

УДК 517.982.224
ББК 22.12
К55

Коке Б., Киссинджер А.

K55 Изображение квантовых процессов / пер. с англ. А. А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 880 с.: ил.

ISBN 978-5-97060-727-5

Эта книга – живое изложение великолепного подхода авторов к квантовым процессам.

Не имеющие аналогов особенности квантового мира в этой книге объясняются на языке диаграмм – новаторском наглядном методе изложения сложных теорий.

Применяемый формализм позволяет выработать интуитивное понимание квантовых особенностей без сложных вычислений – для чтения достаточно базовой математической подготовки. Это чисто диаграммное изложение квантовой теории – плод 10-летних исследований, объединяющий классические методы линейной алгебры и гильбертовых пространств с передовыми достижениями в области квантовых вычислений и оснований квантовой теории.

Книга написана простым языком, с юмором и включает свыше 100 упражнений.

Издание будет полезно в качестве начального курса по основаниям квантовой теории и квантовым вычислениям для студентов, а также для ученых из разных областей – физики, биологии, лингвистики и когнитивистики.

УДК 517.982.224
ББК 22.12

Printed in the United Kingdom by TJ International Ltd. Padstow Cornwall. Copyright © 2017 Bob Coecke and Aleks Kissinger. Russian-language edition copyright © 2019 by DMK Press. All rights reserved.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-1-107-10422-8 (анг.)
ISBN 978-5-97060-727-5 (рус.)

Copyright © 2017 Bob Coecke and Aleks Kissinger
© Оформление, издание, перевод, ДМК Пресс, 2019

Содержание

Предисловие	12
Глава 1. Введение	17
1.1. Пингвины и белый медведь	17
1.2. Так что же тут нового?	21
1.2.1. Новое отношение к квантовой теории: особенности	22
1.2.2. Новый вид математики: диаграммы	25
1.2.3. Новое основание физики: процессные теории	27
1.2.4. Новая парадигма: квантовый пикторализм.....	29
1.3. Исторические замечания и ссылки.....	31
Глава 2. Как читать эту книгу	35
2.1. Кто вы и чего вы хотите?	35
2.2. Меню	36
2.2.1. Как эволюционируют диаграммы в этой книге	36
2.2.2. Голливудский трейлер	39
2.2.3. Промежуточное синтаксическое загрязнение	40
2.2.4. Итоги, исторические замечания, ссылки, эпитафьи	41
2.2.5. Заголовки со звездочкой и материал повышенной сложности	41
2.3. Часто задаваемые вопросы	42
Глава 3. Процессы как диаграммы	45
3.1. От процессов к диаграммам.....	46
3.1.1. Процессы – блоки, системы – провода.....	46
3.1.2. Процессные теории	49
3.1.3. Диаграммы – это математика.....	52
3.1.4. Процессные равенства	55
3.1.5. Подстановка диаграмм.....	59
3.2. Схемные диаграммы.....	61
3.2.1. Параллельная композиция	61
3.2.2. Последовательная композиция	62
3.2.3. Два эквивалентных определения схем	64
3.2.4. Диаграммы лучше алгебры.....	67
3.3. Функции и отношения как процессы	70
3.3.1. Множества	70
3.3.2. Функции	72
3.3.3. Отношения	74
3.3.4. Сравнение функций с отношениями	77
3.4. Специальные процессы	77
3.4.1. Состояния, эффекты и числа.....	77
3.4.2. Как выразить невозможное: нулевые диаграммы.....	85
3.4.3. Процессы, равные «с точностью до числа»	86
3.4.4. Нотация Дирака	88
3.5. Итоги: что следует запомнить	90

3.6. Дополнительный материал*	93
3.6.1. Абстрактные тензорные системы*	94
3.6.2. Симметричные моноидальные категории*	96
3.6.3. Диаграммы общего вида и схемы*	98
3.7. Исторические замечания и ссылки	99

Глава 4. Струнные диаграммы 102

4.1. Чашки, крышки и струнные диаграммы	103
4.1.1. Разделимость	104
4.1.2. Двойственность процессов и состояний	107
4.1.3. Уравнения разгибания	110
4.1.4. Струнные диаграммы	112
4.2. Транспонирование и след	114
4.2.1. Транспонирование	115
4.2.2. Транспонирование составных систем	120
4.2.3. След и частичный след	122
4.3. Отражение диаграмм	124
4.3.1. Адъюнкция	124
4.3.2. Сопряжение	129
4.3.3. Внутреннее произведение	134
4.3.4. Унитарность	138
4.3.5. Положительность	139
4.3.6. \otimes -положительность	141
4.3.7. Проекторы	143
4.4. Квантовые особенности, выводимые из струнных диаграмм	146
4.4.1. Теорема о невозможности универсальной разделимости	147
4.4.2. Две теоремы о невозможности клонирования	151
4.4.3. Как будто время вспять течет	156
4.4.4. Телепортация	159
4.5. Итоги: что следует запомнить	164
4.6. Дополнительный материал*	169
4.6.1. Струнные диаграммы в абстрактных тензорных системах*	169
4.6.2. Двойственные типы и самодвойственность*	170
4.6.3. Инволютивные компактные замкнутые категории*	174
4.7. Исторические замечания и ссылки	175

Глава 5. От диаграмм к гильбертову пространству 178

5.1. Базисы и матрицы	180
5.1.1. Базис для типа	180
5.1.2. Матрица процесса	187
5.1.3. Суммы процессов	192
5.1.4. От матриц к процессам	197
5.1.5. Матрицы изометрических и унитарных процессов	203
5.1.6. Матрицы самоадъюнктных и положительных процессов	207
5.1.7. Следы матриц	211
5.2. Матричное исчисление	213
5.2.1. Последовательная композиция матриц	213
5.2.2. Параллельная композиция матриц	214
5.2.3. Матричная форма чашек и крышек	221
5.2.5. Матрицы как процессные теории	224
5.3. Гильбертовы пространства	227

5.3.1. От диаграмм к линейным отображениям и гильбертовым пространствам	227
5.3.2. От сопряжения к положительности.....	229
5.3.3. Почему математики любят комплексные числа	231
5.3.4. Классические логические вентили как линейные отображения.....	237
5.3.5. X-базис и линейное отображение Адамара	240
5.3.6. Базис Белла и отображения Белла	245
5.4. Гильбертовы пространства и диаграммы	250
5.4.1. Струнные диаграммы полны относительно линейных отображений.....	251
5.4.2. Теоретико-множественное определение гильбертовых пространств.....	253
5.5. Итоги: что следует запомнить	261
5.6. Дополнительный материал*	266
5.6.1. За пределами конечного числа измерений*	267
5.6.2. Категории с суммами и базисами*	269
5.6.3. Суммы в теории узлов*	271
5.6.4. Эквивалентность симметричных моноидальных категорий*	272
5.7. Исторические замечания и ссылки	278

Глава 6. Квантовые процессы..... 281

6.1. Переход к чистым квантовым отображениям путем дублирования.....	283
6.1.1. Дублирование порождает вероятности.....	284
6.1.2. Дублирование устраняет глобальные фазы	287
6.1.3. Процессная теория чистых квантовых отображений	291
6.1.4. Что сохраняется при дублировании	296
6.1.5. Что не сохраняется при дублировании	301
6.2. От отбрасывания к квантовым отображениям	305
6.2.1. Отбрасывание	305
6.2.2. Нечистота	310
6.2.3. Вес и причинность для квантовых состояний	313
6.2.4. Процессная теория квантовых отображений	319
6.2.5. Каузальность квантовых отображений	324
6.2.6. От каузальности к изометричности и унитарности	326
6.2.7. Разложение Крауса и смешивание	330
6.2.8. Теорема о нераспространении	337
6.3. Относительность в процессных теориях.....	341
6.3.1. Причинная структура	342
6.3.2. Из причинности следует несигнальность	347
6.3.3. Причинность и ковариантность	348
6.4. Квантовые процессы.....	350
6.4.1. Недетерминированные квантовые процессы	352
6.4.2. Недетерминированная реализация всех квантовых отображений	355
6.4.3. Очищение квантовых процессов.....	358
6.4.4. Для телепортации необходимо классическое взаимодействие	361
6.4.5. Управляемые процессы.....	363
6.4.6. Квантовая телепортация в деталях	365
6.5. Итоги: что следует запомнить	368
6.6. Дополнительный материал*	372
6.6.1. Дублирование общих процессных теорий*	372
6.6.2. Аксиоматизация дублирования*	374
6.6.3. А теперь кое-что из другой области*	376
6.7. Исторические замечания и ссылки	377

Глава 7. Квантовые измерения	380
7.1. Измерения ОНБ	382
7.1.1. Введение в измерительные приборы от додо.....	382
7.1.2. Возмущающие измерения ОНБ	385
7.1.3. Невозмущающие измерения ОНБ	390
7.1.4. Суперпозиция и интерференция	391
7.1.5. Наилучшая из имеющихся альтернатив наблюдению	395
7.2. Динамика измерений и квантовые протоколы	396
7.2.1. Индуцированная измерением динамика I: обратное действие.....	397
7.2.2. Пример: вентильная телепортация	400
7.2.3. Индуцированная измерением динамика II: коллапс.....	402
7.2.4. Пример: перекоммутация запутывания	404
7.3. Более общие виды измерения	406
7.3.1. Измерения фон Неймана	406
7.3.2. Квантовый формализм фон Неймана	412
7.3.3. Измерения POVM.....	416
7.3.4. Теоремы Наймарка и Озавы о дилатации.....	418
7.4. Томография.....	421
7.4.1. Томография состояния	421
7.4.2. Информационно полные измерения	424
7.4.3. Локальная томография = процессная томография.....	426
7.5. Итоги: что следует запомнить	428
7.6. Дополнительный материал*.....	432
7.6.1. А существуют ли вообще квантовые измерения?*	432
7.6.2. Проекторы и квантовая логика*	435
7.6.3. Невозможность локальной томографии*	437
7.7. Исторические замечания и ссылки	439
Глава 8. Изображение классически-квантовых процессов	441
8.1. Классические системы как провода.....	445
8.1.1. Двойные и одиночные провода.....	446
8.1.2. Пример: плотное кодирование.....	449
8.1.3. Измеритель и кодировщик	451
8.1.4. Классически-квантовые отображения	453
8.1.5. Удаление и причинность.....	457
8.2. От пауков к классическим отображениям.....	460
8.2.1. Классические отображения.....	461
8.2.2. Копирование и удаление.....	464
8.2.3. Пауки	474
8.2.4. Если нечто ведет себя как паук, то это и есть паук.....	481
8.2.5. Все линейные отображения как пауки + изометрии.....	484
8.2.6. Паучьи диаграммы и полнота	489
8.3. От пауков к квантовым отображениям	491
8.3.1. Измеритель и кодировщик как пауки	492
8.3.2. Декогеренция.....	497
8.3.3. Классические, квантовые и гибридные пауки.....	502
8.3.4. Смешивание с пауками	507
8.3.5. Запутывание для нечистых состояний.....	511
8.4. Измерения и протоколы с участием пауков	514
8.4.1. Измерения ОНБ	515
8.4.2. Управляемые унитарные процессы	518

8.4.3. Телепортация	521
8.4.4. Плотное кодирование.....	524
8.4.5. Перекоммутация запутывания.....	525
8.4.6. Измерения фон Неймана	526
8.4.7. Измерения POVM и теорема Наймарка о дилатации.....	529
8.5. Итоги: что следует запомнить	530
8.6. Дополнительный материал*	537
8.6.1. Пауки как алгебры Фробениуса*	538
8.6.2. Некоммутативные пауки*.....	541
8.6.3. Волосатые пауки*	544
8.6.4. Пауки как слова*	547
8.7. Исторические замечания и ссылки	547

Глава 9. Изображение фаз и дополнительности..... 550

9.1. Украшенные пауки.....	552
9.1.1. Несмещенность и фазовые состояния	552
9.1.2. Фазовые пауки	558
9.1.3. Слияние фазовых пауков	560
9.1.4. Фазовая группа	563
9.1.5. Фазовые вентили	566
9.2. Многоцветные пауки	570
9.2.1. Дополнительные пауки.....	570
9.2.2. Дополнительность и несмещенность.....	576
9.2.3. От дополнительности к вентилю CNOT	582
9.2.4. «Цвета» классических данных	585
9.2.5. Дополнительные измерения.....	587
9.2.6. Квантовое распределение ключей	591
9.2.7. Телепортация с дополнительными измерениями.....	594
9.3. Сильная дополнительность	600
9.3.1. Недостающие правила	601
9.3.2. Моногамия сильной дополнительности	604
9.3.3. Лики сильной дополнительности.....	605
9.3.4. Классическая подгруппа	610
9.3.5. От пауков к отображениям четности	617
9.3.6. Классификация сильной дополнительности	621
9.4. ZX-исчисление.....	624
9.4.1. ZX-диаграммы универсальны.....	626
9.4.2. ZX-исчисление для диаграмм Клиффорда.....	629
9.4.3. ZX-исчисление для додо: только диаграммы и ничего более	634
9.4.4. ZX для профессионалов: строим собственное исчисление	640
9.4.5. ZX для богов: полнота	645
9.4.6. Что нам дало полное ZX-исчисление	653
9.5. Итоги: что следует запомнить	655
9.6. Дополнительный материал*	661
9.6.1. Сильно дополнительные пауки как алгебра Хопфа*.....	661
9.6.2. Сильная дополнительность и нормальные формы*	664
9.7. Исторические замечания и ссылки	667

Глава 10. Квантовая теория: полная картина..... 670

10.1. Диаграммы	671
10.1.1. Схемные диаграммы	671

10 ❖ Содержание

10.1.2. Струнные диаграммы.....	673
10.1.3. Дублированные диаграммы.....	675
10.1.4. Паучьи диаграммы	677
10.1.5. ZX-диаграммы.....	680
10.2. Процессы.....	682
10.2.1. Причинность	683
10.2.2. Разложение процессов и невозможность распространения	683
10.2.3. Примеры.....	685
10.3. Законы.....	691
10.3.1. Дополнительность	691
10.3.2. Сильная дополнительность.....	694
10.3.3. ZX-исчисление	696
10.4. Исторические замечания и ссылки.....	699

Глава 11. Основания квантовой теории 701

11.1. Квантовая нелокальность	701
11.1.1. Уточнения квантовой теории	702
11.1.2. Сценарии ГХЦ–Мермина	704
11.1.3. Получение противоречия.....	706
11.2. Квантовоподобные процессные теории.....	708
11.2.1. Дополнительность в теории отношений.....	708
11.2.2. Модельная квантовая теория Спеккенса	710
11.2.3. Фазы в спек-теории	714
11.2.4. ZX-исчисление для спек-теории.....	718
11.2.5. Нелокальность в спек-теории?	721
11.3. Итоги: что следует запомнить.....	723
11.4. Исторические замечания и ссылки.....	724

Глава 12. Квантовые вычисления 726

12.1. Схемная модель.....	727
12.1.1. Квантовые вычисления как ZX-диаграммы.....	728
12.1.2. Построение квантовых вентилей в виде ZX-диаграмм	731
12.1.3. Универсальность схем	738
12.2. Квантовые алгоритмы	745
12.2.1. (Ложная?) магия квантового оракула.....	746
12.2.2. Алгоритм Дойча–Йожи	750
12.2.3. Квантовый поиск	755
12.2.4. Задача о скрытой подгруппе.....	760
12.3. Основанные на измерении квантовые вычисления	767
12.3.1. Графовые и кластерные состояния.....	769
12.3.2. Измерение графовых состояний	770
12.3.3. Прямое распространение.....	772
12.3.4. Прямое распространение с помощью классических проводов.....	775
12.3.5. Универсальность	779
12.4. Итоги: что следует запомнить.....	784
12.5. Исторические замечания и ссылки.....	786

Глава 13. Квантовые ресурсы 787

13.1. Ресурсные теории.....	788
13.1.1. Бесплатные процессы.....	789
13.1.2. Сравнение ресурсов.....	791

13.1.3. Измерение ресурсов	794
13.2. Теория чистоты	796
13.2.1. Сравнение чистоты.....	797
13.2.2. Измерение (не)чистоты.....	806
13.3. Теория запутывания	807
13.3.1. LOCC-запутывание	808
13.3.2. SLOCC-запутывание	821
13.3.3. Взрывающиеся пауки	827
13.3.4. Назад к основам: арифметика	832
13.4. Итоги: что следует запомнить.....	836
13.5. Исторические замечания и ссылки.....	840
Глава 14. Программа Quantomatic.....	842
14.1. Проверка Quantomatic в деле	843
14.2. !-блоки: замена многоточию.....	849
14.3. Синтез физических теорий	852
14.4. Исторические замечания и ссылки.....	855
Некоторые обозначения	857
Библиография	858
Предметный указатель	874