

А.В. ЛАНКИН, Г.Э. НОРМАН

**НОВОСТИ, ОСНОВАНИЯ
И ПРОБЛЕМЫ
КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ**

**НЕОКОПЕНГАГЕНСКАЯ
ПАРАДИГМА**

С ПРЕДИСЛОВИЕМ

**С.П. КУЛИКА
Н.М. ЩЕЛКАЧЁВА
Г.Г. АМОСОВА
А.О. ЧУГУНОВА**



**МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2023**

УДК 501, 539.21
ББК 22.314
Л 22

*Благодарим Российский научный
фонд за поддержку по грантам
№ 14-19-01295 и № 18-19-00734*

Ланкин А. В., Норман Г. Э. **Новости, основания и проблемы квантовой механики. Неокопенгагенская парадигма.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2023. — 736 с. — ISBN 978-5-9221-1973-3.

Книга посвящена текущему состоянию квантовой механики, перспективам ее развития и усилению ее влияния на научно-технический прогресс. В основе утверждение Э. Леггетта 2002 г., что квантовая механика — это не просто «теория», а радикальное изменение парадигмы в истории человеческой мысли. Мы дали ей название «неокопенгагенская», чтобы подчеркнуть как развитие по сравнению с копенгагенской интерпретацией, так и преемственность с ней. Изложены базовые представления: коллапс волновой функции, принцип суперпозиции, интерференция одиночных частиц, когерентность, переплетенные (entangled) состояния. Рассмотрены декогеренция, квантовая теория измерений, включая контрафактные, неравенство Леггетта–Гарга, нелокальность. Раскрыты квантовые корреляции, где ключевым является неравенство Белла, квантовая телепортация, теоремы о невозможности, квантовая связь. Дан анализ квантовых вычислений: квантовые компьютер и симуляторы, адиабатические вычисления, вычисления на фотонах. Далее переходим к появившимся проявлениям парадоксальных идей квантовой механики в биологии: фотосинтез, обоняние, магниторецепция и др. Раскрывается смысл двойственности взаимоотношений классической и квантовой механики. Указаны пути решения трех «великих» проблем В. Л. Гинзбурга. Представлен взгляд на будущее науки и технологии. Формулируются уже возникшие черты неокопенгагенской парадигмы.

Книга рассчитана на студентов, аспирантов и научных работников, изучавших университетский курс квантовой механики.

ISBN 978-5-9221-1973-3

© ФИЗМАТЛИТ, 2023

© А. В. Ланкин, Г. Э. Норман, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие. Взгляды четырех физиков	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
Эпиграф	29
Введение	30
Истоки и задачи книги	30
Направления развития квантовой механики. Расширение копенгагенской интерпретации	32
Содержание книги. Логика расположения материала	41
Часть I. БАЗОВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ	48
Глава 1. Коллапс волновой функции	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. Принцип суперпозиции	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. Когерентность	97
3.1. Некогерентная смесь	97
3.2. Когерентная смесь	98
3.3. Кубиты и основные операции над ними	100
Глава 4. Переплетенные (entangled) состояния	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
Часть II. ОДНОЧАСТИЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ	138
Глава 5. Декогеренция	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
Глава 6. Квантовые измерения	159
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
Глава 7. Контрафактные измерения и контрафактная связь. Отделение информации от материи	200
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
Глава 8. Новая область квантовой метрологии	227
8.1. Измерение скалярной поляризуемости	227
8.2. Информация о структуре молекул	228
8.3. Перспективы квантовой интерференции биологических наночастиц	230

Глава 9. Волновые пакеты	233
9.1. Основные идеи фемтохимии	233
9.2. Нерасплывающиеся электронные волновые пакеты.	237
9.3. Неявное нерасплывание волновых пакетов в численных методах	239
Часть III. КВАНТОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ	240
Глава 10. Неравенство Белла	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. Квантовая телепортация	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. Теоремы о невозможности	273
12.1. Неклонированность и ее следствия	274
12.2. Невозможность удаления квантовой информации.	277
12.2.1. Теорема о неудалении квантовой информации.	277
12.2.2. Информационный парадокс черных дыр	280
12.3. Невозможность сверхсветовой передачи сигнала с помощью квантовых корреляций	284
Глава 13. Квантовая криптография	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
Часть IV. КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ	300
Глава 14. Квантовый компьютер	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
Глава 15. Адиабатический квантовый компьютер	325
15.1. Общие принципы работы	325
15.2. Универсальность	328
15.3. Практические попытки	335
Часть V. КВАНТОВЫЕ СИМУЛЯТОРЫ	337
Глава 16. Общие методы построения квантовых симуляторов	338
16.1. Гамильтониан молекулярной системы в представлении вторичного квантования	340
16.2. Представление Йордана–Вигнера	343
16.3. Преобразование Бравого–Китаева	345
Глава 17. Цифровые квантовые симуляторы	353
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
Глава 18. Метод адиабатических вычислений	392
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 $ZZXX$ -гамильтонианом	422
18.9. Достоинства и недостатки	428
Глава 19. Квантовый симулятор с гамильтонианом типа решетки Изинга	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
Часть VI. КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ФОТОНАХ	454
Глава 20. Фотоны как носители квантовой информации	456
Глава 21. Детерминированный вентиль CNOT	461
21.1. Оптический вентиль Фредкина	462
21.2. Вентиль CNOT на четырехфотонной параметрической конверсии во внешнем лазерном поле	468
Глава 22. Вероятностный вентиль CNOT	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
Глава 23. Другие методы построения оптического квантового компьютера	495
23.1. Метод Река–Цайлингера	495
23.2. Метод однонаправленных (кластерных) вычислений	503
Часть VII. ОТ ФИЗИКИ К БИОЛОГИИ	505
Глава 24. Квантовая биология	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
Глава 25. Двойственность взаимоотношений классической и квантовой механики	520
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
Часть VIII. ПОДВЕДЕМ ИТОГИ	546
Глава 26. Как понимать квантовую механику	548
26.1. Новый подход к взгляду на мир	548
26.2. Самостоятельная область знаний	550
Глава 27. Проблемы квантовой механики	553
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
Глава 28. Три «великие» проблемы В.Л. Гинзбурга	563
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
Глава 29. Взгляд в будущее научно-технического прогресса	583
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. Заключение: начинается новый подъем науки	634
Приложение 1. Другие интерпретации квантовой механики.	640
Приложение 2. Альтернативные теории мира (альтернативы квантовой механике)	653
Приложение 3. Карл Поппер о ключевых проблемах науки XX в.	656
Приложение 4. Математические подходы и численные методы квантовой механики.	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. Два специальных вопроса квантовой механики	680
Список литературы	684
Об авторах	735

ПРЕДИСЛОВИЕ. ВЗГЛЯДЫ ЧЕТЫРЕХ ФИЗИКОВ

С.П. Кулик ¹⁾). Взгляд экспериментатора

Про что книга. Эта книга — не учебник: вряд ли квантовую механику можно было бы изучить, прочитав ее. Аналогичное утверждение можно сделать относительно принципов квантовых вычислений и/или квантовой связи, работы квантовых алгоритмов и других затрагиваемых тем. Изложение строится на основе аппаратов квантовой механики, классической и квантовой электродинамики и статистической физики. При этом зачастую обсуждаемые термины, понятия, эффекты и явления не вводятся строго: авторы апеллируют к базовым знаниям читателя, знакомого не только с традиционными университетскими курсами теоретической физики, но и с современными исследованиями в области квантовой обработки информации (КОИ) и квантовых технологий (КТ).

Скорее, эта книга даст пищу для размышлений, а может быть, ответы на некоторые вопросы, возникшие при изучении квантовой механики и/или при анализе результатов, изложенных в оригинальных научных статьях. Для неискушенных в области квантовой механики читателей я бы посоветовал начать чтение с гл. 29 (Взгляд в будущее научно-технического прогресса), в которой доступным языком изложены не только перспективы КОИ и КТ, но и завязывается интрига возможностей и альтернативных развилок эволюции этой стремительно развивающейся области знаний.

Книга охватывает большой круг проблем, восходящих к квантово-механическому описанию явлений: от свойств одиночных (квантовых) объектов до космологии и квантовой гравитации.

Для кого книга. На мой взгляд, книга поможет тем, кто неоднократно и глубоко задумывался над гносеологическими проблемами квантовой механики и ее интерпретации. Только тогда рассуждения авторов по соответствующим вопросам могут оказаться полезными. По моему мнению, авторам удалось не только систематизировать материал, но и дать собственные оценки по таким проблемным вопросам, как эффект Ааронова–Бома, парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена, интерпретация неравенств Белла, парадокс «кошки Шрёдингера» и использования эффекта Зенона в квантовой связи и многим другим. Эти оценки строятся на основе многолетнего опыта

¹⁾ Сергей Павлович Кулик — доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ, ученик Д.Н. Клышко, создатель и руководитель научной школы, организатор и научный руководитель Центра квантовых технологий МГУ им. М.В. Ломоносова.

работы в физике (не только в квантовой механике) и системного изложения материала в лекционных курсах.

И уж точно, ее не следует читать тем, кто узнал о «парадоксах» квантовой механики из научно-популярных книг или средств массовой информации. К сожалению, так получается, что колоссальные успехи в области КОИ за последние десятилетия сопровождаются беспрецедентным хайпом ¹⁾. Отчасти это оправдывается необходимостью получения научными группами финансирования, для чего и происходит переложение научного языка на бытовой, понятный чиновникам. При этом научные перспективы КОИ оборачиваются необоснованными обещаниями, которые масштабируются в переложении невежественных интерпретаторов; они попадают в масс-медиа, где преподносятся в виде горячих новостей. Яркий пример — ситуация с квантовыми вычислениями — одной из субтехнологий квантовых технологий, в которой к публичным прогнозам следует относиться с крайней осторожностью. В этой связи базовые знания квантовой теории, на мой взгляд, совершенно необходимы при чтении книги. Чтение сверху вниз, опирающееся лишь на отрывочные и полуинтуитивные знания в области КОИ, скорее сыграет злую шутку, поскольку разрыв между интуицией и базовым знанием в рамках этой книги преодолеть вряд ли удастся.

Моя оценка книги. Я сам склоняюсь к мысли о том, что квантовую механику надо воспринимать в контексте утверждения «Shutupandcalculate» ²⁾. Интерпретация — дело вкуса и порой необъяснимые с привычных классических позиций явления проще воспринимать не сквозь призму натянутых объяснений и аналогий, а используя строгий аппарат математики и квантовой теории. Это не означает, что не надо задумываться над сутью происходящих вещей. Просто понятие «суть» плохо определено, и здесь, на мой взгляд, следует руководствоваться четкими границами используемых моделей физических теорий и их математического описания. Конечно, огромная роль принадлежит эксперименту и физической интуиции: осознание аспектов квантовой теории происходит именно от эксперимента, т. е. от постановки и проведения собственно экспериментов, до анализа результатов и написания статьи. Тот факт, что одиночный электрон, зачастую представляемый шариком, может одновременно пройти через пару щелей в опыте Юнга так, как это происходит с плоской волной, зачастую ставит в тупик. Перевод проблемы интерпретации результатов этого эксперимента в область сложения амплитуд вероятностей с последующим возведением суммы по модулю в квадрат вряд ли избавит от когнитивного диссонанса неискушенного экспериментатора. Однако квантовая механика, оставляя свободу в интерпретации, предписывает оперировать именно в терминах амплитуд вероятностей ψ , как бы нам это ни нравилось, — результаты эксперимента полностью описываются таким подходом!

Мне представляется, что в этой книге вдумчивый читатель найдет для себя много полезного и даже нового. Лично я с большим интересом прочитал

¹⁾ Агрессивная и навязчивая реклама, целью которой является формирование предпочтений потребителя. Название ее происходит от слова, означающего надувательство, обман или трюк для привлечения внимания.

²⁾ Shutupandcalculate — заткнись и считай (нем.).

разделы про эффект Ааронова–Бома, обширное описание квантовых симуляторов и о проблемах квантовой биологии.

Обращаю внимание, что степень детализации изложения материала книги отличается от главы к главе. Например, разделы, посвященные квантовым вычислительным алгоритмам, написаны очень подробно — на уровне специального обзора по современному состоянию исследований в этой области. Так, затрагивается проблема «улучшенного гаджета Оливера–Терлаха для аппроксимации трехчастичного гамильтониана двухчастичным». Она даже вынесена в отдельный раздел, хотя редко рассматривается в приложениях квантовых алгоритмов. Подробно рассмотрены принципы действия оптических квантовых компьютеров, хотя на сегодняшний день к лидирующим также принято относить платформы на основе сверхпроводящих кубитов, ионов в линейных ловушках Пауля и нейтральных атомов в микродипольных ловушках. В то же время материал по квантовой метрологии представлен достаточно фрагментарно, здесь затронуты лишь частные вопросы этой обширной ветви квантовых технологий, в основном по интерферометрии биомолекул. Это же относится к описанию волновых пакетов и проблем квантовой биологии (гл. 9 и 24). Некоторые разделы книги изобилуют формулами (например, главы, посвященные квантовым алгоритмам), в то время как значительная часть других разделов (например, гл. 25) изложена в эпистолярном жанре.

На мой взгляд, в книге несколько оттенены экспериментальные результаты. Роль таких материалов трудно переоценить. Они, безусловно, имеются в книге и занимают достойное место практически в каждой из восьми ее частей, ярко иллюстрируя рассматриваемые эффекты. Имеется даже целый разд. 27.1 (Экспериментальные исследования), к сожалению, весьма короткий. Но я, как экспериментатор, ожидал бы видеть такого рода иллюстрации в каждой главе. Ведь именно колоссальный рост технологических ресурсов, инструментария и возможностей эксперимента во многом обусловил бурный расцвет и науки о квантовой обработке информации, и параллельно развивающихся квантовых технологий. В этой связи отмечу разд. 27.3 (Практическое использование парадоксальных идей) и п. 28.1.1 (Свидетельствуют эксперименты), которые отчасти снимают мою критику в концептуальном плане.

Должен отметить, что я не разделяю позиции авторов к подходу о коллапсе (редукции) волновой функции, изложенному в гл. 25, и придерживаюсь мнения, высказанного Д.Н. Клышко в работе «Основные понятия квантовой физики с операциональной точки зрения» // УФН. 1998. Т. 168, № 9. С. 975–1015. Однако этот факт, разумеется, не умаляет права авторов на изложение своей точки зрения, в частности в контексте рассмотрения с позиций биологической науки. Этим я лишь подчеркиваю свою точку зрения, высказанную выше — изложенный в книге материал стимулирует дискуссии и, возможно, более глубокое осмысление концепций и моделей квантовой механики. Здесь также уместно привести пример, относящийся к дискуссионным: изложенные в п. 25.4.1 четыре тезиса, принимаемые авторами при описании окружающего мира (мир — классический; макроскопический объект состоит только из квантовых частиц и полей; уравнение Шрёдингера полностью описывает эволюцию квантового объекта; принцип редукции).

Мне очень приятно, что довольно большое место в книге занимают описание и обсуждение приложений эффекта спонтанного параметрического рассеяния света (СПР). Этот эффект был открыт в 1966 г. профессором физического факультета МГУ Давидом Николаевичем Клышко¹⁾, с которым мне посчастливилось работать. Почти сразу после открытия стало ясно, что уникальные статистические свойства пар фотонов²⁾ можно использовать в новом направлении, которое активно зарождалось в то время — в квантовой оптике. И действительно, практически сразу появилось несколько идей, которые очень быстро были реализованы в экспериментах, о том, как использовать бифотоны в метрологии — при разработке принципиально новых фотометрических эталонов спектральной яркости излучения, для абсолютной безэталонной калибровке фотодетекторов, а также в качестве генераторов одиночных фотонов [1].

Чуть позже — в конце 80-х гг. XX в. — начался поток статей (теоретических и экспериментальных), в которых пары коррелированных фотонов использовались для проверки неравенств Белла и демонстрации парадокса Эйнштейна–Подольского–Розена [2]. Фактически с этого момента пары перепутанных фотонов стали «рабочей лошадкой» не только квантовой оптики, но и зарождающейся области — квантовой обработки информации [3]. Сейчас трудно представить себе раздела квантовых технологий, в котором бы не использовались пары перепутанных фотонов: квантовые коммуникации, квантовые вычисления и квантовая сенсорика — все эти субтехнологии квантовых технологий во многом базируются на статистических свойствах бифотонов. И по сей день процесс СПР является одним из наиболее эффективных источников таких состояний света. С момента открытия СПР появились новые нелинейные материалы, существенно изменилась аппаратная база оптических экспериментов. Это дало возможность поднять эффективность генерации бифотонов в тысячи раз, создать компактные источники и приемники таких состояний и работать с ними не как с объектом изучения, а как с надежным инструментом в проведении фундаментальных и прикладных работ в области квантовой обработки информации и спектроскопии [4].

И наконец, мне особенно импонирует в этой книге личностная оценка авторов рассматриваемых явлений и эффектов и их незримое присутствие то в качестве защитника, то в качестве оппонента выдвигаемым ими же тезисам. Во многом это связано с огромным опытом проведения научных исследований, а также с ведением преподавательской деятельности, которая, безусловно, «строит мозги». Книга такого объема и, главное, насыщенного содержания, вряд ли была бы написана без этих двух навыков (не хочется употреблять навязанный термин «компетенций»). Ну и, конечно, очень уместными, на мой взгляд, представляются вставки о личных встречах авторов с выдающимися учеными и с ненавязчивой субъективной оценкой тех или иных обсуждаемых положений книги.

¹⁾ Государственная премия СССР 1983 г. в составе авторского коллектива за цикл работ «Открытие и исследование явления параметрического рассеяния света и его применение в спектроскопии и метеорологии».

²⁾ В книге такая пара коррелированных фотонов называется «бифотоном Клышко».

Список литературы

1. *Клышко Д.Н., Пенин А.Н.* Перспективы квантовой фотометрии // УФН. 1987. Т. 152. С. 653–665.
2. *Shih Y.H., Alley C.O.* New Type of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm Experiment Using Pairs of Light Quanta Produced by Optical Parametric Down Conversion // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 61. P. 2921–2924.
3. *Yanhua Shih.* An Introduction to Quantum Optics: Photon and Biphoton Physics. ISBN 9781138601253. Published December 14, 2020 by CRC Press. 448. Pages 140.
4. *Kalashnikov D. A., Paterova A. V., Kulik S. P., Krivitsky L.* Infrared Spectroscopy with Visible Light // Nature Photonics. 2016. V. 10. P. 98–101.

Н.М. Щелкачёв ¹⁾. Взгляд теоретика

Странички из дневника. Студенты старших курсов и аспиранты МФТИ нередко задают вопрос, какое направление науки сегодня и, главное, завтра наиболее перспективное, занимаясь чем можно лучше всего реализовать свои таланты после защиты диплома или диссертации. Обычно я пересказываю студентам слова Леггетта (приведены в эпиграфе монографии), что квантовая механика — это мировоззрение, она находится в центре нашего современного понимания законов природы.

Наболевшие вопросы. Есть еще один аспект: в XX в. достигли пика своего развития аналитические методы и подходы к физическим задачам, основанные на применении аппарата интегрально-дифференциального исчисления, линейной алгебры, теории групп и т. д. XXI в. другой — это эпоха цифровых технологий. Так как компьютер может быть еще и квантовым, к вышесказанному надо добавить фразу про квантовые цифровые методы и подходы. Не важно, сможет ли прототип квантового компьютера стать в ближайшее время чем-то действительно, а не очень желательно превосходящим возможности классических суперкомпьютеров или мы получим «долгострой» типа «термояда».

Особое место занимает наука о материалах. Если в XX в. эта наука считалась «второсортной» на фоне так называемой теоретической физики с аналитическим вычислением диаграмм и функциональных интегралов, то в XXI в. все поменялось. Теоретическая физика конденсированного состояния стремительно превращается в музейную науку, а квантовая химия, молекулярное моделирование выходят в лидирующие позиции в мировой науке ввиду развития цифровых технологий и возможности эффективно моделировать новые материалы. В основу современного материаловедения положены самые продвинутые диаграммные методы, а численное вычисление сложных функциональных интегралов сейчас рутинный метод, например, при моделировании электронной структуры в рамках теории динамического среднего поля.

¹⁾ Николай Михайлович Щелкачёв — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник теоретического отдела Института физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН, доцент кафедры теоретической физики Московского физико-технического института (национальный исследовательский университет).

Вывод один — ученому XXI в. необходимо в совершенстве овладеть «квантовым цифровым мировоззрением». Именно эта правильная концепция положена в основу монографии. Теперь я буду предлагать прочесть эту книгу студентам МФТИ, задающим вопрос, «что делать».

Великий почин. Значительная часть монографии посвящена квантовым вычислениям, квантовой передаче, обработке и хранению информации. Существует множество учебников и обзоров, посвященных этим вопросам. В чем же уникальность книги?

Проблема в том, что большинство учебников либо узко специализированы, либо пересыщены специальной терминологией и формализмом, за красивой формой которого обычно шифруется простая квантовая механика. Данная книга написана иначе, в этом ее уникальность, и поэтому она идеально подходит как введение и путеводитель по квантовому миру вчера, сегодня и, главное, тому, который будет завтра. Таким образом, название книги, «Новости, основания и проблемы квантовой механики», хорошо отражает ее содержание.

Книга столь удачна по нескольким причинам. Во-первых, в основу книги положены воззрения крупных ученых — Гинзбурга, Леггетта, Фейнмана и др. — о путях развития современной фундаментальной науки. Во-вторых, монография написана свободным языком, вне узких рамок определенной «школы», жестко регламентирующей взгляд на законы природы. В-третьих, книга нацелена на понимание квантовой механики, а не на объяснение тонких деталей ее математического аппарата (как часто бывает в традиционных учебниках), в этом неоспоримое преимущество данной книги.

Критические заметки. Если говорить о других сторонах монографии, то стоит отметить, что ряд моментов объяснен может быть излишне схематично. Я читаю студентам МФТИ курс физической кинетики и, может быть, добавил бы в раздел про уравнение Линдблада чуть больше подробностей про марковское приближение, про то, что уравнения Линдблада в классическом пределе переходят в стандартное уравнение типа Больцмана, если матрицу плотности перевести в представление Вигнера... Но это, скорее, придирки теоретика. Всего все равно рассказать нельзя. Я прекрасно понимаю, что, распространив такие «предложения» на всю книгу, на выходе мы получим обычный учебник с формулами — а это не то, что надо, не то, что было задумано.

Мне понравилось, что в книге поднят вопрос о стреле времени и необратимости. При численном моделировании статистической системы с большим числом степеней свободы развивается ляпуновская неустойчивость, что делает моделирование необратимым из-за нарастания ошибок численного интегрирования уравнений движения. Характерное время развития этого эффекта в жидкости можно связать с термодинамическими флуктуациями. Термодинамическая флуктуация — неконтролируемое явление (маркер необратимости), генерируемое хаосом. Для жидкости в нормальных условиях 10 пикосекунд — характерное время релаксации локальной структуры и время жизни термодинамической флуктуации плотности. Поэтому получается, что за 10 пикосекунд система становится необратимой вследствие численных

ошибок округления. В квантовой динамической системе, очевидно, тоже может развиваться аналогичный эффект. Это, вероятно, надо учитывать при квантовых вычислениях.

Три источника и три составные части. Виталий Лазаревич Гинзбург, формулируя три «великие» проблемы в преподавании физики (именно ими вдохновлена книга), отметил важный вопрос о связи физики с биологией. Для меня наиболее интересным был именно этот раздел, посвященный применению квантовой механики в такой далекой от теоретической физики области, как биология. Очень необычно, что бактерии могут участвовать в запутанных квантовых состояниях, а нервные импульсы имеют отношение к волновой функции. Еще раз убедился, что наука едина. Квантовое мировоззрение проникает в самые далекие, на первый взгляд, области знания, и деление науки на узкие направления достаточно условно.

Уверен, что в ближайшие годы и в обозримом будущем существенно возрастет роль квантовой механики практически во всех фундаментальных и прикладных науках. В СССР квантовая механика интенсивно развивалась и во многих аспектах опережала мировой уровень. В связи с этим уместно вспомнить Боголюбова, Ландау. Третий том курса теоретической физики Ландау, посвященный квантовой механике, стал бестселлером. Он переведен на множество языков мира и стал настольной книгой студентов и ученых по всему миру.

Но наука не музей, она не стоит на месте. Самые хорошие книги со временем устаревают. Нужно двигаться вперед. Ввиду жесткой мировой конкуренции необходимо ускоренное развитие квантовой науки в России.

Что делать? Что делать — «вечный» вопрос? Дело уже даже не в деньгах. Сейчас ученые в России не бедствуют, как раньше. Важно, что в США, Китае, Евросоюзе ученые защищены уникальным постоянным контрактом «до пенсии». У нас в лучшем случае срочный контракт на 5 лет, а в вузах — много меньше, и вопрос о продлении контракта — фактически лотерея. Наука не может успешно развиваться при текучке кадров и неуверенности ученого в завтрашнем дне! Про наукометрию я не пишу, это что-то за гранью разумного. Можно ли измерить эффективность работы Ломоносова, Менделеева? Эффективность художников не определяют весом и общей площадью их полотен. А если ученый придумал «огонь», это обычно бывает раз в жизни, получается, что потом его надо увольнять, так как он каждый год «огонь» не придумывает. То, от чего в цивилизованном мире отказываются, у нас берут за основу оценки науки.

Нашей науке надо возвращаться на советские стандарты ее организации. Очевидно, что в нашей стране есть научный задел и ученые, которые в эксперименте, теории и практических применениях могут достойно работать, не хуже, а где-то и лучше конкурентов за границей. Одно из доказательств этому — данная монография. Когда она будет издана, я поставлю эту книгу рядом с 10-томным курсом теоретической физики и «Введением в физику квантованных полей» — это самое лучшее место, всегда рядом, всегда на виду.

Г.Г. Амосов ¹⁾. Взгляд матфизика

Книга с высоты полета птицы. Сейчас, когда на наших глазах происходят удивительные технологические прорывы в области квантовой криптографии (создание приборов, передающих зашифрованные сообщения на расстояния порядка ста километров) и квантовых вычислений (квантовый компьютер с памятью 100 кубитов), самое время оглянуться назад и четко проследить историю развития квантовой механики, с тем чтобы предсказать ее будущее.

Авторы монографии, которую можно назвать как учебником по квантовой теории, так и эссе, посвященному ее развитию и увлекательным рассказам об ученых, ее создавших, именно такую задачу и ставят. В качестве «завязки сюжета» авторы цитируют книгу В.Л. Гинзбурга «О физике и астрофизике», где предложены три великие проблемы квантовой механики. Собственно, раскрытию предстоящего решения этих проблем и посвящена книга, в которой умелым образом сочетается описание большого количества экспериментальных данных с обсуждением их идейного содержания.

Я не знаю аналогов такой монографии в мировой литературе. Название книги заслуживает отдельного комментария. Это не лекции, и не учебник, и не описание достижений в узкоспециальной области. Авторы замахнулись на всесторонний взгляд на квантовую механику в целом, который охватывал бы основания теории в свете новых экспериментальных и теоретических достижений, а также определил основные проблемы, решением которых будут посвящены ближайшие годы. Можно сказать, что монография суммирует достижения последних лет (ссылки доведены до 2022 г.) и, оставаясь в традиции копенгагенской интерпретации, открывает новую страницу в понимании квантовой механики.

Недаром эпиграфом к книге служат слова Леггетта, из которых следует, что квантовая механика представляет из себя не только теорию, но и мировоззрение. Не стоит забывать, что такие ключевые понятия, как «наблюдаемая» и «состояние», родились в том числе из глубокого анализа философии Канта, а иногда и жарких дискуссий с философами-кантианцами [1, 2], так что квантовую механику, действительно, можно назвать не только наукой, но определенной философией.

Основным принципом авторов является то, что все теоретические положения, представляемые в книге, ни в коем случае не просто выставляются на веру (будь они даже очень математически красивы). В книге постепенно приводятся все новые и новые экспериментальные данные, подтверждающие теоретические постулаты. Отдельной темой монографии является утилитарное использование методов квантовой механики в таких областях, как квантовая криптография и квантовые вычисления.

¹⁾ Григорий Геннадьевич Амосов — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Математического института им. В.А. Стеклова РАН, профессор кафедры «Фундаментальные проблемы физики квантовых технологий» Московского физико-технического института (национальный исследовательский университет).

Книга для меня. Не буду перечислять шесть основных направлений квантовой механики, сформулированных авторами в предисловии. Скажу только, что для меня наиболее близкими являются второе (развитие основных направлений квантовой механики, позволяющих предсказывать новые явления) и пятое (возникновение новых математических методов, основанных на квантово-механическом подходе). Важно отметить возможность практического применения методов, возникших в рамках пятого направления. Это касается анализа больших объемов экспериментальных данных и построения новых схем кодирования информации.

Я работаю в области квантовой теории вероятностей и квантовой информации, которая как раз является новой математической дисциплиной, пронизанной духом и идеями квантовой механики. По этой причине книга удивительно близка мне. Для меня не требуются новые доказательства справедливости квантовой механики, в которую я когда-то вполне поверил, еще будучи студентом третьего курса МФТИ. Тем не менее очень приятно, что авторы постепенно и скрупулезно излагают экспериментальные данные от Штерна и Герлаха до Антона Цайлингера, подтверждающие все основные постулаты теории. Важно упоминание незаслуженно забытого пионерского опыта 1949 г. В.А. Фабриканта о том, что волновые свойства присущи не только потоку электронов, но и каждому электрону в отдельности. Следует отметить, что именно к научной школе В.А. Фабриканта принадлежит Г.Э. Норман.

Уже в самом начале книги указывается, что переплетенные (сцепленные, как говорят у нас в МИАНе) состояния долго оставались на задворках физики и понимание, что их следует отнести к базовым понятиям, появилось только сейчас. Действительно, переплетенные состояния составляют самую сердцевину квантовой теории вероятностей, поскольку приводят к появлению специфических квантовых корреляций, принципиально отличающихся от классических. Именно наличие неравенства Белла и границы Цирельсона позволяет говорить о новой дисциплине — квантовой или некоммутативной теории вероятностей, которая ни в коем случае не сводится к классической теории вероятностей.

Что касается трех великих проблем, сформулированных В.Л. Гинзбургом (об этом я узнал из книги), третья — связь квантовой физики с биологией. Мне было очень интересно узнать подробнее об этой ветви развития. Само основание данного подхода на фундаментальном принципе квантовой механики — наличии наблюдателя (человека) и процедуры измерения — производит впечатление. Седьмая часть монографии «От физики к биологии» как раз посвящена подробному изложению таких идей. Как и везде, в книге авторы не хотят оставаться на уровне простого учебника, претендуя на уровень целостного мировоззрения. Ими выдвинут постулат, утверждающий, что коллапс волновой функции есть качество, присущее живой материи.

Первые две великие проблемы — необратимость динамики и создание интерпретации квантовой механики — являются предметом моих постоянных размышлений, ибо я отношу себя к научной школе выдающегося российского математика, академика РАН А.С. Холево. Обе проблемы относятся к работам А.С. Холево по созданию квантовой теории статистических решений.

Достаточно отметить несколько вех: точное математическое определение квантового канала связи [3], доказательство того, что величина, называемая сейчас «верхняя граница Холево» превосходит информацию Шеннона [4] в некоммутативном случае, доказательство квантовой теоремы кодирования в 1996 г. [5], независимо от работы Шумахера и Уэстморленда того же года [6], разрешение гипотезы о гауссовских оптимайзерах [7]. Работы А.С. Холево по достоинству оценены международным научным сообществом. Достаточно отметить наиболее престижную в области теории информации премию Клода Шеннона, которой А.С. Холево был удостоен в 2016 г. До этого времени эта премия только один раз присуждалась советскому математику М.С. Пинскеру в 1978 г.

Первая часть книги посвящена базовым представлениям квантовой механики. Очень важно, что отмечена основополагающая роль переплетенных состояний. На мой взгляд, копенгагенская интерпретация квантовой механики, казавшаяся неочевидной до последнего десятилетия XX века, теперь, наконец-то, должна быть безоговорочно принята научным сообществом именно благодаря появлению многочисленных экспериментальных данных, связанным с использованием переплетенных состояний. Этой идеей пронизана не только первая часть, но и вся книга в целом.

Во второй части книги речь идет о декогеренции и проблеме измерения. Квантовые каналы связи, исследованиями которых занимается наша группа в МИАН, как раз являются точным математическим выражением декогеренции — взаимодействия микроскопической системы с макроскопическим резервуаром. Помимо приведенных выше результатов А.С. Холево, тут я бы хотел отметить пионерские работы М.Е. Широкова [8] по введению норм с энергетическими ограничениями для бесконечномерных (бозонных) квантовых каналов. Интересно, что тут ему всего на малое количество времени удалось опередить А. Винтера из Университета Барселоны, о чем сам Винтер открыто сообщил Широкову по электронной почте, после появления его работы в arxiv.org. Мои скромные достижения касаются доказательства свойства супераддитивности выходной энтропии для квантового деполяризующего канала [9] и вычисления классической пропускной способности квантовых каналов, порожденных проективными унитарными представлениями конечных групп, включая каналы Вейля [10].

Наконец, третья часть книги посвящена квантовым корреляциям. Это, вероятно, важнейшая для понимания и признания квантовой механики часть. Если мы рассматриваем одну систему, можно думать о возникающих вероятностях вполне в классическом колмогоровском духе. Тут все споры будут носить более-менее философский характер. Но если квантовая система имеет составной характер, можно говорить о корреляциях квантовых наблюдаемых из разных систем, являющихся «квантовыми случайными величинами». Нужно отметить, что речь не идет о квантовых наблюдаемых, принципиально неизмеримых одновременно (с коммутатором, неравным нулю). В классической трактовке, восходящей к Беллу, измеряются пары из набора четырех наблюдаемых, принадлежавших двум системам, таким образом, что каждая пара принципиально измерима одновременно. Оказывается, что возникающие квантовые корреляции не могут соответствовать какому-то единому

вероятностному пространству Колмогорова для составной системы. Причина опять состоит в наличии переплетенных состояний. С другой стороны, квантово-механический подход накладывает на корреляции специфическое неравенство, обнаруженное представителем ленинградской математической школы Б.С. Цирельсоном в 1980 г. [11]. Нарушение неравенства Цирельсона означало бы, что квантовая механика неверна. Тем не менее на настоящий момент времени никаких расхождений с теоретическим предсказанием Цирельсона не обнаружено.

Отдельной темой в теории квантовых корреляций является параллельная передача информации по нескольким каналам связи. Такой подход совершенно естественен и в классической теории информации. В этом случае, в силу теоремы Котельникова–Шеннона, параллельная передача информации позволяет декодировать искаженную, в силу наличия помех, информацию в ущерб скорости передачи. В квантовом случае наличие переплетенных состояний приводит к дополнительному выигрышу при передаче информации. В частности, возникает теория квантовых кодов, исправляющих ошибки [12, 13]. Удивительно, что в квантовом случае, при фиксации множества допустимых ошибок, может происходить передача информации с нулевой ошибкой. Один из впечатляющих результатов в этой области называется квантовой суперактивацией. Заключается он в том, что передача информации с нулевой ошибкой, невозможная по одному каналу, становится возможной при использовании n копий исходного канала. М.Е. Широкову принадлежит серия работ, в которых построены примеры суперактивации квантовой пропускной способности [14]. Я также продолжаю исследования М.Е. Широкова по суперактивации [15]. Отдельный интерес представляет поиск кодов, состоящих из переплетенных состояний, устойчивых относительно ошибок заданного класса. В последние годы мы с коллегами достигли определенных достижений в этой области [16, 17].

В заключительной части монографии авторы еще раз последовательно отстаивают свою точку зрения на развитие квантовой механики и на те задачи, которые ставит перед нами будущее. С точки зрения авторов (равно как и с моей точки зрения), ключевым моментом истории является введение переплетения когерентных состояний Бомом в 1951 г. В тот момент факт этот не был оценен. Вторым краеугольным камнем является неотъемлемость наблюдателя при описании результатов измерений. Именно отсюда проистекает теория динамики открытых квантовых систем, столь бурно развивающаяся в последние годы. Обсуждая явления биологии, авторы анонсируют появление таких удивительных новых дисциплин, как квантовая физиология, и предполагают использование методов данной дисциплины в медицине.

Окно в будущее. В главе «Взгляд в будущее научно-технического прогресса» авторы воспроизводят график из статьи американского физика Дж. Хьюбнера, анализирующего частоту инноваций между 1455 г. и 2005 г. С его точки зрения, после пика конца XIX – начала XX века все инновации неуклонно идут вниз и плавно устремляются к нулю. Такую интерпретацию не назовешь иначе, как близорукой. Мне эта позиция напоминает наше отечественное музыковедение, конечно, открывающее композиторов,

но с запозданием в 100 лет. На мой взгляд, полностью совпадающий со взглядом авторов книги, инновации в физике и математике конца XX – начала XXI века совершенно повторяют события конца XIX – начала XX века. Осознание роли сцепленных–запутанных–переплетенных состояний привело в 1990-е годы к целой серии пионерских работ, благодаря которым возникла квантовая теория информации и теория квантовых вычислений, которые в начале текущего XXI века начинают реализовываться «в железе». Теоретические разработки в этой области также переживают ренессанс. Здесь и вычисление пропускных способностей квантовых каналов (А.С. Холево, В. Джованетти, А. Мари, Г.Г. Амосов и др.), а также всплеск блестящих работ по теории сложности. Привлечение в классическую теорию сложности возможности квантовых вычислений дало новые неожиданные результаты по совпадению некоторых классов сложности, основанные на теории игр с использованием квантовых стратегий. Это, в свою очередь, позволило разобраться с классическими гипотезами о квантовых корреляциях. Так, в 2019 г. группой авторов была опровергнута знаменитая гипотеза Б.С. Цирельсона о совпадении классов коммутирующих и пространственных квантовых корреляциях [18]. Этот результат позволил опровергнуть старую гипотезу А. Конна о строении факторов типа II, сформулированную еще в далеком 1976 г. [19] и казавшуюся таким сложнейшим чисто математическим трюком, не имеющим отношения к физике.

Как и авторы книги, я уверен, что мы живем в новую эпоху великих открытий. Это обстоятельство требует и особого отношения к образованию. Бюрократизация системы высшего образования, которую нам сейчас навязывают, связана, вероятно, с предположением, что в науке нужны только «специалисты», «инженеры», предназначенные для обслуживания уже существующих схем. Действительно, ведь все уже создано и нужно только чтобы человек умел нажимать на нужные кнопки и тянуть за необходимые рычаги. Во что у нас хотят превратить аспирантуру? Совсем не в лабораторию научных инноваций, а в очередную ступень образования. В результате наши аспиранты вместо того, чтобы заниматься научной работой и посещать научные семинары, где делают доклады как выдающиеся ученые, так и они сами, и которые являются кузницей обмена мнениями и новейшими достижениями, вынуждены посещать море общеобразовательных дисциплин, которые отнимают у них время и силы. Одним из симптомов эпохи великих открытий является появление большого количества талантливых молодых людей. Я могу судить по Московскому физико-техническому институту, в котором работаю больше 25 лет. Таких удивительных студентов, как сейчас, еще не было. У некоторых из них научные работы (в том числе и без соавторов) появляются еще в бакалавриате и магистратуре. Я сейчас говорю о работах теоретических. Фактически уровень нынешних магистерских диссертаций часто достигает кандидатских.

Чего нет в книге. Немножко можно посетовать, что в книге совсем не отражено одно из интересных направлений в развитии аппарата квантовой механики. В терминологии книги эта ветвь должна быть отнесена к пятому направлению. Поскольку результатом проведения любого эксперимента

являются некоторые распределения вероятностей или, в другом варианте, средние значения, дисперсии и моменты высших порядков, нельзя ли строить квантовую механику как классическую статистическую механику? То есть приписать состояниям квантовой системы и наблюдаемым некоторые функции (их символы) на подходящем измеримом пространстве и вычислять средние значения наблюдаемых в фиксированном состоянии как интегралы от произведения символа наблюдаемой на символ состояния. Началом такого подхода следует считать определение функции Вигнера (1932), аппарат развития которой был завершен Мойалом в 1949 г. Тут же следует указать функцию Хусими–Кано (1940) и функцию Глаубера–Сударшана (1963). Все эти функции имеют свойства, не полностью соответствующие классическому описанию. Например, функции Вигнера и Глаубера–Сударшана, отвечающие квантовому состоянию, не являются, вообще говоря, положительно определенными. Тем не менее эти функции отлично зарекомендовали себя в качестве аппарата для расчетов в квантовой оптике. Вспоминается рассказ члена-корреспондента РАН В.П. Силина, который я как-то раз слышал во время посещения ФИАНа. Когда Л.Д. Ландау рассказали о квазираспределении Глаубера–Сударшана, он тут же спросил, почему говорят «квази», а не просто «распределение». Ему объяснили, что это связано с тем, что функция не является, вообще говоря, положительной. Тогда Л.Д. стал, по обыкновению, сильно ругаться и кричать, что тогда это бред и не нужно ему об этом больше говорить. Тут В.П. улыбнулся и сказал: «Л.Д. еще не знал, что Д.И. Блохинцев придумал удобное для расчетов квазираспределение, принимающее комплексные значения». В середине 1990-х годов группа российских и зарубежных физиков (Дж. Д’Ариано, В.И. Манько, О.В. Манько, С. Манчини, П. Томбези и др. [20, 21]) ввели еще ряд функций, названных квантовыми томограммами, которые представляют собой наборы классических распределений вероятностей и позволяют адекватно описывать состояние квантовой системы, не прибегая к матрице плотности. Наблюдаемым в такой картине отвечают обобщенные функции на пространстве основных функций — квантовых томограмм [22]. К достоинствам данного подхода следует отнести то, что квантовые томограммы можно экспериментально измерить. Автор текста непосредственно видел прибор для гомодинного детектирования (результатом измерения у него будет симплектическая квантовая томограмма), установленный в Российском квантовом центре.

Развитие квантовой механики привело к новой бурно развивающейся теории — квантовой теории информации, привлекающей внимание специалистов во всем мире. Всего за 20 лет опубликованы сотни работ и целый ряд монографий, в которых подробно отражено как состояние исследований по квантовой теории информации, так и основные тренды развития [23–28].

Неокопенгагенская парадигма. Авторы предлагают ввести неокопенгагенскую парадигму. Я согласен с тем, что сейчас, когда мы переживаем пик сбывшихся надежд и окружены новыми достижениями квантовой теории, возникающими в самых неожиданных областях, смешно говорить о копенгагенской интерпретации просто как об одной из возможных. С другой стороны, теория еще очень далека от завершения. Сейчас не найдется

такого Филиппа Жолли, отговаривавшего студента Макса Планка от занятия физикой — завершённой наукой. Это высказывание Жолли теперь предстает в новом свете. Занятия квантовой механикой, действительно, значительно превосходят по области проникновения теоретическую и экспериментальную физику, охватив чистую математику, информатику и биологию. Возможно, вскоре эта парадигма охватит новые области. Во всяком случае, для меня очевидно проникновение в область музыкальной науки. Я сознательно не говорю музыковедение, поскольку предполагаю также развитие композиторской техники [29].

К книге приложено обширное эссе, посвященное Карлу Попперу. Как известно, проблему демаркации между научным и ненаучным знанием Поппер свел к принципу фальсификации, т. е. хотя бы мысленной возможности эксперимента, опровергающего данную теорию. Авторы книги привлекают идеи Поппера для обоснования введения неокопенгагенской парадигмы как противостоящей принципиально не проверяемым теориям. Следует отметить, что не только Карл Поппер постулировал имманентное существование вероятности в природе. Принципиально необратимый характер эволюции, на мой взгляд, может быть также выведен из глубинных основ теории информации, восходящей к идеям Шеннона [30]. Проблемы кодирования и измерения, появившиеся в классическом случае, послужили основой для квантовой информатики [26].

В последние годы стало совершенно ясно, что квантовая механика перестала быть лишь узкоспециальной дисциплиной для высоколобых теоретиков, посвящающих свою жизнь познанию основ мироздания. Новые технологические прорывы показали, что самые глубокие методы квантовой теории востребованы на практике: от использования квантовых вычислений для практических задач до проблем передачи информации как в аспекте увеличения объема и быстродействия, так и в аспекте надежности и секретности передачи. Дальнейшее развитие открывает востребованность квантовой механики в таких неожиданных областях, как биология и даже медицина. Понимание этих обстоятельств неизбежно приводит к пониманию колоссальной международной конкуренции, которая далее будет только возрастать.

Заключительный аккорд. В мире существует множество конкурирующих между собой научных центров, охватывающих разные аспекты квантовой информации. В области исследования характеристик квантовых каналов это группы А. Winter в Автономном университете Барселоны (Испания), V. Giovannetti в Высшей нормальной школе в Пизе (Италия), N. Datta в Кембриджском университете (Великобритания). В области немарковской квантовой динамики — группы D. Chruscinski в Университете Николая Коперника в Торуня (Польша), Н.-Р. Breuer в Университете Фрайбурга (Германия). В области динамики переплетенных состояний в открытых квантовых системах — группы L. Davidovich в Федеральном университете Рио-де-Жанейро (Бразилия), O. Gühne в Университете Зигена (Германия). В области корреляционных неравенств, условий нелокальности: группы M. Junge (США), M. Wolf (ФРГ), S. Pazaluelos (Испания), T. Vidick (США).

Приятно отметить, что в России также есть сильные научные коллективы, готовые ответить на вызовы международного научного сообщества, которые стоят на самых передовых позициях в области квантовой теории. Это группы Г.Э. Нормана и Г.Б. Лесовика в Московском физико-техническом институте, А.С. Холево в Математическом институте им. В.А. Стеклова РАН, А.К. Фёдорова в Российском квантовом центре, С.П. Кулика в МГУ и некоторые другие.

Список литературы

1. Вейль Г. Математическое мышление. М.: Наука, 1989.
2. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое. М.: Наука, 1989.
3. Холево А. С. К математической теории квантовых каналов связи // Пробл. передачи информ. 1972. Т. 8, вып. 1. С. 62–71.
4. Холево А. С. Некоторые оценки для количества информации, передаваемого квантовым каналом связи // Пробл. передачи информ. 1973. Т. 9, вып. 3. С. 3–11.
5. Holevo A. S. The capacity of the quantum channel with general signal states // IEEE Trans. Inform. Theory. 1998. V. 44, № 1. P. 269–273.
6. Schumacher B., Westmoreland M. D. Sending classical information via noisy quantum channels // Phys. Rev. A. 1997. V. 56. P. 131.
7. Giovannetti V., Holevo A. S., Garcia-Patron R. A solution of the Gaussian optimizer conjecture. Newton Institute preprint NI13068-MQI, 2013.
8. Широков М. Е. О норме полной ограниченности с энергетическим ограничением и ее использовании в квантовой теории информации // Пробл. передачи информ. 2018. Т. 54, вып. 1. С. 24–38.
9. Amosov G. G. Strong superadditivity conjecture holds for the quantum depolarizing channel in any dimension // Phys. Rev. A. 2007. V. 75, № 6. P. 060304(R).
10. Amosov G. G. On capacity of quantum channels generated by irreducible projective unitary representations of finite groups // Quantum Inf. Process. 2022. V. 21, № 81. 15 p.
11. Cirel'son B. S. Quantum generalizations of Bell's inequality // Lett. Math. Phys. 1980. V. 4, № 2. P. 93–100.
12. Shor P. Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory // Phys. Rev. A. 1995. V. 52. P. R2493(R).
13. Knill E., Laflamme R. Theory of quantum error-correcting codes // Phys. Rev. A. 1997. V. 55. P. 900–911.
14. Shirokov M. E. On channels with positive quantum zero-error capacity having vanishing n -shot capacity // Quantum Inf. Process. 2015. V. 14, № 8. P. 3057–3074.
15. Amosov G. G., Zhdanovskiy I. Yu. On the noncommutative deformation of the operator graph corresponding to the Klein group // J. Math. Sci. (N. Y.). 2016. V. 215, № 6. P. 659–676.
16. Amosov G. G., Mokeev A. S. On non-commutative operator graphs generated by covariant resolutions of identity // Quantum Inf. Process. 2018. V. 17. P. 325. 11 p.

17. *Amosov G. G., Mokeev A. S., Pechen A. N.* Non-commutative graphs and quantum error correction for a two-mode quantum oscillator // *Quantum Inf. Process.* 2020. V. 19, № 3. P. 95. 12 p.
18. *Zhenfeng Ji, Natarajan A., Vidick T., Wright J., Yuen H.* // *MIP*=RE*, arXiv: 2001.04383
19. *Connes A.* Classification of injective factors cases III_1 , III_∞ , III_λ , $\lambda = 1$ // *Ann. Mathem.* 1976. P. 73–115.
20. *D'Ariano G. M., Mancini S., Man'ko V. I., Tombesi P.* Reconstructing the density operator by using generalized field quadratures // *Quant. Semiclass. Opt.* 1996. V. 8. P. 1017.
21. *Манько В.И., Манько О.В.* Томография спиновых состояний // *ЖЭТФ.* 1997. Т. 112, вып. 3. С. 796–804.
22. *Амосов Г.Г., Коренной Я.А., Манько В.И.* О вычислении средних значений квантовых наблюдаемых в представлении оптической томографии // *ТМФ.* 2012. Т. 171, вып. 3. С. 475–482.
23. *Nielsen M., Chuang I.* Quantum computation and quantum information. Cambridge University Press, 2000.
24. *Hayashi M.* Quantum information: an introduction. Springer, 2006.
25. *Petz D.* Quantum information theory and quantum statistics. Springer, 2008.
26. *Holevo A. S.* Quantum system, channels, information. De Gruyter, 2013.
27. *Wilde M.* Quantum Information Theory. Cambridge University Press, 2013.
28. *Watrous J.* The Theory of Quantum Information. Institute for Quantum Computing, 2017.
29. *Amosov G., Komissarenko A.* The history of European music as a passage from classical physics to quantum mechanics // 9th Intern. Conf. on Music Perception and Cognition, Bologna, 2006. <https://www.academia.edu/23854845>
30. *Shannon C.E.* A mathematical theory of communication // *Bell. System. Tech. J.* 1948. V. 27. P. 379–423, 623–656.

А.О. Чугунов ¹⁾. Взгляд биофизика

Должно быть, мое предисловие выбьется из ряда сильнее других, потому что я, хотя и «физик», но все-таки «био-», и в научной жизни занимаюсь вовсе не квантовой механикой, а моделированием биологических молекул, таких как белки, нуклеиновые кислоты, биомембраны. Может возникнуть вопрос: а так ли уж это далеко, ведь молекулы (пусть и биологические) — все же квантовые объекты и, безусловно, должны жить по законам квантовой механики? Так-то оно так, да только для практического моделирования

¹⁾ Антон Олегович Чугунов — выпускник кафедры биофизики биологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (2003); к. ф.-м. н. по специальности «биофизика» (2007); старший научный сотрудник Института биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН; сооснователь (2007) и главный редактор научно-популярного портала «Биомолекула» (<https://biomolecula.ru>) о современной биологии, биомедицине и биотехнологиях.

таких молекул существует подход эмпирических силовых полей, полностью «задвигающий» квантовую механику в угол и описывающий молекулу как классический «ньютоновский» объект, где атомы уподобляются шарикам на пружинках. Примитивный или нет, этот подход нашел воплощение в методике молекулярной динамики и позволяет довольно адекватно рассчитывать конформационные явления в биомолекулах — а ведь такие принципиальные для молекулярной биологии явления, как фолдинг белка или межмолекулярное распознавание, практически полностью описываются в терминах конформаций. Другое дело, что мы при этом начисто «теряем» такие пласты реальности, как химия или спектроскопия, но молекулярная динамика и не притворяется, что умеет моделировать их — за этим исследователей всегда просят обращаться как раз-таки к квантовой механике.

С точки зрения молекулярной биологии. Один из авторов этой книги — Генри Эдгарович Норман — попросил меня прочесть ее «биологическую» часть, отвечающую на один из «великих» вопросов в физике: как она связана с биологией. Я с удовольствием и интересом прочитал несколько первых глав — насколько у меня хватило теоретической подготовки в квантовой физике — и, в частности, был рад узнать о «неокопенгагенской» парадигме. Конечно, в этом я вовсе не специалист, а приглашен был в качестве рецензента и автора одного из предисловий как исследователь-биофизик, но также как главный редактор портала о современной биологии «Биомолекула».

С 2007 г., когда мы вместе с двумя однокурсниками основали этот ресурс, я по мере сил слежу за развитием различных биологических областей (в основном в области молекулярной и клеточной биологии), а потому, в частности, имею представление о роли квантовых явлений в таких важнейших биологических процессах, как фотосинтез, зрение и магнитоорецепция птиц, которая позволяет им ориентироваться по линиям магнитного поля Земли и совершать сезонные перелеты.

Можно ли считать обоняние квантовым процессом? И вот насчет «биологических» глав у нас с Генри Эдгаровичем возник любопытный спор: считать ли зарождающуюся «квантовую биологию» новой страницей биофизики, и если да, то какую конкретно биологическую проблему можно вписать на эту первую страницу? Поспорили же мы из-за обоняния, которому в черновике этой книги была отведена «заглавная» роль в квантовой биологии: опубликованы некоторые свидетельства, что это тоже квантовый процесс. Между тем мне, как человеку, вплотную занимающемуся структурой белков-рецепторов, в том числе обонятельных, эта идея была не очень близка: дело в том, что распознающие запахи обонятельные G-белоксопряженные рецепторы взаимодействуют с молекулами-одорантами по чисто конформационному принципу (это взаимодействие рецептор–лиганд) и это не сопровождается изменением электронных состояний ни молекулы запаха, ни рецептора. Другие рецепторы этого семейства распознают многие нейрогормоны и прочие сигнальные вещества, например адреналин, гистамин и т. д.; и в этом случае стоило бы всю рецепцию записать в «квантовую епархию», к чему тенденции в сообществе структурных биологов и нейробиологов нет.

Немного поспорив и совместно проанализировав литературу насчет распознавания обонятельными рецепторами изотопомеров (молекул с одинаковым строением, за исключением включения отдельных изотопов атомов, обладающих разной массой), мы пришли к консенсусу, что эта область еще развивается и решающего слова в ней пока не сказано.

Структура реальности. В любом случае — это актуальная и интересная книга и, что важно, написанная не в ключе классического учебника. Из возможных аналогов на ум приходит книга Дэвида Дойча «Структура реальности», но мне книга Дойча показалась менее научной. Книга Ланкина и Нормана охватывает широкий круг вопросов современной науки, в том числе междисциплинарных. Можно рекомендовать ее и физикам, и биологам, особенно тем, которые хотят расширить границы своих познаний в области фундаментальных оснований существования материи, в том числе и живой.

Quantum mechanics is very much more than just a 'theory'; it is a completely new way of looking at the world, involving a change in paradigm perhaps more radical than any other in the history of human thought.

Sir Anthony James Leggett, 2002

Преподавание физики и обсуждение ее состояния и путей развития не может и не должно обойти вниманием три «великие» проблемы. Во-первых, речь идет о возрастании энтропии, необратимости и «стреле времени». Во-вторых, это проблема интерпретации и понимания квантовой механики.

И, в-третьих, это вопрос о связи физики с биологией и, конкретно, проблема редукционизма. Это одновременно великая физическая и биологическая проблема, и она, как я убежден, будет одной из центральных в науке XXI века.

Академик Виталий Лазаревич Гинзбург, 2004