

для
Чайников



Квантовая физика

для
чайников

3-е издание

Эндрю Циммерман Джонс

УДК 530.145
ББК 22.314
Д42

Quantum Physics For Dummies®, 3rd Edition by Andrew Zimmerman Jones

For Dummies® trademark is the exclusive property of Wiley and is used under license.

Original English language edition Copyright © 2024 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved including the right of reproduction in whole in part in any form. This translation published by arrangement with John Wiley & Sons, Inc.

Квантовая физика для чайников, 3-е издание © 2024 by John Wiley & Sons, Inc. Все права, включая право на воспроизведение, защищены полностью или частично в любой форме. Этот перевод опубликован по соглашению с John Wiley & Sons, Inc.

Wiley, the Wiley Publishing Logo, For Dummies, Dummies Man and related trade dress are trademarks or registered trademarks of John Wiley and Sons, Inc. and/or its affiliates in the United States and/or other countries. Used by permission.

Wiley, логотип the Wiley Publishing, For Dummies, «Для чайников», Dummies Man и связанные с ними элементы являются зарегистрированными товарными знаками John Wiley and Sons, Inc. и/или ее филиалами в США и других странах.

Используется с разрешения.

Джонс, Эндрю Циммерман.

Д42 Квантовая физика для чайников / Эндрю Циммерман Джонс ; [перевод с английского Г. А. Вакулко]. — Москва : Эксмо, 2026. — 352 с. — (Для чайников).

ISBN 978-5-04-223168-1

В этой книге читатели познакомятся с основными концепциями квантовой физики, такими как квантование энергии, корпускулярно-волновой дуализм, уравнение Шредингера, принципы матричной и волновой механики, а также с важными феноменами — квантовым туннелированием и суперпозицией. Узнают о таких достижениях науки, как квантовая электродинамика, теория поля, о роли бозона Хиггса, о том, как открытия в области квантовой физики используются в промышленности — от производства лазеров и полупроводников до квантовых компьютеров и ядерной энергетики.

Особое внимание уделено выдающимся ученым — Планку, Эйнштейну, Борну, Фейнману, — чьи открытия заложили фундамент квантовой физики.

Книга представляет собой подробное и доступное введение в основы квантовой физики для старшеклассников и первокурсников, раскрывает ключевые этапы ее развития с начала XX века.

УДК 530.145
ББК 22.314

ISBN 978-5-04-223168-1

© Вакулко Г.А., перевод на русский язык, 2026
© Оформление. ООО «Издательство «Эксмо», 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	13
Об этой книге	13
Глупые предположения	15
Обозначения, принятые в книге	15
Помимо книги	16
Навигация	16
1. НАЧАЛО РАБОТЫ С КВАНТОВОЙ ФИЗИКОЙ	17
Глава 1. Что же такое квантовая физика?	19
Классика: предквантовая физика	20
Что делает физику квантовой?	20
Дело масштаба, или масштаб дел	21
Измерения и наблюдаемые величины:	
Почему ученые знают, что квантовая физика верна	22
Правильные эксперименты	23
Доверяй, но проверяй правильные тесты	23
Глава 2. Стоя на плечах гигантов:	
Классическая физика	27
Объекты в движении: классическая механика	28
Ньютон устанавливает правила	28
Кинетическая энергия и импульс	30
Ловя волны	33
Некоторые свойства волнового фронта	33
Интерференция и суперпозиция волн	35
Да будет свет	37
Спор о природе света: корпускулы против колебаний	37
Противоречие в опыте Юнга с двумя щелями	39
Удивительные уравнения Максвелла	40
Эксперимент Майкельсона-Морли и загадочный отсутствующий эфир	44
Атомы: строительные кирпичи материи	46
Античный атомизм	47
Химики открывают атом (возможно)	47
И электрон	48
Термодинамика: еще одна горячая тема	50

Игры, в которые играют люди: Неизвестные и неопределенности	51
Бросок костей: Классическая вероятность	51
Неопределенности и отклонения	53
Глава 3. Квантовая революция	57
Дискретность: Проблема чернотельного излучения	58
Интуитивный (квантовый) скачок:	
спектр Макса Планка	60
Видя свет как частицы	62
Рассеяние света на электронах: Эффект Комптона	65
Атомная модель Бора	67
Изменение электронных орбит	68
Объяснение результатов с помощью модели Бора	69
Двойственная природа: Взгляд на частицы как на волны	69
Позитрон? Дирак и образование пар	71
Невозможно знать всё (Но можно выяснить?..)	72
Положение и импульс: принцип неопределенности	
Гейзенберга	72
Квантовые кости: новый взгляд на вероятность	75
Новый взгляд на свет: квантовая электродинамика	77
Что же колеблется?	77
Первые проблески КЭД	78
Фотон получает новую работу	80
Взламывая атомные части	83
Столкновение частиц для получения информации	84
Что удерживает атомное ядро	84
2. ОСНОВЫ: ПРИНЦИПЫ И ТЕОРИИ	
КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ	87
Глава 4. Квантовая механика:	
Состояния частиц и дуализм	89
Квантование и квантовые числа	89
Вечно вращающийся электрон	90
Фермионы и бозоны	91
Переосмысляя корпускулярно-волновой дуализм	92
Происхождение корпускулярно-волнового дуализма	92
Значение корпускулярно-волнового дуализма	93
Понимая суть антиматерии	94
Глава 5. Квантовая электродинамика и то, что за ней ...	95
Квантовая теория поля: Объяснение материи и энергии	95
Возвращаясь к квантовой электродинамике	96
Изучение ядерных сил и квантовой хромодинамики	97
Бозон Хиггса	98

Открывая возможности квантовой физики	100
Да будет свет из лазеров	100
Управление потоком с помощью полупроводников и транзисторов	101
Использование ядерной энергии	102
Переход на солнечную энергию	103
Глядя в будущее квантовых компьютеров	104
Вычисления с использованием суперпозиции состояний	104
Поддержание и развитие квантовых компьютеров	105

Глава 6. Квантовые коты и призрачное действие: интерпретации квантовой физики	107
Вопрос о том, чему требуется интерпретация	108
Интерпретация вероятности и измерения	108
Интерпретация эффекта наблюдателя	108
Возвращаясь к запутанности	110
Открывая, что наиболее распространенная интерпретация – это пожать плечами	111
Обзор трех интерпретаций квантовой физики	111
Самая популярная: копенгагенская интерпретация	112
Занимательная интерпретация: многомировая интерпретация	113
Ответственный подход: Скрытые параметры	113
Непрекращающиеся дебаты и споры	114
Обсуждаем (мертвого?) кота в комнате	115
Эйнштейн и жуткое действие на расстоянии	116
Изучая запутанные эксперименты	118
Неравенство Белла	118
Великий эксперимент Алена Аспе	119

3. В ЧИСЛАХ: ОСНОВЫ МАТЕМАТИКИ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

121

Глава 7. Погружение в матрицы: Знакомство с векторами состояния	123
Создание своих собственных векторов в Гильбертовом пространстве	124
Упрощая жизнь с обозначениями Дирака	126
Сокращение векторов состояния в виде кет	127
Запись эрмитова сопряжения в виде бра	128
Умножение бра и кет: Вероятность, равная 1	128
Охватывая все базисы: бра и кет как безбазисные векторы состояния	129
Понимание некоторых соотношений с помощью кет-векторов	130

Знакомство с операторами	132
Здравствуйте, оператор: Как работают операторы	132
Я этого ожидал: Нахождение средних значений	133
Рассмотрим линейные операторы	135
Знакомство с эрмитовыми операторами и сопряжениями	136
Вперед и назад: Нахождение коммутаторов	137
Коммутирующие операторы	137
Нахождение антиэрмитовых операторов	138
Начиная с нуля и заканчивая Гейзенбергом	138
Собственные векторы и собственные значения:	
Что это такое	141
Понимание принципа работы	143
Нахождение собственных векторов и собственных значений	144
Нахождение собственных значений	144
Нахождение собственных векторов	145
Подготовка к обращению: упрощение с унитарными операторами	146
Сравнение матричного и непрерывного подходов	147
Переход к непрерывному случаю с помощью интегрального исчисления	148
Делая волну	148
Глава 8. Застревая в энергетических ямах	151
Глядя в прямоугольную яму	152
Ловим частицы в потенциальной яме	154
Связывание частиц в потенциальных ямах	155
Выход из потенциальных ям	155
Ловим частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме ...	156
Определение энергетических уровней	159
Нормировка волновой функции	161
Добавление временной зависимости в волновые функции	162
Переход к симметричным прямоугольным потенциальным ямам	164
Ограниченный потенциал: взглянем на частицы и потенциальные ступеньки	165
Предположим, что частица обладает достаточной энергией	165
Случай, когда у частицы недостаточно энергии	170
Туннелирование через запрещенную область	174
Столкновение со стеной: частицы и потенциальные барьеры	174
Прохождение через потенциальные барьеры при $E > V_0$	175

Туннелирование через потенциальные барьеры при $E < V_0$	177
Несвязанные частицы: решение уравнения Шрёдингера для свободных частиц	179
Получение физической частицы с помощью волнового пакета	181
Разбираем пример с гауссовым пакетом	182

Глава 9. Туда-обратно с гармоническими осцилляторами

Разбираемся с гамильтонианом гармонического осциллятора	186
Классический подход к гармоническим колебаниям	186
Понимание полной энергии в квантовых колебаниях	187
Рождение и уничтожение: знакомство с операторами гармонического осциллятора	189
Следите за p и q : получение решения для энергетических состояний	190
Нахождение собственных состояний	192
Нахождение энергии состояния $ n\rangle$	192
Нахождение энергии $a^\dagger n\rangle$	193
Прямой вывод операторов a и a^\dagger	194
Нахождение собственных состояний энергии гармонического осциллятора	195
Немного возбуждения: поиск первого возбужденного состояния	198
Проверка реальности: подставляем числа	201

Глава 10. Работа с моментом импульса на квантовом уровне

Построение гамильтониана	206
Операторы в действии: кругом с угловым моментом	206
Нахождение коммутаторов L_x, L_y, L_z	208
Создание собственных состояний углового момента	209
Нахождение собственных значений углового момента	210
Вывод уравнений собственных состояний с β_{\max} и β_{\min}	210
Определение вращательной энергии двухатомной молекулы	214
Нахождение собственных значений повышающего и понижающего операторов	215
Интерпретация углового момента через матрицы	216
Операторы повышения и понижения	218
Завершающий штрих: Переход к сферическим координатам	219
Закладываем (сферический) фундамент	220

Собственные функции L_2 в сферических координатах ...	222
Собственные функции L^2 в сферических координатах ...	223
Назад к прямоугольным координатам	227

Глава 11. Головокружительное знакомство со спином .. 229

Исследование эксперимента Штерна-Герлаха и загадка исчезнувшего пятна	230
Погружаемся глубже в тему спина и собственных состояний	231
Знакомимся с половинами и целыми: поздоровайтесь с фермионами и бозонами	232
Операторы спина: Беготня вокруг углового момента	235
Определение операторов спина	235
Повышающие и понижающие операторы спина	236
Работа со спином $1/2$ и матрицами Паули	236
Матрицы спина $1/2$	237
Матрицы Паули	239

4. ПЕРЕХОД К ТРЕХМЕРНЫМ ВЫЧИСЛЕНИЯМ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ..... 241

Глава 12. Прямоугольные координаты: решение задач в трехмерном пространстве

Уравнение Шрёдингера в 3D	243
Преобразование уравнения Шрёдингера в прямоугольные координаты	244
Разделение уравнения Шрёдингера	245
Решение для свободной частицы в 3D	246
Нахождение уравнения полной энергии	248
Добавление временной зависимости	249
Поиск физического решения	249
Разбираемся с трехмерным прямоугольным потенциалом ...	251
Определение энергетических уровней	254
Нормировка волновой функции	254
Использование кубического потенциала	256
Пружиним в трехмерные гармонические осцилляторы	258
Потенциал трехмерной пружины	258
Решение уравнения Шрёдингера для трехмерной пружины	259
Энергия трехмерного осциллятора	260

Глава 13. Решение задач в сферических координатах

Выбор сферических координат	262
Рассматриваем центральные потенциалы в трех измерениях	263

Разбираем уравнение Шрёдингера	263
Угловая часть $\psi(r, \theta, \phi)$	265
Радиальная часть $\psi(r, \theta, \phi)$	265
Работа со свободными частицами в трехмерном пространстве	266
Сферические функции Бесселя и Неймана	268
Пределы для малых и больших ρ	269
Работа со сферически-симметричной прямоугольной потенциальной ямой	270
Заглядываем внутрь прямоугольной ямы: $0 < r < a$	271
За пределами прямоугольной потенциальной ямы: $r > a$	273
Изучаем особенности изотропного гармонического осциллятора	274
Глава 14. Простейший атом: Понимаем водород	277
Вспоминаем атомизм	278
Переходим к сути: уравнение Шрёдингера для атома водорода	279
Упрощение и разделение уравнения для атома водорода	281
Решение радиального уравнения Шрёдингера	284
Нахождение разрешенных энергий атома водорода	288
Построение формулы радиального решения	289
Обобщенный случай для водорода	291
Расчет энергетического вырождения	294
Квантовые состояния: добавляем спин	295
Охота за неуловимым электроном	297
Глава 15. Работа с множеством частиц и групповая динамика	299
Многочастичные системы	300
Рассмотрение волновых функций и гамильтонианов	301
Нобелевская возможность: рассматриваем многоэлектронные атомы	302
Рассмотрим мощнейший инструмент: симметрию перестановок	303
Плавающие автомобили: Решение систем многих различимых частиц	306
Жонглирование множеством идентичных частиц	307
Построение симметричных и антисимметричных волновых функций	310
Работа с идентичными невзаимодействующими частицами ...	311
Волновые функции двухчастичных систем	312
Волновые функции систем из трех и более частиц	313
Не всем вход разрешен: Принцип запрета Паули	313
Разбираемся в периодической таблице	314

Толкая систему: Теория возмущений	315
Введение в теорию возмущений	316
Работа с возмущениями невырожденных гамильтонианов	317
Работа с возмущениями вырожденных гамильтонианов	320
Когда частицы сталкиваются: теория рассеяния	321
Знакомство с рассеянием частиц и сечениями	322
Преобразование между системой центра масс и лабораторной системой	323
Отслеживание амплитуды рассеяния бесспиновых частиц	325
Борновское приближение: спасая волновое уравнение	326

5. СРЕДИ ДЕСЯТКОВ..... 329

Глава 16. Десять важнейших пионеров квантовой физики

Макс Планк (1858–1947)	331
Альберт Эйнштейн (1879–1955)	332
Нильс Бор (1885–1962)	332
Луи де Бройль (1892–1987)	333
Вернер Гейзенберг (1901–1976)	333
Эрвин Шрёдингер (1887–1961)	334
Поль Дирак (1902–1984)	334
Макс Борн (1882–1970)	335
Ричард Фейнман (1918–1988)	335
Мюррей Гелл-Манн (1929–2019)	336

Глава 17. Десять триумфов квантовой физики

Корпускулярно-волновой дуализм	337
Фотоэффект	337
Постулирование спина	338
Отличия между законами Ньютона и квантовой физики	338
Принцип неопределенности Гейзенберга	339
Квантовое туннелирование	339
Дискретный спектр атомов	340
Гармонический осциллятор	340
Прямоугольные ямы	341
Кот Шрёдингера	341

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

БЛАГОДАРНОСТИ

350

Введение

Физика как общая дисциплина не имеет границ — она охватывает физические явления от крайне больших (галактических масштабов) до очень маленьких (атомов и меньше). Эта книга посвящена именно очень маленькой стороне вещей — это специализация квантовой физики. Когда вы что-то квантуете, вы не можете уменьшать масштаб дальше — вы уже имеете дело с мельчайшими дискретными единицами материи.

Классическая физика прекрасно объясняет науку, стоящую за такими явлениями, как нагревание чашки кофе, ускорение при движении по наклонной плоскости или столкновение транспортных средств (как и миллион других вещей), но она сталкивается с проблемами, когда речь заходит о материи очень малых размеров. Квантовая физика обычно имеет дело с микромиром и исследует такие явления, как поведение отдельных электронов, движущихся вокруг ядра в атоме. И когда вы спускаетесь на этот крошечный уровень, происходящее может стать очень странным.

В квантовой физике содержатся принципы неопределенности, которые влияют на способность физиков точно определять физические характеристики частиц. Например, невозможно одновременно знать (с абсолютной точностью) точное положение частицы и ее импульс. Квантовая физика также объясняет, как работают энергетические уровни электронов, связанных в атоме. По мере того как физики все глубже искали способы моделирования реальности, квантовая физика позволила им больше узнать об этом микроскопическом мире материи и энергии. В этой книге вы познакомитесь со всеми этими темами и не только.

Об этой книге

Эта книга содержит необходимые для понимания концепты квантовой физики, включает историю ее открытия, объяснения (и мысленные эксперименты), описывающие ее основные проблемы и дискуссии, а также математический аппарат, необходимый для погружения в некоторые из ее центральных задач.

Квантовая физика — один из самых концептуально сложных для понимания предметов, известных науке. Это область, в которой даже самые выдающиеся эксперты могут вести горячие, принципиальные дебаты.

Первые несколько глав посвящены изучению предвосхищающей квантовую науку, тому, как были открыты идеи квантовой физики, и основным научным концепциям.

Но в конечном счете квантовая физика связана с решением уравнений, и эта книга не ускользает от этого. Начиная с главы 7, изложение предполагает довольно высокий уровень математической подготовки. Невозможно по-настоящему оценить предмет, не погрузившись в математический анализ, а также в такие области, как линейная алгебра и дифференциальные уравнения.

Читая книгу, вы обнаружите, что я использую следующие условные обозначения:

- » Курсивом выделяются технические термины, связанные с квантовой физикой, обычно при их первом появлении. За выделенным курсивом термином сразу следует его определение или объяснение. Когда этот термин встречается в последующих главах, он не обязательно выделяется курсивом.
- » Пронумерованные шаги при решении задач в этой книге помогают упорядочить процесс их решения.

Чтобы сделать материал более доступным, я разделил его на пять частей:

- » **Часть 1:** Начало изучения квантовой физики. В этой части вы познакомитесь с основными принципами квантовой физики, физическими концепциями, которые привели к их появлению, а также историей их открытия и развития.
- » **Часть 2:** Основы – принципы и теории квантовой физики. Эта часть поможет вам глубже погрузиться в концепции, лежащие в основе квантовой физики: от корпускулярно-волнового дуализма и различных типов физических частиц до возможных интерпретаций квантовой физики.
- » **Часть 3:** В числах – базовая математика квантовой физики. В этой части вы познакомитесь с математическим аппаратом, лежащим в основе открытий квантовой физики, включая обозначения, принятые физиками в этой области. Затем, опираясь на полученные знания, рассмотрите некоторые из наиболее простых задач, которые можно решить методами квантовой физики.
- » **Часть 4:** Трехмерные вычисления в квантовой физике. В этой части вы приступите к решению более сложных задач квантовой физики, включая использование прямо-

угольных и сферических координат. Вы также начнете изучать атом водорода и взаимодействие множества субатомных частиц.

- » **Часть 5:** Среди десятков. Вы можете насладиться этой частью, узнавая больше о ключевых фигурах и достижениях квантовой физики.

Глупые предположения

Я не предполагаю, что у вас есть какие-либо знания по квантовой физике, когда вы начинаете читать эту книгу. Однако я делаю следующие предположения:

- » Вы проходите университетский курс квантовой физики или интересуетесь тем, как математика описывает движение и энергию материи на атомном и субатомном уровнях.
- » У вас есть определенные математические навыки для понимания материала, начинающегося в главе 7. В частности, вы знаете математический анализ и тригонометрию, умеете пользоваться таблицей дифференциальных уравнений. Также у вас есть некоторый опыт работы с линейной алгеброй в описании гильбертова пространства.
- » Желательно иметь базовые знания классической физики. Если вы прошли годовой курс физики в колледже (или знаете все из книги «Физика для чайников»), у вас должна быть прочная база фундаментальных концепций.

Обозначения, принятые в книге



ПОДСКАЗКА

На полях этой книги вы встретите значки, которые привлекают внимание к определенным типам полезной информации. Вот эти значки и их краткое описание.



ЗАПОМНИ

Значок «Совет» отмечает подсказки и приемы, которые помогут вам легче освоить квантовую физику.



**ТЕХНИЧЕСКИЕ
ДЕТАЛИ**

Значок «Запомните» выделяет особенно важную информацию. Чтобы выделить самое главное в каждой главе, просто просмотрите места, отмеченные этими значками.

Значок «Технические детали» отмечает информацию сугубо технического характера, которую обычно можно пропустить.