

УДК 530.145
ББК 22.314
Л89

Переводчик Н. Лисова
Редактор А. Ростоцкая

Львовский А.

Л89 Отличная квантовая механика : Учеб. пособие : в 2 ч. / Александр Львовский ; Пер. с англ. — М.: Альпина нон-фикшн, 2019. — 422 с.

ISBN 978-5-91671-952-9

Ч. I. — 422 с.

Наряду с традиционным материалом, охватываемым курсом квантовой механики (состояния, операторы, уравнение Шрёдингера, атом водорода), в книге предлагается глубинное обсуждение таких концепций, как гильбертово пространство, квантовое измерение, запутанность и декогеренция. Эти концепции имеют решающее значение для понимания квантовой физики и ее связи с макроскопическим миром, но редко рассматриваются в учебниках начального уровня.

В книге применяется математически простая физическая система — поляризация фотонов — в качестве инструмента визуализации, что позволяет студенту увидеть запутанную красоту квантового мира с самых первых страниц. Формальные концепции квантовой физики проиллюстрированы примерами из современных экспериментальных исследований, таких как квантовые компьютеры, коммуникации, телепортация и нелокальность.

Материал книги успешно использовался в качестве основного учебного пособия в двухсеместровом курсе по квантовой механике для студентов-физиков. Однако потенциальный круг читателей много шире и охватывает как студентов и аспирантов, изучающих точные науки, так и всех интересующихся квантовой физикой и квантовыми технологиями. Математический аппарат, требующийся для понимания книги, не выходит за пределы курса технического вуза или математической школы.

Автор — профессор Оксфордского университета, экспериментатор с мировым именем в области квантовой оптики и квантовой информатики — применяет сократовскую педагогику: студенту предлагается самостоятельно разработать аппарат квантовой физики путем последовательного решения тщательно составленных задач. Подробные решения представлены во втором томе пособия.

УДК 530.145
ББК 22.314

Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу tylib@alpina.ru.

ISBN 978-5-91671-952-9 (рус.)
ISBN 978-3-662-56582-7 (англ.)

© Львовский А., 2019
© Издание на русском языке, перевод, оформление.
ООО «Альпина нон-фикшн», 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	11
Почему я написал эту книгу?	11
Квантовая механика или квантовая оптика?	14
Структура курса	16
Как пользоваться этой книгой (послание студенту)	18
ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОЯЗЫЧНОМУ ИЗДАНИЮ	21
ПРЕДИСЛОВИЕ РОССИЙСКОГО КВАНТОВОГО ЦЕНТРА ...	23
БЛАГОДАРНОСТИ	25
 ГЛАВА 1. КВАНТОВЫЕ ПОСТУЛАТЫ	29
1.1. Предмет квантовой механики.....	29
1.2. Постулат гильбертова пространства	31
1.3. Поляризация фотона	34
1.4. Квантовые измерения.....	38
1.4.1. Постулат об измерениях.....	38
1.4.2. Измерения поляризации.....	43
1.5. Квантовая интерференция и дополнительность	47
1.6. Квантовая криптография	51
1.6.1. Протокол BB84	53
1.6.2. Практические вопросы квантовой криптографии	56
1.7. Операторы в квантовой механике	59
1.8. Проекционные операторы и ненормированные состояния	63
1.9. Квантовые наблюдаемые.....	64
1.9.1. Наблюдаемые операторы	64
1.9.2. Среднее значение и неопределенность наблюдаемого....	66
1.9.3. Принцип неопределенности	69
1.10. Квантовая эволюция	71
1.11. Задачи	76
 ГЛАВА 2. ЗАПУТАННОСТЬ	
2.1. Пространство тензорных произведений	83
2.1.1. Тензорное произведение состояний и запутанные состояния	83
2.1.2. Измерения в составных пространствах	86
2.1.3. Тензорное произведение операторов	89
2.1.4. Локальные операторы	91

2.2. Локальные измерения запутанных состояний	93
2.2.1. Удаленное приготовление состояния	93
2.2.2. Частичное скалярное произведение	95
2.2.3. Локальные измерения и причинность	100
2.2.4. Смешанные состояния	102
2.3. Квантовая нелокальность	104
2.3.1. Парадокс Эйнштейна — Подольского — Розена	104
2.3.2. Неравенство Белла	107
2.3.3. Нарушение неравенства Белла	111
2.3.4. Нелокальность Гринбергера — Хорна — Цайлингера (ГХЦ)	115
2.4. Взгляд на квантовые измерения	118
2.4.1. Измерения фон Неймана	118
2.4.2. Декогеренция	121
2.4.3. Интерпретации квантовой механики	125
2.4.4. Дерево суперпозиции*	129
2.5. Квантовые вычисления	134
2.6. Квантовая телепортация и ее приложения	139
2.6.1. Квантовая телепортация	139
2.6.2. Квантовый повторитель	144
2.7. Задачи	148

ГЛАВА 3. ОДНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

3.1. Непрерывные наблюдаемые	153
3.2. Волна де Бройля	160
3.3. Координатный и импульсный базисы	163
3.3.1. Преобразование между координатным и импульсным базисами	163
3.3.2. Неопределенность координаты и импульса	166
3.3.3. Парадокс Эйнштейна — Подольского — Розена в первоначальном виде	168
3.4. Потенциал свободного пространства	170
3.5. Стационарное уравнение Шрёдингера	175
3.6. Связанные состояния	179
3.7. Несвязанные состояния	186
3.7.1. Потенциал-ступенька	187
3.7.2. Квантовое туннелирование	193
3.8. Гармонический осциллятор	198
3.8.1. Операторы уничтожения и рождения	199

3.8.2. Фоковские состояния	202
3.8.3. Когерентные состояния	210
3.9. Представление Гейзенберга.....	215
3.9.1. Эволюция оператора.....	216
3.9.2. Оператор смещения	222
3.9.3. Эволюция плотностей вероятности*.....	224
3.10. Преобразования состояний гармонического осциллятора	227
3.10.1. Когерентное состояние как смещенное вакуумное...227	
3.10.2. Фазовый сдвиг	229
3.10.3. Сжатие	231
3.11. Задачи.....	239

ГЛАВА 4. МОМЕНТ ИМПУЛЬСА

4.1. Трехмерное движение.....	247
4.2. Центральнo-симметричный потенциал	250
4.2.1. Сферические координаты	250
4.2.2. Квантовый момент импульса.....	254
4.3. Собственные состояния момента импульса	259
4.3.1. Матричное представление момента импульса	259
4.3.2. Волновые функции собственных состояний момента импульса	266
4.3.3. Спин	269
4.4. Атом водорода.....	270
4.4.1. Радиальные волновые функции	270
4.4.2. Энергетический спектр и переходы	273
4.4.3. Периодическая система элементов.....	279
4.5. Сфера Блоха	283
4.6. Магнитный момент и магнитное поле	287
4.6.1. Момент импульса и магнитный момент	287
4.6.2. Прибор Штерна — Герлаха	289
4.6.3. Эволюция магнитных состояний	291
4.7. Магнитный резонанс	293
4.7.1. Вращающийся базис	293
4.7.2. Эволюция в приближении вращающейся волны	298
4.7.3. Площадь импульса.....	301
4.7.4. Приложения магнитного резонанса	302
4.8. Задачи	307

ГЛАВА 5. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

5.1. Оператор плотности	313
5.1.1. Чистые и смешанные состояния	313
5.1.2. Диагональные и недиагональные элементы	316
5.1.3. Эволюция	320
5.2. След	322
5.3. Частичный след	325
5.4. Матрица плотности и вектор Блоха	328
5.5. Матрица плотности и магнитный резонанс	330
5.5.1. Декогеренция	330
5.5.2. Термализация	331
5.5.3. Релаксация и вектор Блоха	333
5.6. Обобщенные измерения	337
5.6.1. Реалистичный детектор	337
5.6.2. Положительная операторнозначная мера (POVM)	339
5.7. Квантовая томография	343
5.7.1. Томография квантового состояния	343
5.7.2. Томография квантового процесса	345
5.7.3. Томография квантового детектора	351
5.8. Задачи	352

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОСНОВЫ ЛИНЕЙНОЙ АЛГЕБРЫ

A.1. Линейные пространства	359
A.2. Базис и размерность	361
A.3. Скалярное произведение	363
A.4. Ортонормальный базис	365
A.5. Сопряженное пространство	367
A.6. Линейные операторы	369
A.6.1. Операции с линейными операторами	369
A.6.2. Матрицы	371
A.6.3. Внешние произведения	373
A.7. Сопряженные и самосопряженные операторы	376
A.8. Спектральное разложение	379
A.9. Коммутаторы	382
A.10. Унитарные операторы	383
A.11. Функции операторов	385

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ВЕРОЯТНОСТИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Б.1. Математическое ожидание и дисперсия	389
Б.2. Условные вероятности	390
Б.3. Биномиальное распределение и распределение Пуассона ...	392
Б.4. Плотности вероятности	395

ПРИЛОЖЕНИЕ В. ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ОПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В.1. Поляризация света	399
В.2. Поляризующий светоделитель	402
В.3. Волновые пластинки	403

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ДЕЛЬТА-ФУНКЦИЯ ДИРАКА И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ

Г.1. Дельта-функция Дирака	407
Г.2. Преобразование Фурье	409

ОБ АВТОРЕ	413
ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ	415