143
	Поляризация электромагнитной волны . . . . .	143
	Естественный и поляризованный свет . . . . .	144
	Закон Малюса . . . . .	146
	Поляризация при отражении и преломлении . . . . .	148
31.2	Дисперсия света . . . . .	150
	Теория радуги . . . . .	153
	Элементарная теория дисперсии . . . . .	157
31.3	Поглощение света . . . . .	160
31.4	Рассеяние света . . . . .	161
	Контрольные вопросы . . . . .	161

## Глава 32 Электромагнитные волны 163

32.1	Усреднение микроскопических полей . . . . .	163
32.2	Уравнения Максвелла для сплошных сред . . . . .	166
32.3	Волновое уравнение . . . . .	168
32.4	Основные свойства электромагнитных волн . . . . .	169
32.5	Эффект Доплера для электромагнитных волн . . . . .	172
	Отражение света от движущегося зеркала . . . . .	174
32.6	Энергия и импульс электромагнитного поля . . . . .	176
	Давление света . . . . .	178
	Солнечный парус . . . . .	179
32.7	Законы оптики и уравнения Максвелла.	
	Формулы Френеля . . . . .	180
	Отражение и преломление $s$ -поляризованной волны . . . . .	181
	Отражение и преломление $p$ -поляризованной волны . . . . .	184

32.8	Полное внутреннее отражение . . . . .	186
32.9	Затухание волн в металле. Скин-эффект . . . . .	188
32.10	Дипольное излучение . . . . .	191
32.11	Излучение равномерно движущегося заряда . . . . .	197
	Контрольные вопросы . . . . .	199
<b>Часть VI Основы квантовой механики</b>		<b>201</b>
<b>Глава 33</b>	<b>Квантовая природа излучения</b>	<b>203</b>
33.1	Тепловое излучение . . . . .	203
33.2	Эмпирические законы излучения абсолютно черного тела . . .	209
33.3	Классические результаты для теплового излучения . . . . .	211
33.4	Закон излучения Планка . . . . .	213
	Контрольные вопросы . . . . .	218
<b>Глава 34</b>	<b>Фотоны</b>	<b>219</b>
34.1	Кванты света . . . . .	219
34.2	Фотоэлектрический эффект . . . . .	221
34.3	Эффект Комптона . . . . .	225
34.4	Опыт Боте . . . . .	230
	Контрольные вопросы . . . . .	232
<b>Глава 35</b>	<b>Волновые свойства микрочастиц</b>	<b>233</b>
35.1	Атом Бора . . . . .	233
	Постулаты Бора . . . . .	234
	Характеристики водородоподобного атома . . . . .	235
35.2	Волны материи . . . . .	241
35.3	Соотношения неопределенностей . . . . .	246
	Некоторые следствия соотношений неопределенностей . . . .	247
35.4	Двухщелевой эксперимент . . . . .	251
35.5	О границах применимости квантовой механики . . . . .	252
	Контрольные вопросы . . . . .	255
<b>Глава 36</b>	<b>Уравнение Шрёдингера</b>	<b>257</b>
36.1	Волна вероятности . . . . .	257
36.2	Общее уравнение Шрёдингера . . . . .	259
36.3	Операторы, симметрия и законы сохранения . . . . .	261
36.4	Стационарное уравнение Шрёдингера . . . . .	262
36.5	Уравнение Шрёдингера для простейших систем . . . . .	265
	Свободная частица, движущаяся вдоль оси $x$ . . . . .	265
	Частица в бесконечно глубокой потенциальной яме . . . . .	266
	Частица в трехмерной потенциальной яме . . . . .	268
	Одномерный осциллятор . . . . .	269
	Трехмерный осциллятор . . . . .	270

36.6	Принцип соответствия Бора . . . . .	271
36.7	Отражение и туннелирование частиц . . . . .	273
	Низкий бесконечный барьер . . . . .	273
	Высокий бесконечный барьер . . . . .	275
	Конечный потенциальный барьер . . . . .	276
36.8	Оптическая аналогия прохождения частицы над барьером . . .	281
	Ступенчатый потенциал . . . . .	281
	Прямоугольный барьер конечной ширины . . . . .	283
	Прохождение света через многослойную структуру . . . . .	285
	Контрольные вопросы . . . . .	287

## Глава 37 Теория атома 289

37.1	Коммутирующие операторы . . . . .	289
37.2	Момент количества движения . . . . .	291
37.3	Атом водорода . . . . .	295
37.4	Спин электрона и тонкая структура спектров . . . . .	303
	Опыт Штерна—Герлаха . . . . .	306
37.5	Векторная модель атома . . . . .	310
37.6	Принцип Паули и валентность элементов . . . . .	312
	Эффективный заряд ядра, оценки потенциала ионизации и за- кон Мозли . . . . .	314
	Электронная конфигурация атомов . . . . .	316
37.7	Принцип тождественности частиц . . . . .	317
	Контрольные вопросы . . . . .	320

## Глава 38 Физическая природа химической связи 321

38.1	Молекулы . . . . .	321
	Ионная связь . . . . .	321
	Ковалентная связь . . . . .	323
	Комбинации различных типов связи . . . . .	328
38.2	Пространственное строение молекул . . . . .	330
38.3	Молекулярные спектры . . . . .	332
	Электронные уровни энергии . . . . .	333
	Энергия колебательного движения ядер . . . . .	333
	Энергия вращательного движения молекул . . . . .	334
	Молекулярные спектры . . . . .	335
38.4	Комбинационное рассеяние света . . . . .	336

## Часть VII Основы теории строения вещества 339

### Глава 39 Взаимодействие излучения с веществом 341

39.1	Вывод формулы Планка по Эйнштейну . . . . .	341
39.2	Общие сведения о лазерах . . . . .	345
	Прохождение излучения через вещество. Инверсия населеннос- тей . . . . .	345

Принцип работы лазера . . . . .	346
Типы лазеров . . . . .	349
39.3 Нелинейные эффекты в оптике . . . . .	352
Контрольные вопросы . . . . .	355
<b>Глава 40 Теплоемкость кристаллов. Статистика Бозе—Эйнштейна</b>	<b>357</b>
40.1 Классические представления о теплоемкости кристаллов . . . .	357
40.2 Средняя энергия квантового осциллятора . . . . .	359
Средняя энергия квантового ротатора . . . . .	361
40.3 Теплоемкость кристаллов по Эйнштейну . . . . .	363
40.4 Теория теплоемкости твердых тел Дебая . . . . .	364
Число колебаний в единице объема . . . . .	364
Характеристическая температура Дебая . . . . .	366
40.5 Фононы . . . . .	368
Линейная цепочка одинаковых атомов . . . . .	369
Линейная двухатомная цепочка . . . . .	370
Квантование колебаний кристаллической решетки . . . . .	373
40.6 Статистика Бозе—Эйнштейна . . . . .	375
Плотность квантовых состояний . . . . .	378
Конденсация Бозе—Эйнштейна . . . . .	379
Контрольные вопросы . . . . .	382
<b>Глава 41 Элементы физики твердого тела. Статистика Ферми—Дирака</b>	<b>383</b>
41.1 Энергетические зоны в твердых телах . . . . .	383
Применение оптической аналогии . . . . .	383
Формирование энергетических зон в кристалле . . . . .	384
41.2 Металлы, диэлектрики и полупроводники . . . . .	388
41.3 Теория свободных электронов в металле. Энергия Ферми . . .	390
Электронный газ при нулевой температуре . . . . .	393
41.4 Статистика Ферми—Дирака . . . . .	396
41.5 Распределение Ферми—Дирака . . . . .	396
41.6 Эффективная масса электрона . . . . .	404
41.7 Электропроводность металлов . . . . .	408
41.8 Полупроводники . . . . .	409
Дырки . . . . .	409
Собственная проводимость полупроводников . . . . .	412
Примесная проводимость полупроводников . . . . .	415
Контрольные вопросы . . . . .	420
<b>Глава 42 Контактные явления</b>	<b>421</b>
42.1 Работа выхода и контактная разность потенциалов в металле .	421
42.2 Термоэлектрические явления . . . . .	424
Термо-ЭДС . . . . .	425



ЭДС термопары . . . . .	428
Эффект Пельтье . . . . .	431
Эффект Томсона . . . . .	434
42.3 Полупроводниковые выпрямители . . . . .	438
Контактная разность потенциалов в $p$ - $n$ -переходе . . . . .	438
Сопротивление и односторонняя проводимость $p$ - $n$ -перехода . . . . .	439
Туннельный диод . . . . .	441
Фотоэлектрические явления в полупроводниках . . . . .	444
Контрольные вопросы . . . . .	448

## Глава 43 Макроскопические квантовые явления 449

43.1 Сверхтекучесть . . . . .	449
Элементы микроскопической теории сверхтекучести . . . . .	450
Сверхтекучесть конденсата . . . . .	452
43.2 Сверхпроводимость . . . . .	453
Эффект Мейснера и критические значения температуры и маг- нитного поля . . . . .	454
Сверхпроводники 2-го рода и вихри Абрикосова . . . . .	457
Промежуточное состояние . . . . .	461
Уравнение Лондонов . . . . .	462
Квантование магнитного потока . . . . .	464
Электрон-фононное взаимодействие и куперовские пары . . . . .	466
Микроскопическая теория сверхпроводимости (БКШ) . . . . .	467
Туннелирование электронов при контакте сверхпроводников . . . . .	471
Эффекты Джозефсона . . . . .	474
Контрольные вопросы . . . . .	481

## Часть VIII Основы физики микромира 483

### Глава 44 Физика атомного ядра 485

44.1 Состав атомного ядра . . . . .	485
44.2 Физическая природа ядерных сил . . . . .	487
44.3 Масса и дефект массы ядра . . . . .	489
44.4 Модели атомного ядра . . . . .	493
Модель жидкой капли . . . . .	493
Оболочечная модель ядра . . . . .	496
44.5 Радиоактивность . . . . .	499
Закон радиоактивного распада . . . . .	500
Распад «дочерних ядер» . . . . .	502
Альфа-распад . . . . .	505
Бета-распад . . . . .	508
Ядерные реакции и определение возраста археологических об- разцов радиоуглеродным методом . . . . .	510
44.6 Элементы дозиметрии . . . . .	518
44.7 Атомная и термоядерная энергетика . . . . .	524

Деление ядер . . . . .	524
Цепная реакция. Атомные бомбы и реакторы . . . . .	528
Термоядерная энергетика . . . . .	538
Контрольные вопросы . . . . .	543
 <b>Глава 45 Основные представления физики элементарных час-</b>	
<b>тиц</b> . . . . .	545
45.1 Фундаментальные взаимодействия . . . . .	545
Квантовая электродинамика . . . . .	546
Сильные ядерные взаимодействия . . . . .	549
Слабые взаимодействия . . . . .	553
Нарушение $P$ -, $C$ - и $CP$ -симметрии в слабых взаимодействиях . . . . .	557
45.2 Квантовая хромодинамика . . . . .	559
45.3 Кварки и лептоны в Стандартной теории . . . . .	563
Контрольные вопросы . . . . .	566
 <b>Глава 46 Элементарные частицы и космология</b> . . . . .	567
46.1 За пределами Стандартной модели . . . . .	568
Масса нейтрино . . . . .	568
Барионная асимметрия Вселенной . . . . .	569
Великое объединение . . . . .	570
Суперсимметрия . . . . .	571
Суперструны . . . . .	572
46.2 Вселенная — прошлое и будущее . . . . .	573
Расширяющаяся Вселенная и закон Хаббла . . . . .	573
Критическая плотность . . . . .	580
Темная материя . . . . .	581
Темная энергия . . . . .	585
Гравитация и планковские масштабы . . . . .	588
Горячая Вселенная и Большой взрыв . . . . .	590
Контрольные вопросы . . . . .	594
 <b>ЭПИЛОГ</b> . . . . .	595