

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие. Взгляды четырех физиков</b> . . . . .	11
С.П. Кулик. Взгляд экспериментатора . . . . .	11
Про что книга . . . . .	11
Для кого книга . . . . .	11
Моя оценка книги . . . . .	12
Н.М. Щелкачёв. Взгляд теоретика . . . . .	15
Странички из дневника . . . . .	15
Наболевшие вопросы . . . . .	15
Великий почин . . . . .	16
Критические заметки . . . . .	16
Три источника и три составные части . . . . .	17
Что делать? . . . . .	17
Г.Г. Амосов. Взгляд матфизика . . . . .	18
Книга с высоты полета птицы . . . . .	18
Книга для меня . . . . .	18
Окно в будущее . . . . .	21
Чего нет в книге . . . . .	22
Неокопенгагенская парадигма . . . . .	23
Заключительный аккорд . . . . .	24
А.О. Чугунов. Взгляд биофизика . . . . .	26
С точки зрения молекулярной биологии . . . . .	27
Можно ли считать обоняние квантовым процессом? . . . . .	27
Структура реальности . . . . .	28
<b>Эпиграф</b> . . . . .	29
<b>Введение</b> . . . . .	30
Истоки и задачи книги . . . . .	30
Направления развития квантовой механики. Расширение копенгагенской интерпретации . . . . .	32
Содержание книги. Логика расположения материала . . . . .	41
<b>Часть I. БАЗОВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ</b> . . . . .	48
<b>Глава 1. Коллапс волновой функции</b> . . . . .	50
1.1. Камень преткновения . . . . .	52
1.2. Психофизический параллелизм фон Неймана . . . . .	55
1.3. Эволюция взглядов на копенгагенскую интерпретацию . . . . .	55
1.4. Как понимать квантовую механику . . . . .	58

Глава 2. <b>Принцип суперпозиции</b> . . . . .	61
2.1. Профили Бойтлера–Фано. Резонанс Фано . . . . .	62
2.2. Автоионизация . . . . .	67
2.3. Эффект Ааронова–Бома . . . . .	67
2.3.1. Движение классической частицы во внешнем электромагнитном поле . . . . .	68
2.3.2. Фазовый эффект . . . . .	70
2.3.3. Экспериментальная проверка эффекта . . . . .	77
2.3.4. Эффект для связанных состояний. . . . .	81
2.3.5. Эффекты высшего порядка . . . . .	88
2.4. Интерференция на щели во времени . . . . .	89
2.4.1. Эксперимент . . . . .	89
2.4.2. Асимметрия импульса . . . . .	92
2.5. Интерференция одиночных частиц. . . . .	93
2.5.1. Дифракция одиночных частиц . . . . .	94
2.5.2. Интерференция одиночных больших молекул на дифракционных решетках . . . . .	95
Глава 3. <b>Когерентность</b> . . . . .	97
3.1. Некогерентная смесь . . . . .	97
3.2. Когерентная смесь. . . . .	98
3.3. Кубиты и основные операции над ними . . . . .	100
Глава 4. <b>Переплетенные (entangled) состояния</b> . . . . .	104
4.1. Парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена . . . . .	105
4.2. Парадокс кошки Шрёдингера. . . . .	106
4.3. Переплетение по Бому . . . . .	107
4.4. Пары Бома (ЭПР) . . . . .	111
4.5. Мера переплетенности. . . . .	112
4.5.1. Число Шмидта . . . . .	113
4.5.2. Число Фёдорова . . . . .	116
4.5.3. Определение числа Фёдорова в эксперименте . . . . .	119
4.5.4. Другие критерии: энтропия фон Неймана и concurrence . . . . .	121
4.6. Эффект Ааронова–Бома как следствие квантовых корреляций . . . . .	123
4.7. Переплетение разных «сущностей» . . . . .	127
4.7.1. Переплетение разных атомов. Эксперимент . . . . .	127
4.7.2. Переплетение электронных и колебательных состояний в связанных молекулах . . . . .	131
4.8. Контролируемые квантовые операции . . . . .	134
<b>Часть II. ОДНОЧАСТИЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ</b> . . . . .	138
Глава 5. <b>Декогеренция</b> . . . . .	139
5.1. Концепция декогеренции . . . . .	140
5.2. Квантовый ластик . . . . .	142
5.3. Динамика процесса декогеренции . . . . .	143
5.4. Неоднозначность выбора базисных состояний. Теорема о единственности . . . . .	145

5.5. Декогеренция при интерференции одиночных больших молекул на дифракционных решетках . . . . .	147
5.5.1. Влияние давления остаточного газа . . . . .	147
5.5.2. Влияние температуры молекул . . . . .	148
5.5.3. Предварительные выводы . . . . .	150
5.6. Предельные значения времен когерентности . . . . .	150
5.7. Решает ли декогеренция проблему квантовых измерений? . . . . .	156
<b>Глава 6. Квантовые измерения . . . . .</b>	<b>159</b>
6.1. Неселективный и селективный этапы измерения . . . . .	160
6.2. Квантовый эффект Зенона . . . . .	163
6.2.1. Постановка задачи описания непрерывно измеряемых систем . . . . .	163
6.2.2. Теория эффекта . . . . .	163
6.2.3. Замораживание атомных состояний. Эксперимент . . . . .	165
6.2.4. Замораживание тунелирования. Эксперимент . . . . .	166
6.3. Однократные нечеткие измерения . . . . .	168
6.3.1. Постановка задачи . . . . .	169
6.3.2. Математический аппарат . . . . .	170
6.3.3. Несводимость нечетких измерений к обычному описанию в рамках теории вероятности . . . . .	171
6.4. Непрерывные нечеткие измерения . . . . .	172
6.4.1. Общее описание . . . . .	172
6.4.2. Частица в решетке осцилляторов . . . . .	173
6.4.3. Уравнение Линдблада . . . . .	174
6.4.4. Уравнение Белавкина . . . . .	175
6.5. Измерение волновой функции ансамбля частиц . . . . .	176
6.5.1. Математическая модель . . . . .	176
6.5.2. Эксперимент . . . . .	184
6.6. Экспериментальная проверка информационного принципа . . . . .	186
6.6.1. Постановка проблемы . . . . .	186
6.6.2. Эксперимент . . . . .	189
6.7. Неравенства Леггетта–Гарга . . . . .	190
6.7.1. Принцип макроскопического реализма . . . . .	190
6.7.2. Нарушение неравенств Леггетта–Гарга . . . . .	194
6.7.3. Экспериментальная проверка . . . . .	199
<b>Глава 7. Контрафактные измерения и контрафактная связь. Отделение информации от материи . . . . .</b>	<b>200</b>
7.1. Бомба Элицура–Вайдмана . . . . .	201
7.2. Улучшенный протокол. Использование эффекта Зенона . . . . .	203
7.3. Контрафактная связь. Отделение информации от материи . . . . .	206
7.4. Технически реализуемая схема контрафактной связи . . . . .	215
7.5. Экспериментальное осуществление контрафактной связи . . . . .	223
7.6. Квантовый Чеширский Кот . . . . .	223
7.7. Нелокальность . . . . .	225
<b>Глава 8. Новая область квантовой метрологии . . . . .</b>	<b>227</b>
8.1. Измерение скалярной поляризуемости . . . . .	227
8.2. Информация о структуре молекул . . . . .	228
8.3. Перспективы квантовой интерференции биологических наночастиц . . . . .	230

Глава 9. <b>Волновые пакеты</b> . . . . .	233
9.1. Основные идеи фемтохимии . . . . .	233
9.2. Нерасплывающиеся электронные волновые пакеты . . . . .	237
9.3. Неявное нерасплывание волновых пакетов в численных методах . . . . .	239
<b>Часть III. КВАНТОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ</b> . . . . .	240
Глава 10. <b>Неравенство Белла</b> . . . . .	241
10.1. Принципиальная схема экспериментальной установки . . . . .	242
10.2. Преобразование в одном плече . . . . .	243
10.3. Квантовые корреляции . . . . .	244
10.3.1. Преобразование двух фотонов . . . . .	245
10.3.2. Наблюдаемые и их корреляции . . . . .	245
10.3.3. Наблюдаемые Белла . . . . .	247
10.4. Корреляции в теории со скрытыми параметрами . . . . .	247
10.5. Экспериментальная проверка . . . . .	250
10.5.1. Нарушение неравенства Белла . . . . .	250
10.5.2. Нарушение локального реализма . . . . .	251
10.5.3. Закрытие «лазеек» . . . . .	252
10.5.4. Мезоскопические электронные системы . . . . .	253
10.5.5. Ионные пары . . . . .	258
10.5.6. Резюме . . . . .	258
10.6. «Квантовый» вампир . . . . .	259
Глава 11. <b>Квантовая телепортация</b> . . . . .	261
11.1. Эксперимент . . . . .	261
11.2. Интерпретация . . . . .	264
11.3. Вентильная схема . . . . .	266
11.4. На пути к глобальному квантовому интернету . . . . .	270
Глава 12. <b>Теоремы о невозможности</b> . . . . .	273
12.1. Неклонированность и ее следствия . . . . .	274
12.2. Невозможность удаления квантовой информации . . . . .	277
12.2.1. Теорема о неудаении квантовой информации . . . . .	277
12.2.2. Информационный парадокс черных дыр . . . . .	280
12.3. Невозможность сверхсветовой передачи сигнала с помощью квантовых корреляций . . . . .	284
Глава 13. <b>Квантовая криптография</b> . . . . .	288
13.1. Код Вернама . . . . .	289
13.2. Квантовое распределение ключа с одиночными частицами . . . . .	290
13.3. Квантовое распределение ключа с помощью бифотонов Клышко . . . . .	292
13.4. Передача классической и квантовой информации через квантовый канал связи . . . . .	294
13.5. Генераторы случайных чисел . . . . .	295
13.6. Прорыв в будущее . . . . .	297
<b>Часть IV. КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ</b> . . . . .	300
Глава 14. <b>Квантовый компьютер</b> . . . . .	301
14.1. Общая схема квантового компьютера . . . . .	302
14.2. Алгоритмы черного ящика («оракульные») . . . . .	304

14.2.1. Общая схема построения квантовых оракульных алгоритмов . . .	304
14.2.2. Алгоритм Дойча . . . . .	307
14.2.3. Алгоритм Дойча–Джоза . . . . .	308
14.2.4. Алгоритм Гровера . . . . .	311
14.2.5. Эмуляция классического компьютера квантовой машиной . . . . .	314
14.3. Алгоритм Шора . . . . .	315
14.4. Коды коррекции ошибок. Пороговая теорема . . . . .	320
<b>Глава 15. Адиабатический квантовый компьютер . . . . .</b>	<b>325</b>
15.1. Общие принципы работы . . . . .	325
15.2. Универсальность . . . . .	328
15.3. Практические попытки . . . . .	335
<b>Часть V. КВАНТОВЫЕ СИМУЛЯТОРЫ . . . . .</b>	<b>337</b>
<b>Глава 16. Общие методы построения квантовых симуляторов . . . . .</b>	<b>338</b>
16.1. Гамильтониан молекулярной системы в представлении вторичного квантования . . . . .	340
16.2. Представление Йордана–Вигнера . . . . .	343
16.3. Преобразование Бравого–Китаева . . . . .	345
<b>Глава 17. Цифровые квантовые симуляторы . . . . .</b>	<b>353</b>
17.1. Метод оценки фазы . . . . .	353
17.1.1. Общая идея . . . . .	354
17.1.2. Вентильная схема оператора эволюции . . . . .	356
17.1.3. Итеративный алгоритм оценки фазы Китаева . . . . .	362
17.1.4. Неитеративный алгоритм оценки фазы . . . . .	372
17.1.5. Эффективность алгоритма оценки фазы . . . . .	375
17.2. Вариационные методы . . . . .	377
17.2.1. Общий алгоритм, использующий вариационный метод . . . . .	377
17.2.2. Квантовый алгоритм вычисления средних значений оператора, который можно представить в виде произведений операторов Паули . . . . .	380
17.2.3. Построение оператора, осуществляющего подбор пробной волновой функции . . . . .	383
17.2.4. Вычисление энергии возбужденных состояний . . . . .	385
17.2.5. Достоинства и недостатки вариационных методов . . . . .	386
17.3. Экспериментальные прототипы . . . . .	387
17.3.1. На фотонах . . . . .	388
17.3.2. На спинах ядер . . . . .	389
17.3.3. На спиновых состояниях атомов в кристалле . . . . .	389
17.3.4. На сверхпроводящих кольцах . . . . .	390
17.3.5. На ионах . . . . .	390
<b>Глава 18. Метод адиабатических вычислений . . . . .</b>	<b>392</b>
18.1. Общие принципы работы . . . . .	394
18.2. Теорема гаджетов . . . . .	398
18.3. Улучшенный гаджет деления Оливера–Терхала . . . . .	401
18.4. Гаджет параллельного деления . . . . .	405

18.5. Итерационный алгоритм сведения $k$ -частичного гамильтониана к трехчастичному . . . . .	410
18.6. Улучшенный гаджет Оливера–Терхала для аппроксимации трехчастичного гамильтониана двухчастичным. . . . .	414
18.7. Параллельная аппроксимация трехчастичного гамильтониана двухчастичным . . . . .	418
18.8. Аппроксимация молекулярного гамильтониана $ZZX$ -гамильтонианом	422
18.9. Достоинства и недостатки . . . . .	428
<b>Глава 19. Квантовый симулятор с гамильтонианом типа решетки Изинга</b>	430
19.1. Кодирование произвольного вектора состояния с помощью кубитовой таблицы . . . . .	432
19.2. Теорема отображения произвольного гамильтониана на гамильтониан типа решетки Изинга . . . . .	434
19.3. Алгоритм отображения гамильтониана молекулы на гамильтониан типа решетки Изинга . . . . .	441
19.4. Гаджет деления диагонального гамильтониана . . . . .	447
19.5. Вычислительная сложность, достоинства и недостатки. . . . .	450
19.6. Экспериментальная реализация . . . . .	451
<b>Часть VI. КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ФОТОНАХ</b> . . . . .	454
<b>Глава 20. Фотоны как носители квантовой информации</b> . . . . .	456
<b>Глава 21. Детерминированный вентиль CNOT</b> . . . . .	461
21.1. Оптический вентиль Фредкина . . . . .	462
21.2. Вентиль CNOT на четырехфотонной параметрической конверсии во внешнем лазерном поле. . . . .	468
<b>Глава 22. Вероятностный вентиль CNOT</b> . . . . .	475
22.1. Четырехфотонный вентиль CNOT . . . . .	476
22.1.1. Вероятностная телепортация фотона . . . . .	476
22.1.2. Использование схемы квантовой телепортации как деструктивного вентиля CNOT . . . . .	481
22.1.3. Четырехфотонный вероятностный вентиль CNOT . . . . .	485
22.2. Двухфотонный вентиль CNOT . . . . .	486
22.2.1. Двухфотонный деструктивный вентиль CNOT . . . . .	487
22.2.2. Двухфотонный вентиль кодирования. . . . .	490
22.2.3. Двухфотонный вероятностный вентиль CNOT. . . . .	493
<b>Глава 23. Другие методы построения оптического квантового компьютера</b> . . . . .	495
23.1. Метод Река–Цайлингера . . . . .	495
23.2. Метод однонаправленных (кластерных) вычислений. . . . .	503
<b>Часть VII. ОТ ФИЗИКИ К БИОЛОГИИ</b> . . . . .	505
<b>Глава 24. Квантовая биология</b> . . . . .	506
24.1. Психофизический параллелизм фон Неймана . . . . .	507
24.2. Обоняние . . . . .	508
24.2.1. Эмпирический механизм . . . . .	508
24.2.2. Неупругое туннелирование электрона с колебательным возбуждением одоранта . . . . .	510

24.3. Другие квантовые явления . . . . .	512
24.3.1. Фотосинтез . . . . .	512
24.3.2. «Бактерия Шрёдингера» . . . . .	514
24.3.3. Зрение . . . . .	515
24.3.4. Магниторецепция . . . . .	516
24.3.5. Практические приложения . . . . .	519
<b>Глава 25. Двойственность взаимоотношений классической и квантовой механики</b> . . . . .	<b>520</b>
25.1. Предельный случай при $\hbar \rightarrow 0$ . . . . .	521
25.2. Наблюдатель . . . . .	522
25.3. Коллапс волновой функции как специфическое качество живого . . . . .	523
25.4. Поворот к биологии . . . . .	524
25.4.1. Возможные альтернативы . . . . .	525
25.4.2. Объективный (спонтанный) коллапс . . . . .	527
25.4.3. Гипотезы многих миров и многих разумов . . . . .	530
25.4.4. Отказ от редукционизма . . . . .	533
25.5. Нервный импульс как распространение волновой функции . . . . .	535
25.5.1. Отказ от психофизического параллелизма фон Неймана . . . . .	535
25.5.2. Предпосылки нового взгляда . . . . .	536
25.5.3. Распространение когерентной квантовой информации в нервной системе . . . . .	540
25.5.4. Самофокусировка распространения когерентной квантовой информации в живой клетке . . . . .	543
25.5.5. Завершение нервного импульса . . . . .	544
<b>Часть VIII. ПОДВЕДЕМ ИТОГИ</b> . . . . .	<b>546</b>
<b>Глава 26. Как понимать квантовую механику</b> . . . . .	<b>548</b>
26.1. Новый подход к взгляду на мир . . . . .	548
26.2. Самостоятельная область знаний . . . . .	550
<b>Глава 27. Проблемы квантовой механики</b> . . . . .	<b>553</b>
27.1. Экспериментальные исследования . . . . .	553
27.2. Развитие базовых представлений квантовой механики . . . . .	554
27.3. Практические использования парадоксальных идей . . . . .	557
27.4. Связь квантовой механики с физиологией и высшей нервной деятельностью . . . . .	562
<b>Глава 28. Три «великие» проблемы В.Л. Гинзбурга</b> . . . . .	<b>563</b>
28.1. Проблема интерпретации и понимания квантовой механики . . . . .	564
28.1.1. Свидетельствуют эксперименты . . . . .	564
28.1.2. Формируются новые фундаментальные понятия . . . . .	570
28.1.3. Убеждают приложения . . . . .	572
28.2. Возрастание энтропии, необратимость и «стрела времени» . . . . .	576
28.3. О связи физики с биологией и конкретно проблема редукционизма . . . . .	579
<b>Глава 29. Взгляд в будущее научно-технического прогресса</b> . . . . .	<b>583</b>
29.1. Прогноз пессимиста . . . . .	584
29.2. Альтернативный прогноз . . . . .	585
29.3. Наука о материалах . . . . .	589

29.4. Молекулярное моделирование — магистральное направление науки . . .	594
29.4.1. Неравновесность. Динамика и кинетика . . . . .	595
29.4.2. Предсказательная способность . . . . .	598
29.4.3. Обнаружение новых эффектов . . . . .	600
29.4.4. Многомасштабный подход . . . . .	601
29.5. Экстремальные состояния вещества . . . . .	602
29.6. Вычислительная техника . . . . .	605
29.7. Проблемы астро- и микрофизики . . . . .	607
29.7.1. Астрофизика . . . . .	607
29.7.2. Космология . . . . .	609
29.7.3. Физика элементарных частиц. Новая физика . . . . .	610
29.7.4. Квантовая гравитация . . . . .	611
29.8. Квантовая гравитация в ньютоновском пределе . . . . .	612
29.8.1. Постановка фундаментальной проблемы . . . . .	613
29.8.2. Эксперимент с двумя гравитационно-связанными интерферометрами . . . . .	615
29.8.3. Эксперимент с гауссовым состоянием бозе-конденсата . . . . .	619
29.8.4. Сравнение экспериментов, обсуждение и выводы . . . . .	622
29.9. Расширенной копенгагенской интерпретации нет альтернативы . . . . .	625
29.10. Неокопенгагенская парадигма . . . . .	627
29.10.1. Вторая квантовая революция . . . . .	627
29.10.2. Перспективы . . . . .	631
Глава 30. <b>Заключение: начинается новый подъем науки</b> . . . . .	634
Приложение 1. <b>Другие интерпретации квантовой механики</b> . . . . .	640
Приложение 2. <b>Альтернативные теории мира (альтернативы квантовой механике)</b> . . . . .	653
Приложение 3. <b>Карл Поппер о ключевых проблемах науки XX в.</b> . . . .	656
Приложение 4. <b>Математические подходы и численные методы квантовой механики</b> . . . . .	663
П4.1. Теория многих частиц . . . . .	663
П4.2. Сильные корреляции . . . . .	671
П4.3. Фейнмановское представление . . . . .	675
П4.4. Квантовая томография . . . . .	677
П4.5. Двухмасштабное атомистическое моделирование . . . . .	678
Приложение 5. <b>Два специальных вопроса квантовой механики</b> . . . . .	680
Список литературы . . . . .	684
Об авторах . . . . .	735