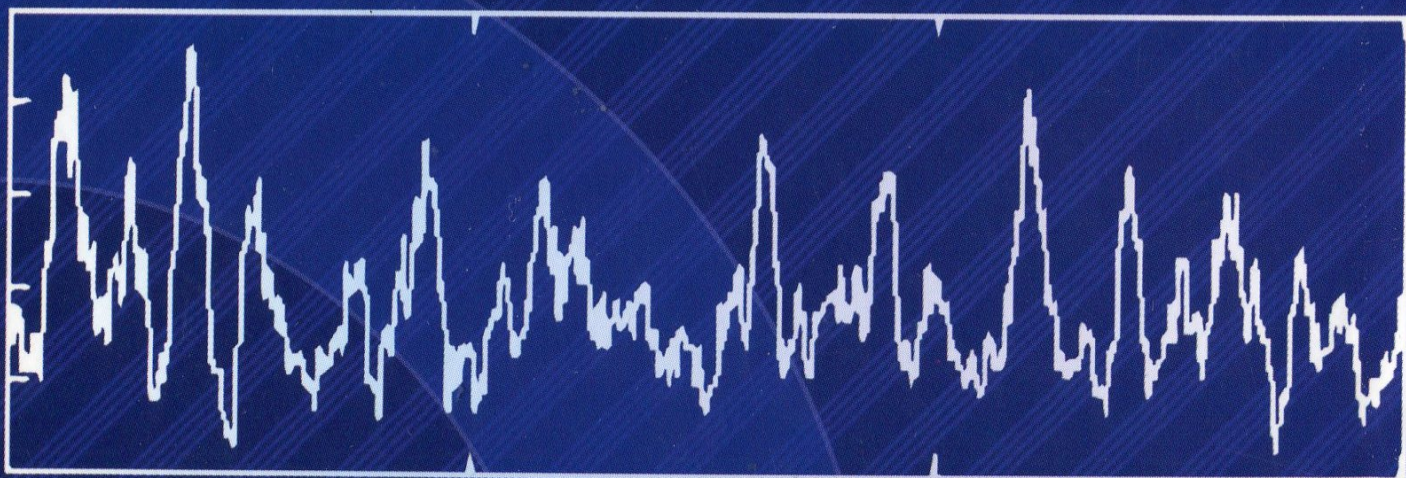




И.С. Осадько

ФЛУКТУИРУЮЩАЯ  
ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ  
НАНОЧАСТИЦ





И.С. Осадько

# ФЛУКТУИРУЮЩАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ НАНОЧАСТИЦ



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2011

Тверской государственный университет



Научная библиотека 00294079

Фз

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	7
Введение . . . . .	9

### Часть I

#### МЕТОДЫ ДОСТИЖЕНИЯ НАНОМЕТРОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Глава 1. <b>Зондовая микроскопия</b> . . . . .	21
1.1. Типы зондовых микроскопов . . . . .	21
1.2. Атомно-силовой микроскоп (АСМ) . . . . .	22
1.3. Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) . . . . .	26
1.4. Микроскоп ближнего поля . . . . .	30
1.5. Ближнее и дальнее электромагнитные поля . . . . .	32
1.5.1. Ближняя и дальняя зоны (35). 1.5.2. Разложение потенциалов по малым параметрам (36). 1.5.3. Ближнее и дальнее поля (38). 1.5.4. Как реализуется разрешение нанообъектов в МБП (41).	
Глава 2. <b>Спектроскопия одиночных наночастиц</b> . . . . .	43
2.1. Люминесцентные методы исследования одиночных атомов и молекул . . . . .	44
2.2. Конфокальная микроскопия одиночных наночастиц . . . . .	46

### Часть II

#### СЛУЧАЙНЫЕ СОБЫТИЯ

Глава 3. <b>Вероятность наблюдения случайных событий</b> . . . . .	50
3.1. Различные способы счета случайных событий. . . . .	50
3.2. Функции распределения событий в флуоресценции одиночной наночастицы . . . . .	53

### Часть III

#### ТЕОРИЯ ДВУХФОТОННЫХ КОРРЕЛЯТОРОВ

Глава 4. <b>Элементарная теория корреляторов</b> . . . . .	63
4.1. Коррелятор старт-стоп и полный двухфотонный коррелятор . . . . .	63
4.2. Простейшая теория для коррелятора старт-стоп . . . . .	67
4.3. Автокорреляционная функция и функция распределения фотонов флуоресценции . . . . .	71

<b>Глава 5. Квантовая теория двухфотонных корреляторов . . . . .</b>	<b>74</b>
5.1. Уравнения для амплитуд вероятности и матрицы плотности . . . . .	74
5.2. Спонтанное испускание света. Временная эволюция формы линии флуоресценции . . . . .	79
5.3. Поглощение света атомом. Уравнения для амплитуд вероятности . . . . .	86
5.4. Временная эволюция вероятностей в процессе поглощения света . . . . .	89
5.5. Изменение со временем формы линии поглощения. . . . .	92
5.6. Уравнения для коррелятора «старт-стоп» . . . . .	93
5.7. Уравнения для полного двухфотонного коррелятора. . . . .	96

#### Часть IV

### СТАТИСТИКА ФОТОНОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ И КВАНТОВЫХ ПРЫЖКОВ

<b>Глава 6. Непрерывная флуоресценция двухуровневых наночастиц . . . . .</b>	<b>102</b>
6.1. Субпуассоновская статистика фотонов флуоресценции двухуровневых наночастиц . . . . .	102
6.2. Коррелятор старт-стоп и полный коррелятор нерезонансной флуоресценции при интенсивном возбуждении . . . . .	105
6.3. Связь динамики системы со статистикой ее излучения. . . . .	111
6.4. Параметр Манделя. . . . .	115
6.5. Сравнение рассчитанных распределений фотонов с измеренными . . . . .	117
<b>Глава 7. Мерцающая флуоресценция одиночных наночастиц . . . . .</b>	<b>119</b>
7.1. Квантовые прыжки в атомах, детектируемые с помощью флуоресценции. . . . .	120
7.2. Полный двухфотонный коррелятор и автокорреляционная функция флуоресценции трехуровневой молекулы . . . . .	123
7.3. Уравнения для функций распределения on- и off-интервалов. . . . .	126
7.4. Расчет флуктуаций интенсивности флуоресценции . . . . .	128
7.5. Сравнение измеряемых и рассчитываемых вероятностей . . . . .	130
<b>Глава 8. Статистика фотонов мерцающей флуоресценции . . . . .</b>	<b>134</b>
8.1. Коррелятор старт-стоп мерцающей флуоресценции . . . . .	134
8.2. Выражение коррелятора старт-стоп через функции Пуассона. . . . .	137
8.3. Субпуассоновская статистика фотонов в on-интервале . . . . .	139
8.4. Суперпуассоновское распределение промежуточных фотонов. . . . .	141
8.5. Функции распределения фотонов в мерцающей флуоресценции . . . . .	149
8.6. Сравнение распределений фотонов, посчитанных разными методами . . . . .	155
8.7. Выявление скрытых off-интервалов . . . . .	159
Приложение . . . . .	163

## Часть V

**УЧЕТ ТЕОРИЕЙ ФАКТОРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Глава 9. <b>Фотоиспускание, накопление фотонов и фотоэлектрическая регистрация</b> . . . . .	165
9.1. Влияние времени накопления сигнала и флуктуаций фотонов флуоресценции . . . . .	165
9.2. Распределение испущенных фотонов и фотонов, пришедших на ФЭУ . . . . .	170
9.3. Влияние динамических характеристик ФЭУ на распределение фотоэлектрических импульсов . . . . .	173
9.3.1. Динамика системы, состоящей из молекулы и ФЭУ (174).	
9.3.2. Различные методы счета фотоэлектрических импульсов (180).	
9.3.3. Сравнение распределений фотонов и фотоэлектронов (181).	
9.4. Распределение фотоотсчетов во флуоресценции молекулы DiI . . . . .	184
9.5. Распределение фотоотсчетов во флуоресценции одиночной полимерной молекулы dPPV-PPyV . . . . .	187
Глава 10. <b>Статистика on → off прыжков</b> . . . . .	191
10.1. Функция распределения on → off прыжков . . . . .	191
10.2. Сравнение «измеренной» функции распределения on → off прыжков с рассчитанной . . . . .	194
10.3. Сравнение теории on → off прыжков с экспериментом . . . . .	195

## Часть VI

**МОЛЕКУЛЫ В ФЛУКТУИРУЮЩЕМ ОКРУЖЕНИИ**

Глава 11. <b>Одиночная молекула как зонд нанометрового разрешения для исследования квантовой динамики неупорядоченных сред</b> . . . . .	197
11.1. Туннельные системы полимеров и стекол . . . . .	199
11.2. Модель двухуровневых систем (ДУС) . . . . .	201
11.3. Проявление ДУС в оптических полосах поглощения индивидуальных молекул . . . . .	204
11.4. Расчет прыжков спектральной линии . . . . .	209
Глава 12. <b>Суперпуассоновская статистика on → off-прыжков</b> . . . . .	211
12.1. Система с двумя типами темных состояний . . . . .	211
12.2. Функция распределения on → off прыжков . . . . .	213
12.3. Расчет распределений и обсуждение результатов . . . . .	218
Глава 13. <b>Флуктуации коэффициента поглощения индивидуальной молекулы</b> . . . . .	222
13.1. Флуктуации коэффициента поглощения при сканировании частоты возбуждающего лазера . . . . .	223
13.2. Авто- и кросс-корреляторы двух трэйлов . . . . .	228



13.3. Влияние времени измерения на авто- и кросс-корреляторы . . . . .	232
13.4. Авто- и кросс-корреляторы четырех трэйлов . . . . .	233
<b>Глава 14. Применение теории к анализу флуктуирующего поглощения . . . . .</b>	<b>238</b>
14.1. Уширение оптической полосы за счет слияния оптических линий. .	238
14.2. Светоиндуцированное уширение оптических линий со временем . .	243
14.3. Экспериментальные исследования динамики оптических полос индивидуальных примесных центров . . . . .	251
14.4. Моделирование реальных спектральных трэйлов. . . . .	258
 Часть VII  	
<b>ДИНАМИКА ОДИНОЧНЫХ НАНОЧАСТИЦ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ</b>	
<b>Глава 15. Конфокальная микроскопия одиночных биомолекул . . .</b>	<b>263</b>
15.1. Молекулы красителя, прикрепленные к ДНК . . . . .	265
15.2. Исследование одиночных молекул белка . . . . .	267
15.3. Химическая реакция на одномолекулярном уровне с участием холестерола . . . . .	271
<b>Глава 16. Флуктуации флуоресценции одиночной полимерной молекулы при комнатной температуре . . . . .</b>	<b>277</b>
16.1. Почему полимерная цепь есть одиночная наночастица? . . . . .	277
16.2. Экспериментальные данные по полимерной молекуле . . . . .	279
16.3. Теоретические модели с мерцающей и двойной флуоресценцией . .	282
16.4. Теоретическая модель, определяющая мерцание флуоресценции полимерной цепи . . . . .	283
16.5. Два типа on- и off-интервалов . . . . .	287
16.6. Два уровня интенсивности флуоресценции. . . . .	290
16.7. Определение релаксационных констант по экспериментальным данным . . . . .	292
<b>Глава 17. Квантовые точки и нанокристаллы полупроводников . .</b>	<b>297</b>
17.1. Квантовые точки полупроводника . . . . .	297
17.2. Полупроводниковые нанокристаллы (НК). . . . .	299
17.3. Модель ионизации-нейтрализации НК. . . . .	303
17.4. Влияние поверхностных состояний НК на распределение on-интервалов . . . . .	309
17.5. Степенное распределение off-интервалов в флуоресценции НК . . .	312
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>316</b>