

В. Эбелинг, Т. Пёшель

ЛЕКЦИИ ПО КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКЕ

с приложениями к разреженным газам и плазме



R&C
Dynamics

Вернер Эбелинг, Торстен Пёшель

**Лекции по квантовой
статистике с приложениями
к разреженным газам и плазме**

Перевод с английского В. В. Шуликовской



Москва ♦ Ижевск

2019

УДК ???
ББК ???
??

Эбелинг В., Пёшель Т.
?? Лекции по квантовой статистике. — М.–Ижевск : Институт
компьютерных исследований, 2019. — 340 с.
ISBN 978-5-4344-00??-?
Аннотация

**ББК ???
УДК ???**

ISBN 978-5-4344-00??-?

© В. Эбелинг, Т. Пёшель, 2019
© Ижевский институт компьютер-
ных исследований, 2019

Оглавление

Предисловие	9
ГЛАВА 1. Основы физики газов и плазмы	12
1.1. Материя в форме газов и плазмы	12
1.2. Основы физики газов	14
1.2.1. Классические законы газа	14
1.2.2. Третий закон термодинамики и истоки квантовой статистики	16
1.3. Основы физики плазмы	21
1.3.1. Взаимодействия Кулона и равновесие ионизации	21
1.3.2. Различные состояния плазмы на Земле	27
Литература	32
ГЛАВА 2. Элементы квантовой статистической теории	36
2.1. Квантовая теория многих тел	36
2.1.1. Квантовые состояния	36
2.1.2. Тожественность и симметрия	42
2.2. Квантовая динамика многих частиц	47
2.2.1. Уравнение Шрёдингера	47
2.2.2. Чистые и смешанные ансамбли	52
2.3. Стандартные аппроксимации для состояний с многими частицами	55
2.3.1. Аппроксимация Хартри–Фока	55
2.3.2. Аппроксимация Борна–Оппенгеймера, теорема о вириале и кулоновская устойчивость	56
2.3.3. Теория Томаса–Ферми для атомов с многими электронами	58
2.4. Квантовая статистическая теория ансамблей	61
2.4.1. Микроканонические и канонические ансамбли	61
2.4.2. Большие канонические ансамбли	63

2.5. Теория флуктуаций и процессы релаксации	65
2.5.1. Теория релаксации Эйнштейна–Онзагера	65
2.5.2. Корреляции, спектры и соотношения симметрии	71
Литература	75
ГЛАВА 3. Идеальные квантовые газы	78
3.1. Квантовая статистика осциллятора и фононные газы	78
3.1.1. Осцилляции в кристаллах: модель Эйнштейна	78
3.1.2. Теория Дебая о возбуждении фононов в кристаллических решетках	80
3.2. Статистика Бозе–Эйнштейна и газы Ферми–Дирака	82
3.2.1. Развитие квантовой статистики газов	82
3.2.2. Газы как системы частиц с аддитивным гамильтонианом	86
3.3. Распределения Ферми и Бозе	87
3.3.1. Газы Бозе–Эйнштейна	87
3.3.2. Газы Ферми–Дирака	88
3.4. Термодинамические свойства газов Бозе–Эйнштейна	90
3.5. Излучение черного тела и релятивистские газы	96
3.5.1. Закон излучения Планка	96
3.5.2. Излучение как релятивистский газ	101
3.6. Термодинамические функции газов Ферми	102
3.6.1. Идеальный газ Ферми	102
3.6.2. Газы Ферми в пределах высоких и низких температур	103
3.7. Характеристики газа Ферми, зависящие от плотности	106
3.7.1. Разложения в ряд для слабо вырожденных газов Ферми	106
3.7.2. Термодинамика в полном диапазоне плотностей	108
3.8. Теория Хартри–Фока слабо взаимодействующих электронных газов	111
Литература	117
ГЛАВА 4. Операторы плотности и другие инструменты квантовой статистики	121
4.1. Матрицы плотности и операторы плотности	122
4.1.1. Матрицы плотности	122

4.1.2. Операторы плотности фон Неймана и эволюция во времени	125
4.1.3. Принцип максимума энтропии и термодинамические функции	131
4.2. Представления в пространстве координат и двухвременные функции	135
4.2.1. Представления в пространстве координат и уравнения Блоха	135
4.2.2. Двухвременные операторы плотности	139
4.3. Редуцированные операторы плотности Боголюбова	140
4.4. Представления Слейтера, Вигнера и Климонтовича	143
4.4.1. Представления Слейтера	143
4.4.2. Представление Вигнера	145
4.4.3. Микроскопическая плотность Климонтовича	146
4.5. Функционалы плотности, вириальные теоремы и устойчивость	148
4.5.1. Функционалы Кона–Шема и Томаса–Ферми	148
4.5.2. Кулоновская устойчивость и теорема о вириале	150
4.6. Второе квантование	152
4.6.1. Представления числа заполнения	153
4.6.2. Вторичное квантование	157
4.6.3. Оператор Климонтовича во вторичном квантовании	159
4.7. Функция Грина	160
4.7.1. Определение и основные свойства функций Грина	160
4.7.2. Термодинамика и функции Грина	163
4.8. Парные связанные состояния и уравнение Бете–Солпитера	169
Литература	174
ГЛАВА 5. Квантовая статистика реального газа	179
5.1. Кластерные разложения в случае реальных газов	179
5.2. Функция Слейтера и вириальные разложения	185
5.2.1. Разложения в ряд по плотности общего вида	185
5.2.2. Суммы Слейтера для парных корреляций	187
5.3. Второй вириальный коэффициент	189
5.3.1. Вириальный коэффициент, включающий в себя эффекты обмена	189

5.3.2. Метода Бета–Уленбека для неассоциированных газов	192
5.4. Уравнение состояния для газов с глубокими связанными состояниями	193
5.4.1. Разложения по степеням фугитивности	193
5.4.2. Химическая картина	199
5.5. Гелий и другие квантовые газы при низких температурах	202
5.5.1. Вириальное разложение для гелия	202
5.5.2. Фазовые переходы в низкотемпературных газах	203
5.6. Слабо взаимодействующие квантовые газы	206
5.6.1. Уравнение Блоха	206
5.6.2. Функции Слейтера и свободная энергия	209
Литература	211
ГЛАВА 6. Квантовая статистика разреженной плазмы	214
6.1. Основы физики плазмы	214
6.1.1. Экранирование и решетчатые формации в кулоновских системах	214
6.1.2. Расходимость функции распределения	218
6.2. Парные корреляции в невырожденной плазме	226
6.2.1. Матрица плотности для пар	226
6.2.2. Метод эффективных потенциалов	231
6.3. Термодинамика классического электронного газа и квантовые поправки	238
6.3.1. Классические разложения Боголюбова	238
6.3.2. Квантовые поправки	240
6.4. Экранирование и термодинамические функции невырожденной плазмы	242
6.4.1. Экранирование Дебая–Хюккеля	242
6.4.2. Кольцевые функции	243
6.5. Вклад парных связанных состояний	245
6.5.1. Аппроксимация средней массы — симметричная плазма	245
6.5.2. Второй вириальный коэффициент для плазмы общего вида	250
6.6. Оценка вторых вириальных коэффициентов	252
6.6.1. Вклад эффектов обмена в вириальные функции	252

6.6.2. Прямые вклады в вириальные функции	254
Литература	258

ГЛАВА 7. Неидеальность и глубокие связанные состояния в плазме	266
7.1. Разложения в ряд до более высокого порядка плотности	266
7.1.1. Кластерные разложения по плотности	266
7.1.2. Разложения в ряд по плотности для давления и свободной энергии	268
7.2. Связанные состояния и разложения в ряд по фугитивности	272
7.2.1. Кластерные разложения в ряд по фугитивности	272
7.2.2. Ряды по степеням фугитивности	274
7.3. Связанные состояния и уравнение Сахи	275
7.3.1. Разложение в ряд по фугитивности и идеальные законы действия масс	275
7.3.2. Ионизация и уравнение Сахи с учетом экранирования	279
7.4. Другие проблемы, связанные с неидеальностью в плазме	282
Литература	286

ГЛАВА 8. Ситуации неравновесия: кинетические уравнения	293
8.1. Развитие классической и квантовой кинетической теории	293
8.2. Метод основного уравнения Паули и H -теорема	296
8.3. Стохастическая динамика, включающая в себя термостат	304
8.4. Кинетическая теория Боголюбова, основанная на приведенных операторах плотности	308
8.5. Вывод квантового уравнения Больцмана методом Боголюбова	310
8.5.1. Операторные уравнения	310
8.5.2. Квантовое уравнение Больцмана для однородных систем	313
8.6. Теория флуктуаций и соотношения флуктуации–диссипации	314
8.6.1. Базовые соотношения Эйнштейна–Кубо–Онзагера	314

8.6.2. Броуновское движение и соотношения Онзагера–Казимира	318
8.7. Квантовые соотношения флуктуации–диссипации	320
8.7.1. Теорема Найквиста и теоремы Каллена–Вельтона	320
8.7.2. Теория флуктуаций плазмы Климонтовича–Силина	323
Литература	327
Предметный указатель	333

Предисловие

Несмотря на то, что в нашей жизни главную роль играют жидкости и твердые тела, мы знаем, что большая часть вещества в нашей Вселенной находится в состоянии газа или плазмы. На удивление большая доля этого вещества существует при экстремальных условиях. Вот почему интерес к физике газов и плазмы постепенно растет. Мы верим в то, что сейчас мы только приступаем к исследованию мира, лежащего за пределами узких экспериментальных рамок, определенных состоянием нашей планеты. Таким образом, глубинная причина растущего интереса к физике газов и плазмы в том, что именно эти состояния вещества играют доминирующую роль во Вселенной. Предмет наших исследований — фундаментальная физика и, в частности, квантовая статистическая термодинамика состояний вещества, от инертных газов до различных состояний плазмы. Мы твердо убеждены в том, что термодинамика и квантовая статистика по-прежнему остаются тем надежным основанием, на котором можно строить даже самые передовые исследования. Мы продолжаем верить в то, что, несмотря на обилие современных концепций, традиционные концепции термодинамики и статистики, использующие такие термины, как температура, давление, энергия и энтропия, а также теории, созданные Планком, Эйнштейном, Нернстом, Сахой и другими первопроходцами, сохраняют здесь свою фундаментальную роль. В основу данной книги легли лекции, прочитанные в университетах, и презентации на семинарах и конференциях. В частности, эти конспекты лекций опираются на лекции по квантовой статистике и физике плазмы, прочитанные Вернером Эбелингом в Ростокском университете в 1970–79 годах и в Берлинском университете им. Гумбольдта с 1980 по 2001 год, а кроме того — на более краткие курсы так называемых гостевых лекций в Университете Пьера и Марии Кюри (Париж VI) (1977), в университетах Миннеаполиса (1986), Москвы (2005) и Кракова (2008). Основной объем текста — это последний полный двухсеместровый курс квантовой статистики, прочитанный совместно Вернером Эбелингом и Торстенем Пёшецем

в Берлинском университете им. Гумбольдта при участии нескольких бывших коллег, таких как Андреас Фёрстер, Буркхард Милитцер, Лутц Мольгедей и Вальдемар Рихерт, а также некоторых студентов: Йёрна Дункеля, Хендрика Хахе, Стефана Гильберта, Дирка Хольсте, Томаса Поля, Михаэля Шпана и других. В основу текста лег конспект, включающий в себя полный курс лекций, записанный Торстеном Пёшелем, с некоторыми более поздними уточнениями.

С учетом личных интересов авторов и традиций квантовой статистической термодинамики, характерных для Берлина и Ростока, мы уделяем основное внимание фундаментальным вопросам и приложениям к газам и плазме. Это отличает нашу книгу от большинства учебников и монографий по квантовой статистике, отдающих явное предпочтение конденсированным средам и, в частности, системам, находящимся в твердом состоянии. Мы считаем, что ставить во главу угла газы и плазмы означает учитывать тенденции, наметившиеся в современной науке, например, в нескольких крупных международных исследовательских проектах последних лет и на конференциях.

Книга рассчитана на читателя с базовым уровнем подготовки, иначе говоря, основная ее часть должна быть доступна студентам и аспирантам, тогда как некоторые результаты требуют более высокого уровня подготовки и адресованы молодым ученым, работающим в данной области. За дополнительной информацией, в частности о численных методах и об экстремальных состояниях вещества, читатель может обратиться к монографии одного из авторов (В.Э.), написанной в соавторстве с В.Е. Фортовым и В.С. Филиновым и вышедшей недавно в издательстве Springer в серии «Series in Plasma Science and Technology» [1].

Во многих случаях текст содержит исторические справки об истоках квантовой статистики. Мы решили включить в книгу этот исторический материал по двум причинам:

- первая причина связана с так называемым «духом места»: действительно, книга по большей части восходит к лекциям, прочитанным в Берлине, где за период с 1900 по 1932 годы во многом были заложены основы квантовой статистики;
- мы уверены — и эта уверенность основана на долгом опыте чтения лекций — в том, что сведения об истории развития нашей науки служат сильной мотивацией для студентов.

Дух данного учебника формировался под влиянием встреч и дискуссий с несколькими основателями квантовой статистической термодинамики, такими как Алексей Алексеевич Абрикосов, Берни Алдер, Николай Николаевич Боголюбов, Александр Сергеевич Давыдов, Ханс Фалькенхаген, Михаэль Фишер, Виталий Лазаревич Гинзбург, Гюнтер Кельбг, Хью Девитт и особенно Юрий Львович Климонтович. Кроме того, мы хотели бы поблагодарить наших берлинских коллег, в частности Дитмара Эберта, Вольфганга Мушика и Лутца Шимански-Гайера, и наших коллег из Ростока, в частности Клауса Килиманна, Вольфа-Дитриха Крефта, Дитриха Кремпа¹ и Герда Рёпке, а также Петера Хенгги из Аусбурга за сотрудничество, советы и обсуждение текста.

Берлин, Германия
Эрланген, Германия
Лето 2018 года

Вернер Эбелинг
Торстен Пёшель

Литература

- [1] Ebeling W., Fortov V. E. and Filinov V. S. 2017. *Quantum Statistics of Dense Gases and Nonideal Plasmas. Springer Series in Plasma Science and Technology*. Cham: Springer.

¹Дитрих Кремпа скончался в 2017 году.

- [64] Planck M. (1911). «Eine neue Strahlungshypothese». In: *Verh. Dt. Phys. Ges.* 13, pp. 138–148.
- [65] Planck M. (1917). «Über einen Satz der statistischen Dynamik und seine Erweiterung in der Quantentheorie». In: *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin* 24, pp. 324–341.
- [66] Pöschel T. and Luding S., eds. (2001). *Granular Gases*. Berlin: Springer.
- [67] Redmer R. (1997). «Physical properties of dense, low-temperature plasmas». In: *Phys. Rep.* 282, pp. 35–157.
- [68] Redmer R. and Röpke G. (2010). «Progress in the theory of dense strongly coupled plasmas». In: *Contr. Plasma Phys.* 50, pp. 970–985.
- [69] Силин В.П., Рухадзе А.А. (1961). Электромагнитные свойства плазмы и плазмоподобных сред. М.: Атомиздат, 1961.
- [70] Sitenko O. G. (1982). *Fluctuations and nonlinear wave interactions in plasmas*. Oxford: Pergamon Press.
- [71] Spitzer L. (1962). *Physics of Fully Ionized Plasmas*. New York: Wiley.
- [72] Taylor G. I. (1922). «Diffusion by continuous movements». In: *Proc. Lond. Math. Soc. Ser. 2* 20, pp. 196–212.
- [73] Ternovoi V. Ya., Filimonov A. S., Fortov V. E., Kvitov S. V., Nikolaev D. D., and Pyalling A. A. (1999). «Thermodynamic properties and electrical conductivity of hydrogen under multiple shock compression to 150 GPa». In: *Physica B* 265, pp. 6–11.
- [74] Tolman R. (1938). *The Principles of Statistical Physics*. Oxford: Oxford University Press.
- [75] Vlasov A. A. (1945). «On the kinetic theory of an assembly of particles with collective interaction». In: *Russ. Phys. J.* 9, pp. 25–40.
- [76] Власов А. А. (1950). *Теория многих частиц*. М.–Л.: ГИТТЛ. 348 с.
- [77] Weir S. T., Mitchell A. C., and Nellis W. J. (1996). «Metallization of fluid molecular Hydrogen at 140 GPa (1,4 Mbar)». In: *Phys. Rev. Lett.* 76, pp. 1860–1863.
- [78] Замалин В. М., Норман Г. Э., Филинов В. С. (1977). *Метод Монте-Карло в статистической термодинамике*. М.: Наука. 228 с.
- [79] Zubarev D. N., Morozov V., and Röpke G., eds. (1996). *Statistical Mechanics of Nonequilibrium Processes*. Vol. 1. Basic Concepts, Kinetic Theory. Weinheim: Wiley-VCH.
- [80] Zubarev D. N., Morozov V., and Röpke G., eds. (1997). *Statistical Mechanics of Nonequilibrium Processes*. Vol. 2. Relaxation and Hydrodynamic Processes. Weinheim: Wiley-VCH.

Предметный указатель

- H*-устойчивость, 60, 150
- Г-пространство, *см.* пространство фазовое
- λ -кривая, 204
- λ -переход, 94
- ζ -функция, *см.* дзета-функция
- DFT, *см.* теория функционала плотности
- ОСР, *см.* плазма однокомпонентная
- РМС, *см.* интеграл по траектории Монте-Карло
- QDNA, *см.* аппроксимация Дебая–Хюккеля квантовая
- RPA, *см.* приближение случайных фаз
- Аксиомы квантовой статистики, 128
- Акцепторы, 28
- Ансамбль
- канонический, 52, 61
- — большой, 62
- микроканонический, 61
- смешанный, 51, 53
- чистый, 51, 53
- чистый и смешанный, 51
- Аппроксимация
- Борна–Опшенгеймера, 49, 55, 150
- Дебая–Хюккеля квантовая, 244
- Карнахана–Старлинга, 194
- Лоренца, 306
- Хартри–Фока, 54, 111
- бинарного соударения, 310
- среднего поля, 55
- средней массы (ММА), 245
- Астрофизика, 22
- Атмосферы звезды, 25
- Бозон, частица Бозе, 44, 51
- Вероятности перехода, Паули, 300
- Вероятность микросостояний равная, 61
- Вещество Ридберга, 30
- Взаимодействие кулоновское, 20
- расходимость, 214
- регуляризация, 22
- Вибрации кристаллической решетки, 78
- Водород
- термометр, 13
- уровни энергетические, 23
- энергия ионизации, 27
- Волна тепловая относительная, 229

- Вырожденность, 81
 Вычисление методом Монте-Карло, 284
- Газ
 — Бозе–Эйнштейна, 81, 87
 — Ферми, 57, 102
 — — вырожденный, 105
 — — предел при низких температурах, 104
 — — предел разреженный, 103
 — Ферми–Дирака, 81, 88
 — гранулированный, 15, 30
 — идеальный, 14
 — квантовый Юкавы, 206
 — квантовый идеальный, 78–117
 — — газ Бозе–Эйнштейна, 89
 — — газ Ферми, 102
 — кулоновский однокомпонентный, 238
- Газы реальные, 179–211
- Гелий при низкой температуре, 201
- Давление
 — осмотическое, 214
 — парциальное, 14
 — электронов, 25
- Движение броуновское, 16, 317
- Дзета-функция, 91
- Динамика
 — молекулярная, 284
 — свойств симметрии, 50
- Длина
 — волны де Бройля, 27, 84
 — тепловой волны
 — — де Бройля, 84
 — — относительная, 229
- Доноры, 28
- Задача
 — о связанных состояниях Герцфельда, 214
 — обращения, 110, 115
- Закон
 — Авогадро, 14
 — Бойля–Мариотта, 13
 — Вина, 96, 99
 — Гей-Люссака, 14
 — Дальтона, 14
 — Дебая, 325
 — Дюлонга–Пти, 79
 — Кирхгофа, 96
 — Ньютона, 48
 — Рэля–Джинса, 99
 — Стефана–Больцмана, 96, 100
 — Эренфеста, 48
 — действия масс, 200, 276
 — излучения
 — — Планка, 19, 96
 — — квантовый, 15
 — термодинамики третий, 16
- Зарядка Дебая, 165
- Затухание Ландау, 294
- Иерархия
 — ВВГКУ, 308
 — Боголюбова, 142, 162, 309
- Излучение черного тела, 96
- Изменение адиабатическое, 13
- Интеграл
 — конфигураций, 144
 — по траектории Монте-Карло (РМС), 237
- Информация, энтропия Кульбака, 298

- Ионизация, 24
 — атомов, 24
 — множественная, 24
 — равновесие, 20
 — энергия ионизации, 27
- Квантование второе, 151, 156, 157
- Кет-вектор, 36
- Конденсация
 — Бозе–Эйнштейна, 82, 89, 92
 — Эйнштейна, 89
- Корреляции парные, 187
- Коэффициент
 — вириальный, 185
 — — второй, 188
 — кинетический Онзагера, 68, 316
 — релаксации, 68, 316
- Кристалл Вигнера, 240
- Ловушка магнитно-оптическая, 30
- Матрица плотности, 122
 — двухвременная, 139
- Матрицы Паули, 40
- Метод
 — Бета–Уленбека, 192, 252
 — коллективных переменных, 240
 — самосогласованных полей, 55
- Модель
 — Бора, 23
 — — расходимость функции распределения, 218
 — Дебая, 80
 — Кулона–Майера, 22
 — атома Резерфорда, 23
- Момент магнитный, 38
- Независимость микросостояний, 61
- Неравенство Гёльдера, 148, 149
- Неравновесие, 293
- Неразличимость, 82
- Обозначения
 — Дирака, 36, 134
 — условные Эйнштейна, 69
 — фон Неймана, 134
- Оператор
 — Гамильтона, 38
 — Климонтовича, 158, 159
 — перестановки, 42
 — плотности, 53, 121, 122
 — — двухвременной, 139
 — — одновременной, 139
 — — постулаты, 124
 — — представления в пространстве координат, 134
 — — приведенный, 140
 — — приведенный Боголюбова, 140
 — рождения, 156
 — симметричный, 44
 — статистический, 124
 — уничтожения, 156
 — эрмитов, 38
- Осцилляторы квантовые, 78
- Парадокс Гиббса, 41
- Параметр Боголюбова, 238
- Плазма, 22, 214, 266
 — благородных газов, 28
 — в твердом веществе, 25
 — вклад связанных состояний, 222
 — волны, 294
 — вырожденная, невырожденная, 27
 — высокой плотности, 216

- о вириале для кулоновских систем, 56
- флуктуации–диссипации, 69, 314, 316
 - для плазмы, 326
 - квантовая, 321
- Теоремы Каллена–Вельтона, 319
- Теория
 - Кельбга, 284
 - Томаса–Ферми, 148
 - Ферми, 57
 - газа кинетическая, 14
 - релаксации Эйнштейна–Онзагера, 64
 - флуктуаций плазмы Климонтовича–Силина, 322
 - функционала плотности, 148
 - экранирования
 - Боголюбова, 215
 - Дебая–Хюккеля, 214, 241
- Теплоемкость удельная при низких температурах, 16
- Термодинамика необратимая линейная, 68
- Тождественность, 41, 82
 - механическая квантовая, 41
- Тождество
 - Дирака, 302
 - Сохоцкого–Племеля, 302
- Уравнение
 - Бете–Солпитера, 169
 - Блоха, 136, 207, 230
 - Больцмана, 293, 294
 - квантовое, 309, 312
 - квантовое статистическое, 313
 - Власова, 294
- Гамильтона–Якоби, 48
- Гельмгольца, 62
- Инглиса–Теллера, 281
- Климонтовича, 145
- Лиувилля, 52, 128
- Паули, 295, 296
- Сакура–Тетроде, 20
- Сахи, 24
 - неидеальное, 280
- Хартри, 55
- Шрёдингера, 47
- Эггерта–Сахи, 24
- состояния для неассоциированных газов, 192
- фон Неймана, 126, 127, 300
- Уравнения
 - Гамильтона, 37
 - кинетические, 293
- Условие Боголюбова, 310
- Установки энергетические ядерные, 27
- Фермионы, частицы Ферми, 44, 51, 84
- Флуктации, 64
- Фононы, 80
 - возбуждения, 80
 - газы, 78
- Формализм диэлектрический, 322
- Формула
 - Бета–Уленбека, 166, 189
 - Стирлинга, 186
- Фугитивность, 90, 108, 180
- Функции
 - Грина, 159
 - двухчастичные, 165
 - Йоста, 191
 - Слейтера, 143, 186

- базиса ортонормированные, 37
- кольцевые, 243
- корреляции, 71
- распределения приведенные, 308
- собственные энергии, 52
- термодинамические, 131
- Функционал
 - Кона–Шема, 148
 - Томаса–Ферми, 60, 148, 149
- Функция
 - $erfc$, 210
 - $erfe$, 210
 - Бозе–Эйнштейна $g_{3/2}$, 91
 - Грина
 - запаздывающая, 159
 - опережающая, 159
 - Дебая, 81
 - Куммера, 208, 243
 - Ферми, 107
 - гипергеометрическая вырожденная стандартная, см. функция Куммера
 - ошибок, 210, 230
 - распределения Планка–Бриллюэна–Ларкина, 221
- Число квантовое, 23
 - главное, 23
- Шум Джонсона–Найквиста, 319
- Экранирование, 241
 - Дебая, 191
- Экситоны, 96
- Эксперимент Штерна–Герлаха, 38
- Энергия
 - ионизации полупроводников, таблица, 28
 - свободная, 62
- Энтропия, 61, 298
 - Кульбака, поведение во времени, 299
 - Шеннона, 298
 - информация Кульбака, H -теорема, 298
 - относительная, 298
- Эффект
 - Мотта, 171, 281
 - Штарка, 281
 - Эйнштейна–де Хааза, 39

Эбелинг Вернер, Пёшель Торстен

ЛЕКЦИИ ПО КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКЕ
С ПРИЛОЖЕНИЯМИ К РАЗРЕЖЕННЫМ ГАЗАМ
И ПЛАЗМАМ

Дизайнер ? . ? . ?

Технический редактор ? . ? . ?

Компьютерный набор и верстка С. В. Высоцкий

Корректор ? . ? . ?

Подписано в печать ???.???.2019. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.

Печать офсетная. Усл. печ. л. ????. Уч.-изд. л. ?????.

Гарнитура ????. Бумага офсетная № 1. Тираж ????? экз. Заказ № 17-??.

АНО «Ижевский институт компьютерных исследований»

426057, г. Ижевск, ул. К. Маркса, д. 250, кв. 55

E-mail: mail@icd.ru Тел./факс: +7 (3412) 50-02-95
