

УДК 531:530.145
ББК 22.314
Б882



Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 08-02-07063.

Бройер Х.-П., Петруччионе Ф.

Теория открытых квантовых систем / Пер. с англ. под ред. Ю. И. Богданова. — М. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2010. — 824 с.

В книге излагаются основные физические концепции и математические методы, используемые для исследования динамики открытых квантовых систем. Стремясь сделать книгу «самодостаточной», авторы начинают изложение с обзора классической теории вероятности и введения в основы квантовой механики, где особое внимание уделяют ее статистической интерпретации. Разрабатываются основы теории матриц плотности, квантовых марковских процессов и динамических полугрупп. Во многих примерах используются основные уравнения из квантовой оптики и теории квантового броуновского движения. Особое внимание уделяется теории декогерентизации, обусловленной окружающей средой, ее роли в динамическом описании процесса измерений, а также экспериментальным наблюдениям декогерентизации состояний, аналогичных состояниям кота Шредингера.

Книга предназначена для студентов старших курсов, аспирантов и преподавателей физики и прикладной математики, а также для исследователей, проявляющих интерес к фундаментальным вопросам квантовой механики и ее приложениям.

ISBN 978-5-93972-774-7

«The Theory of Open Quantum Systems» was originally published in English in 2002. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

Книга «Теория открытых квантовых систем» впервые вышла на английском языке в 2002 году. Перевод публикуется по соглашению с издательством Oxford University Press.

© Oxford University Press, 2002

© Перевод на русский язык:

НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010

<http://shop.rcd.ru>

<http://ics.org.ru>

Оглавление

Предисловие научного редактора перевода	11
Предисловие	14
Слова благодарности	21

ЧАСТЬ I. ВЕРОЯТНОСТЬ В КЛАССИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ 23

ГЛАВА 1. Классическая теория вероятностей и стохастические процессы	25
1.1. Вероятностное пространство	25
1.1.1. σ -алгебра событий	25
1.1.2. Вероятностные меры и аксиомы Колмогорова	26
1.1.3. Условные вероятности и независимость	27
1.2. Случайные величины	28
1.2.1. Определение случайных величин	28
1.2.2. Преобразование случайных величин	31
1.2.3. Математические ожидания и характеристическая функция	32
1.3. Стохастические процессы	35
1.3.1. Формальное определение стохастического процесса	35
1.3.2. Иерархия совместных распределений вероятностей	36
1.4. Марковские процессы	38
1.4.1. Уравнение Чепмена – Колмогорова	38
1.4.2. Дифференциальное уравнение Чепмена – Колмогорова	42
1.4.3. Детерминированные процессы и уравнение Лиувилля	45
1.4.4. Скачкообразные процессы и основное уравнение	46
1.4.5. Диффузионные процессы и уравнение Фоккера – Планка	54
1.5. Кусочно-детерминированные процессы	60
1.5.1. Основное уравнение Лиувилля	60

1.5.2.	Распределение времени ожидания и выборочные траектории	61
1.5.3.	Представление интегралов по траекториям для КДП	65
1.5.4.	Стохастический расчет для КДП	68
1.6.	Процессы Леви	76
1.6.1.	Трансляционная инвариантность процессов	76
1.6.2.	Формула Леви – Хинчина	78
1.6.3.	Стабильные процессы Леви	83
ГЛАВА 2.	Квантовая вероятность	92
2.1.	Статистическая интерпретация квантовой механики	92
2.1.1.	Самосопряженные операторы и спектральная теорема	93
2.1.2.	Наблюдаемые и случайные величины	97
2.1.3.	Чистые состояния и статистическое перемешивание	99
2.1.4.	Совместные вероятности в квантовой механике	106
2.2.	Составные квантовые системы	111
2.2.1.	Тензорное произведение	111
2.2.2.	Разложение Шмидта и запутанность	114
2.3.	Квантовые меры энтропии	116
2.3.1.	Энтропия фон Неймана	117
2.3.2.	Относительная энтропия	119
2.3.3.	Линейная энтропия	121
2.4.	Теория квантового измерения	122
2.4.1.	Идеальные квантовые измерения	122
2.4.2.	Операции и эффекты	125
2.4.3.	Теорема представления для квантовых операций	127
2.4.4.	Квантовое измерение и энтропия	132
2.4.5.	Приблизительные измерения	134
2.4.6.	Непрямые квантовые измерения	137
2.4.7.	Квантовые неразрушающие измерения	144
ЧАСТЬ II.	ТЕОРИЯ МАТРИЦ ПЛОТНОСТИ	149
ГЛАВА 3.	Основные квантовые уравнения	151
3.1.	Замкнутые и открытые квантовые системы	152
3.1.1.	Уравнение Лиувилля – фон Неймана	152
3.1.2.	Гейзенберговское представление и представление взаимодействия	154
3.1.3.	Динамика открытых систем	158

3.2.	Квантовые марковские процессы	160
3.2.1.	Квантовые динамические полугруппы	161
3.2.2.	Марковское основное квантовое уравнение	163
3.2.3.	Сопряженное основное квантовое уравнение	169
3.2.4.	Временные корреляционные функции	170
3.2.5.	Необратимость и производство энтропии	173
3.3.	Микроскопический вывод	176
3.3.1.	Предел слабого взаимодействия	176
3.3.2.	Релаксация к равновесию	183
3.3.3.	Предел сингулярной связи	185
3.3.4.	Предел низкой плотности	187
3.4.	Квантовое оптическое основное уравнение	189
3.4.1.	Вещество в квантованных полях излучения	189
3.4.2.	Затухание двухуровневой системы	195
3.4.3.	Затухание в сжатом вакуумном состоянии	199
3.4.4.	Резервуары более общего вида	202
3.4.5.	Резонансная флуоресценция	204
3.4.6.	Затухающий гармонический осциллятор	212
3.5.	Неселективные непрерывные измерения	218
3.5.1.	Квантовый эффект Зенона	219
3.5.2.	Уравнение для матрицы плотности	220
3.6.	Квантовое броуновское движение	225
3.6.1.	Модель Кальдейры–Леггетта	226
3.6.2.	Высокотемпературное основное уравнение	227
3.6.3.	Точные гейзенберговские уравнения движения	237
3.6.4.	Функционал влияния	248
3.7.	Нелинейные квантовые основные уравнения	259
3.7.1.	Квантовое уравнение Больцмана	260
3.7.2.	Основные уравнения в приближении среднего поля	262
3.7.3.	Лазерные уравнения в приближении среднего поля	264
3.7.4.	Нелинейное уравнение Шредингера	269
3.7.5.	Суперлюминисценция	271
ГЛАВА 4.	Декогерентизация	281
4.1.	Функция декогерентизации	282
4.2.	Точно решаемая модель	288
4.2.1.	Временная эволюция всей системы	288
4.2.2.	Разрушение когерентностей и фактор декогерентизации	291
4.2.3.	Когерентные подпространства и зависимость от размера системы	294

4.3.	Марковские механизмы декогерентизации	297
4.3.1.	Интенсивность декогерентизации	297
4.3.2.	Квантовое броуновское движение	299
4.3.3.	Внутренние степени свободы	300
4.3.4.	Рассеяние частиц	303
4.4.	Затухающий гармонический осциллятор	308
4.4.1.	Вакуумная декогерентизация	309
4.4.2.	Тепловой шум	313
4.5.	Состояния электромагнитного поля	318
4.5.1.	Атомы, взаимодействующие с полевой модой полости	319
4.5.2.	Состояния шредингеровского кота	326
4.6.	Модель Кальдейры – Леггетта	331
4.6.1.	Основная формула декогерентизации	331
4.6.2.	Омические окружения	335
4.7.	Декогерентизация и квантовое измерение	341
4.7.1.	Динамический выбор измерительного базиса	342
4.7.2.	Динамическая модель для квантового измерения	348

ЧАСТЬ III. СТОХАСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГИЛЬБЕРТОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ **355**

ГЛАВА 5.	Вероятностные распределения в гильбертовом пространстве	357
5.1.	Вектор состояний как случайная величина в гильбертовом пространстве	357
5.1.1.	Новый тип квантово-механического ансамбля	358
5.1.2.	Эксперимент Штерна – Герлаха	363
5.2.	Плотность вероятности для функционалов в гильбертовом пространстве	367
5.2.1.	Вероятностные измерения на гильбертовом пространстве	367
5.2.2.	Распределения на проективном гильбертовом пространстве	371
5.2.3.	Математические ожидания	374
5.3.	Смешанные ансамбли	376
5.3.1.	Функционалы плотности вероятности на пространстве состояний	377
5.3.2.	Описание селективных квантовых измерений	379

ГЛАВА 6. Стохастическая динамика в гильбертовом пространстве	382
6.1. Динамические полугруппы и КДП в гильбертовом пространстве	383
6.1.1. Динамика редуцированной системы как КДП	383
6.1.2. Интеграл по траектории в гильбертовом пространстве	392
6.1.3. Приближение диффузии	395
6.1.4. Многовременные корреляционные функции	397
6.2. Стохастическое представление непрерывных измерений	403
6.2.1. Стохастическая временная эволюция \mathcal{E}_P -ансамблей	404
6.2.2. Поведение пропагатора на коротких временах	405
6.3. Прямое фотодетектирование	407
6.3.1. Вывод КДП	408
6.3.2. Решение в виде интеграла по траекториям	414
6.4. Гомодинное фотодетектирование	420
6.4.1. Вывод КДП для гомодинного детектирования	420
6.4.2. Стохастическое уравнение Шредингера	426
6.5. Гетеродинное фотодетектирование	427
6.5.1. Стохастическое уравнение Шредингера	428
6.5.2. Стохастические модели коллапса	432
6.6. Стохастические уравнения для матрицы плотности	435
6.7. Фотодетектирование на полевой моде	438
6.7.1. Формула фотодетектирования	438
6.7.2. Квантовое неразрушающее измерение полевой моды	443
ГЛАВА 7. Стохастический метод моделирования	451
7.1. Численные алгоритмы моделирования КДП	452
7.1.1. Оценка математических ожиданий	452
7.1.2. Генерирование реализаций процесса	454
7.1.3. Определение времени ожидания	455
7.1.4. Выбор скачков	458
7.2. Алгоритмы для стохастических уравнений Шредингера	459
7.2.1. Основные замечания по сходимости	459
7.2.2. Схема Эйлера	462
7.2.3. Схема Хьюна	462
7.2.4. Схема Рунге–Кутты четвертого порядка	463
7.2.5. Схема второго порядка малости	464
7.3. Примеры	464
7.3.1. Затухающий гармонический осциллятор	465
7.3.2. Возбуждаемая двухуровневая система	469
7.4. Исследование численной реализации	474

7.4.1.	Численная эффективность и законы масштабирования	474
7.4.2.	Затухающий возбужденный осциллятор Морзе	477
ГЛАВА 8.	Приложения к квантовым оптическим системам	486
8.1.	Непрерывные измерения в КЭД	487
8.1.1.	Конструирование микроскопического гамильтониана .	487
8.1.2.	Определение КЭД-операции	490
8.1.3.	Стохастическая динамика мультипольного излучения .	493
8.1.4.	Представление для неполных измерений	496
8.2.	Темные резонансные состояния	498
8.2.1.	Распределение времени ожидания и захваченное состояние	498
8.2.2.	Измерительные схемы и стохастическая эволюция . .	502
8.3.	Лазерное охлаждение и процессы Леви	508
8.3.1.	Динамика атомной волновой функции	510
8.3.2.	Когерентная заселенность ловушек	516
8.3.3.	Времена ожидания и импульсные распределения . . .	523
8.4.	Взаимодействие с сильным полем и картина Флоке	530
8.4.1.	Теория Флоке	532
8.4.2.	Стохастическая динамика в картине Флоке	535
8.4.3.	Спектральное детектирование и описание «одетых» атомов	538

ЧАСТЬ IV. НЕМАРКОВСКИЕ КВАНТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ **545**

ГЛАВА 9.	Проекционные операторные методы	547
9.1.	Проекционный операторный метод Накажimy – Цванцига . .	548
9.1.1.	Проекционные операторы	548
9.1.2.	Уравнение Накажimy – Цванцига	549
9.2.	Техника проекционных операторов, направленная на вычит временной свертки	552
9.2.1.	Локальное во времени основное квантовое уравнение .	553
9.2.2.	Ряд теории возмущений для УВС-генератора	554
9.2.3.	Разложение по кумулянтам	559
9.2.4.	Разложение по малым параметрам неоднородности . .	560
9.2.5.	Анализ точности	564
9.3.	Стохастическая интерпретация в двойном гильбертовом пространстве	565

ГЛАВА 10. Немарковская динамика в физических процессах . . .	569
10.1. Спонтанный распад двухуровневой системы	570
10.1.1. Точное основное уравнение и УВС-генератор	571
10.1.2. Модель Джейнса–Каммингса в условиях резонанса . . .	576
10.1.3. Модель Джейнса–Каммингса с расстройкой	583
10.1.4. Спонтанный фотонный распад в запрещенной зоне . .	586
10.2. Затухающий гармонический осциллятор	587
10.2.1. Модель и частотная перенормировка	588
10.2.2. Факторизованные начальные условия	589
10.2.3. Стационарное состояние	594
10.2.4. Нефакторизованные начальные условия	599
10.2.5. Игнорирование неоднородности	602
10.3. Спин-бозонная система	605
10.3.1. Микроскопическая модель	605
10.3.2. Релаксация начального факторизованного состояния .	606
10.3.3. Равновесные корреляционные функции	609
10.3.4. Переход от когерентного к некогерентному движению	611

ЧАСТЬ V. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ КВАНТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ **615**

ГЛАВА 11. Измерения в релятивистской квантовой механике . .	617
11.1. Уравнение Швингера–Томонаги	618
11.1.1. Состояния как функционал пространственноподобных гиперповерхностей	619
11.1.2. Расслоения пространства-времени	623
11.2. Измерение локальных переменных	625
11.2.1. Операция для нелокального измерения	625
11.2.2. Релятивистская редукция состояния	628
11.2.3. Многозначные пространственно-временные амплитуды	632
11.2.4. Согласованная иерархия совместных вероятностей . .	636
11.2.5. ЭПР-корреляции	641
11.2.6. Непрерывные измерения	643
11.3. Нелокальные измерения и причинность	647
11.3.1. Запутанные квантовые датчики	648
11.3.2. Нелокальные измерения ЭПР-датчиками	652
11.3.3. Верификация квантового состояния	658
11.3.4. Нелокальные операции и принцип причинности . . .	661
11.3.5. Ограничение на измеримость операторов	669

11.3.6. КНИ верификация нелокальных состояний	676
11.3.7. Приготовление нелокальных состояний	681
11.3.8. Обменные измерения	682
11.4. Квантовая телепортация	684
11.4.1. Когерентная передача квантовых состояний	685
11.4.2. Телепортация и измерение состояний Белла	688
11.4.3. Экспериментальная реализация	691
ГЛАВА 12. Квантовая электродинамика открытых систем	698
12.1. Теория матриц плотности для КЭД	699
12.1.1. Уравнения поля и корреляционные функции	699
12.1.2. Приведенная матрица плотности	707
12.2. Функционал влияния КЭД	709
12.2.1. Исключение степеней свободы излучения	709
12.2.2. Амплитуда вакуум-вакуум	715
12.2.3. Уравнение движения второго порядка	718
12.3. Декогерентизация посредством тормозного излучения	722
12.3.1. Введение функционала декогерентизации	722
12.3.2. Физическая интерпретация	728
12.3.3. Вычисление функционала декогерентизации	731
12.3.4. Метод интегралов по траекториям	743
12.4. Декогерентизация многочастичных состояний	752
Дополнение. Квантовая теория как унифицированная информаци-	
онная модель статистических явлений	758
Предметный указатель	815