



Изв.вузов «ПНД», т.7, № 5, 1999

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ

Том I

Ю.Л. Климонтович

Дается систематическое изложение идей, методов и результатов современной статистической теории открытых систем – систем, которые обмениваются с окружающими телами веществом, энергией и информацией. Благодаря этому в них, наряду с процессами деградации, происходят и процессы самоорганизации, в результате которых возникают более сложные и более совершенные структуры. Рассматриваются статистические критерии самоорганизации, в частности, критерий «S-теорема». Он основан на сопоставлении знаний энтропии, перенормированных к определенному уровню средней эффективной энергии. Анализ относительной степени упорядоченности состояний открытых систем проводится непосредственно по экспериментальным данным. Критерий дает проверку правильности выбора параметров, управляющих процессами эволюции. Показана возможность единого описания кинетических, гидродинамических и диффузионных процессов в пассивных и активных макроскопических системах без привлечения традиционной теории возмущений. На этой основе через градиент энтропии вводится общее определение теплового потока. Проведен последовательный расчет кинетических и гидродинамических флуктуаций. Этот подход широко используется и при построении теории классического и аномального броуновского движения в нелинейных средах. Развита теория открывает также возможность новой трактовки явления турбулентности и единого кинетического описания ламинарного и турбулентного движения. Предложенные методы используются также для статистического описания квантовых макроскопических открытых систем. Это позволяет дать ответы на «вечные вопросы»: Является ли квантовомеханическое описание полным? Существуют ли в квантовой теории скрытые параметры?

Книга не имеет аналогов в мировой литературе. Она представляет собой монографическое учебное пособие и написана в значительной мере на основе оригинальных работ автора.

© Ю.Л. Климонтович, 1995
М.: ТОО «Янус», 1995. 624 с.
ISBN 5-88929-001-0

Предисловие к русскому изданию

В течение многих лет существовала практика, когда переводы на английский язык публиковались позднее, чем на русском. Это давало возможность вносить в английское издание определенные улучшения и дополнения. Ситуация в настоящее время изменилась и издание книги на английском языке опережает издание ее на Родине автора.

Такова судьба и этой книги. Однако, как говорится, «Нест худа без добра». Англичане выражают это более поэтично: «Each dark cloud has a silver board». Действительно, благодаря некоторой задержке удалось еще раз просмотреть текст

и внести в него некоторые коррективы и дополнения. Благодаря этому книга на русском языке лучше ее английского «двойника».

Все сказанное в Предисловии к английскому изданию остается неизменным. Отметим лишь, что основные улучшения текста сделаны в последних двух главах, посвященных теории турбулентного движения и квантовым открытым системам. К последней главе написано также дополнение о дополнительном уравнении для квантовой функции распределения – функции Вигнера.

Предисловие к английскому изданию

Начнем с выдержки из Предисловия к книге автора «Статистическая физика» [М: Наука, 1982; Harwood Academic Publishers, 1986]:

«Боже, еще одна книга по статистической физике! Ведь и так на полках нет свободного места! – Подобные восклицания вполне возможны. Однако прежде чем делать какие-либо заключения, надо прочитать хотя бы Введение к книге и просмотреть Оглавление. При этом читатель сразу убедится, что предлагаемое учебное пособие «Статистическая физика» существенным образом отличается от аналогичных руководств по этому предмету, как кратких, так и фундаментальных.

...в ней нет традиционного деления на статистическую теорию равновесного и неравновесного состояний. Напротив, теория неравновесного состояния служит основой – стержнем всего курса.

...подобное построение курса позволяет на основе единого метода развить статистическую теорию очень широкого класса систем.

...автор, разумеется, не склонен преувеличивать достоинства книги и рассматривает ее лишь как первую попытку создания учебного пособия подобного рода».

Следующим шагом в выполнении этой программы была книга автора «Турбулентное Движение и Структура Хаоса» [М: Наука, 1990, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991]. Название книги имеет подзаголовок: «Новый подход к статистической теории открытых систем». Естественно, что «новый подход» не служит отрицанием хорошо развитых и эффективных методов традиционной статистической теории, но лишь необходимым их дополнением и развитием.

Изложенный в этой книге материал многократно обсуждался на семинарах и конференциях. Он служил также основой курсов лекций в Московском университете и в университетах Германии. Установленная таким образом «обратная связь» была, несомненно, положительной. Это, разумеется, не означает, что не было оппонентов. Среди них, однако, не было таких, которые могли придать своим возражениям конструктивную форму. В результате стало ясно, что необходимо изложить основные идеи, методы и результаты статистической теории открытых систем в виде учебного пособия, которое будет полезно не только физикам, но, во всяком случае в своей основе, и всем специалистам, для которых статистическая физика открытых систем служит фундаментом для проводимых ими исследований.

Коротко о названии настоящей книги.

В нем отмечено, что речь пойдет об открытых системах. Напомним что в отличие от идеализированных замкнутых (изолированных) систем, открытые системы обмениваются с окружающими телами веществом, энергией и, что не менее важно, информацией. Благодаря этому в открытых системах временная эволюция не обязательно ведет к равновесному, т.е. наиболее хаотическому состоянию. Напротив, в открытых системах, наряду с такого рода процессами деградации, возможны и процессы самоорганизации, в результате которых возникают более совершенные и более сложные структуры.

Все рассматриваемые открытые системы являются макроскопическими, т.е. состоят из очень большого числа элементов – «частиц». В физике и химии ими могут служить атомы и молекулы; в биологии это, например, макромолекулы,

клетки и микроорганизмы; в социологии группы живых организмов, а в астрономии планеты и звезды.

Спектр макроскопических открытых систем, как мы видим, чрезвычайно широк. Сложность описания таких систем обусловлена не только тем, что они состоят из большого числа элементарных объектов. В значительной мере она обусловлена также и динамической неустойчивостью движения отдельных частиц, т.е. сложностью динамического движения. Это означает, что при малых изменениях начальных условий траектории сильно расходятся – «разбегаются».

В такой ситуации малые внешние воздействия приводят к неконтролируемым – непредсказуемым – изменениям движения частиц. По этой причине применение статистического описания становится неизбежным.

Наличие большого числа элементов–частиц позволяет при описании многих явлений заменять рассматриваемую систему частиц сплошной (непрерывной) средой. Такая «подмена» качественно меняет характер системы. Чтобы избежать возникающих при этом принципиальных трудностей, необходимо использовать не формально математическое, а физическое определение сплошной среды. Это означает, что необходимо конкретное, т.е. через характерные параметры системы, определение физически бесконечно малых масштабов времени и длины. Соответствующий физически бесконечно малый объем и служит физическим определением понятия «точка». Это определение зависит, естественно, от принятого уровня описания. Тем самым в статистическую теорию вводится структура «сплошной среды».

Мы увидим, что число частиц в «точке» сплошной среды может быть весьма большим. Так, например, в разреженном газе – газе Больцмана при нормальных условиях это число порядка 10^5 . Благодаря этому эффективным оказывается сглаживание по состояниям частиц в «точке». При этом выбором функции сглаживания можно отразить в статистической теории сложность движения отдельных элементов среды.

На основе физического определения сплошной среды можно дать определение ансамбля Гиббса для неравновесных процессов. Именно неполнота задания микросостояний отдельных систем ансамбля обусловлена отсутствием информации о движении частиц в «точках» сплошной среды. Если движение отдельных элементов–частиц системы описывается обратимыми уравнениями движения – уравнениями Гамильтона, то переход к приближению сплошной среды ведет с неизбежностью к необратимым уравнениям, так как информация о движении частиц в «точках» теряется безвозвратно. Существенно, что при таком переходе неустойчивость динамического движения, т.е. его сложность, играет конструктивную роль при построении статистической теории открытых систем.

Учет структуры «сплошной среды» на всех уровнях описания и является важным элементом нового подхода к статистической теории открытых систем, о котором говорилось выше. Такой подход, как мы увидим, приводит к обобщенным кинетическим уравнениям, на основе которых возможно единое описание кинетических, гидродинамических и диффузионных процессов без использования теории возмущений. Он открывает также возможность новой трактовки явления турбулентности и единого кинетического описания ламинарного и турбулентного движения.

Все сказанное относится в равной мере как к классическим, так и квантовым системам. Понятие «сплошная среда» и вопрос о ее структуре возникают с неизбежностью при переходе от идеализированных обратимых уравнений квантовой механики всей системы к приближенным и необратимым, но реалистическим уравнениям квантовой статистической теории. Использование статистической теории открытых систем для описания квантовых явлений позволяет дать ответы на «вечные вопросы»: Является ли квантовомеханическое описание полным? Существуют ли в квантовой теории скрытые параметры?

Отметим еще раз, что новый подход не отрицает, а лишь дополняет и развивает традиционный способ описания неравновесных процессов. Достаточно полное описание может быть проведено лишь при разумном сочетании «старого» и «нового».

При написании книги весьма сложной оказалась проблема отбора материала. В результате книга была разделена на две части. Первый том посвящен изложению основных идей, методов и результатов на примерах сравнительно «простых» систем. При этом мы постарались избежать «излишних» математических деталей, но делать это без ущерба для понимания основного материала. Для заполнения соответствующих пробелов указываются источники, по которым можно восстановить недостающие детали.

Я благодарен моим учителям, коллегам и друзьям, с которыми мне посчастливилось обсуждать многие проблемы, затронутые в книге. Сожалею, что нет возможности их всех здесь перечислить.

Оглавление

Предисловие.

Глава 1. Введение. 1.1. Структура «сплошной среды». Ансамбль Гиббса для неравновесных состояний. 1.1. Ансамбль Гиббса. Равновесное состояние. 1.1.2. Ансамбль Гиббса. Усреднение по распределению начальных данных. 1.1.3. Физически бесконечно малые масштабы в кинетической теории. 1.1.4. Физически бесконечно малые масштабы. Гидродинамическое описание. 1.2. Переход от кинетического описания к газодинамическому. 1.3. Единое описание кинетических и гидродинамических процессов. 1.3.1. Физическое число Кнудсена. 1.3.2. Согласование кинетического и гидродинамического определений сплошной среды. 1.3.3. Мелкомасштабные и крупномасштабные флуктуации. 1.3.4. Уравнение для единого описания кинетических и гидродинамических процессов. 1.4. Кинетическое описание автоволновых процессов в активных средах. Базовое уравнение теории самоорганизации синергетики. 1.5. Динамическое и статистическое описание сложных движений в макроскопических открытых системах. Конструктивная роль динамической неустойчивости движения. 1.6. Критерии самоорганизации. 1.6.1. Физический хаос в открытых системах. Управляющие параметры. 1.6.2. Эволюция и самоорганизация. 1.6.3. Процессы деградации. Н-теорема Больцмана. 1.6.4. Теорема Гиббса. 1.6.5. Примеры Н-теоремы для открытых систем. 1.6.6. Уменьшение энтропии при самоорганизации. S-теорема. 1.6.7. Определение относительной степени упорядоченности по критерию S-теоремы на основе экспериментальных данных. 1.7. Энтропия и производство энтропии при ламинарном и турбулентном течениях. 1.8. Принцип минимума производства энтропии в процессах самоорганизации.

Глава 2. Динамическое и статистическое описание процессов в макроскопических системах. 2.1. Динамическое описание эволюции макроскопической системы. 2.2. Теорема Лиувилля. Уравнение Лиувилля. 2.3. Локальное динамическое распределение состояний в $6N$ -мерном фазовом пространстве. 2.4. Уравнение для микроскопической фазовой плотности. Микроскопические уравнения переноса. 2.5. Ансамбль одинаковых макроскопических систем – ансамбль Гиббса.

Глава 3. Статистическая теория равновесного состояния. 3.1. Микроканоническое распределение Гиббса. 3.2. Система в термостате. Каноническое распределение Гиббса. 3.3. Первый закон, первое начало термодинамики. 3.4. Второй закон термодинамики для квазистатических процессов. 3.5. Энтропия – мера неопределенности состояний системы при статистическом описании. 3.6. Теорема Гиббса. 3.7. Изменение энтропии в процессе временной эволюции. 3.8. Принцип максимума энтропии. Вывод канонического распределения Гиббса. 3.9. Принцип неразличимости частиц в статистической теории. 3.10. Зависимость термодинамических функций от числа частиц. 3.11. Термодинамические функции идеального газа. 3.12. Энтропия идеального газа. Парадокс Гиббса.

Глава 4. Распределение функций динамических переменных. Флуктуации внутренних параметров. 4.1. Функции распределения динамических переменных. 4.2. Функция распределения значений внутренней энергии. 4.3. Среднее и наиболее вероятное значения энергии. 4.4. Функция распределения значений энтропии. 4.5. Распределения локальных функций динамических переменных. 4.6. Средняя плотность в пространстве импульсов – распределение Максвелла. 4.7. Распределение Больцмана. 4.8. Формулы Гиббса. 4.9. Флуктуации объема и давления. 4.10. Принцип Больцмана. 4.11. Распределение Гаусса для флуктуаций значений внутренних параметров. 4.12. Флуктуации числа частиц. Распределение Пуассона. 4.13. Обобщение теоремы Гиббса на распределения значения функции динамических переменных. 4.14. Эффективная функция Гамильтона в статистической теории равновесного состояния.

Глава 5. Методы функций распределения и метод микроскопической фазовой плотности. 5.1. Последовательность функций распределения. 5.2. Связь гидродинамических и термодинамических функций с одно-двухчастичной функциями распределения. 5.3. Цепочка уравнений для последовательности равновесных функций распределения. 5.4. Уравнения для последовательности неравновесных функций распределения. 5.5. Корреляционные функции. 5.6. Метод микроскопической фазовой плотности.

Глава 6. Кинетическое уравнение Больцмана. 6.1. Разреженный газ. Кинетическое уравнение Больцмана. 6.2. Свойства интеграла столкновений Больцмана. 6.3. Равновесное решение уравнения Больцмана. 6.4. Возрастание энтропии в процессе временной эволюции к равновесному состоянию. H–теорема Больцмана. Функционал Ляпунова. 6.5. Время и длина релаксации в газе Больцмана. 6.6. Приближения свободномолекулярного течения и газовой динамики. 6.7. Итоги главы. Нерешенные проблемы.

Глава 7. От уравнений Боголюбова – Борна – Грина – Кирквуда – Ивона к кинетическому уравнению для газа Больцмана. 7.1. Уравнения ББГКИ в приближении парных столкновений. 7.2. Выделение диссипативного вклада взаимодействия частиц. 7.3. Переход к уравнению Больцмана. 7.4. Итоги главы. Нерешенные проблемы. Гипотеза Больцмана о молекулярном хаосе.

Глава 8. Кинетическая теория неидеального газа. 8.1. Равновесное состояние. Теория возмущений по параметру плотности. 8.2. Термодинамические функции неидеального разреженного газа. 8.3. Энтропия и свободная энергия неидеального газа. 8.4. Высшие приближения по параметру плотности в кинетической теории. 8.5. Кинетические уравнения для неидеального разреженного газа.

Глава 9. Кинетическая теория флуктуаций. 9.1. Кинетическое уравнение Леонтовича. 9.2. Равновесное решение уравнения Леонтовича. 9.3. H–теорема. Функционал Ляпунова. 9.4. Сравнение значений энтропии Больцмана и Леонтовича. Влияние корреляции на степень упорядоченности состояний газа. 9.5. Цепочка диссипативных уравнений для последовательности функций распределения. 9.6. Приближение теории возмущений по взаимодействию. Приближение вторых корреляционных функций в теории ББГКИ. 9.7. Уравнение Леонтовича. Приближение вторых корреляционных функций.

Глава 10. Кинетическая теория флуктуаций. Метод Ланжевена. 10.1. Диссипативные уравнения для сглаженной микроскопической фазовой плотности. 10.2. Последовательность уравнений для моментов сглаженной микроскопической фазовой плотности. 10.3. Уравнения для флуктуаций функции распределения. 10.4. Метод Ланжевена в кинетической теории флуктуаций. 10.5. Энтропия и производство энтропии для неравновесных состояний с учетом флуктуаций. 10.5.1. Обобщенное уравнение баланса энтропии. 10.5.2. Энтропия и производство энтропии для неравновесных состояний без учета кинетических флуктуаций. 10.5.3. Энтропия и производство энтропии с учетом кинетических флуктуаций. 10.5.4. Производство энтропии и интенсивность источника Ланжевена. 10.5.5. Эффективный источник флуктуаций. 10.5.6. Критерии «малости отклонения от равновесного состояния».

Глава 11. Переход от кинетического уравнения Больцмана к уравнениям газовой динамики. 11.1. Газодинамические функции. Уравнения переноса. 11.2. Нулевое приближение по числу Кнудсена. Локальное распределение Максвелла. 11.3. Первое приближение по числу Кнудсена. Уравнения газовой динамики с учетом вязкости и теплопроводности. 11.4. Уравнение баланса энтропии в газовой динамике. 11.5. Уравнения газовой динамики для неидеального газа. 11.6. Уравнения газовой динамики в приближении тройных столкновений.

Глава 12. Термодинамика неравновесных необратимых процессов. 12.1. Термодинамический метод в теории неравновесных процессов. 12.2. Уравнения гидродинамики простых жидкостей. 12.3. Принцип Больцмана и эффективная функция Гамильтона. 12.4. Два определения свободной энергии неравновесных состояний. Функционал Ляпунова. 12.5. Функция распределения значений скорости при наличии источника тепла. 12.6. Распределение значений кинетической энергии – мгновенной температуры. 12.7. Оценка относительной степени неравновесности состояний по функционалу Ляпунова Λ_S . Иллюстрация применения S–теоремы. 12.8. «Физический хаос». Общая формулировка S–теоремы. 12.9. Критерий самоорганизации по временным спектрам. 12.10. Заключительные замечания.

Глава 13. Единое описание кинетических и гидродинамических процессов. 13.1. Необходимость единого описания кинетических и гидродинамических процессов. 13.2. Физическое определение сплошной среды. 13.2.1. Физически бесконечно малые масштабы в кинетической теории. 13.2.2. Физически бесконечно малые масштабы при газодинамическом описании. 13.2.3. Сопряжение кинетического и газодинамического определений физически бесконечно малых масштабов. 13.2.4. Сглаживание по физически бесконечно малому объему. Физический параметр Кнудсена. 13.3. Обобщенное уравнение для единого описания кинетических и газодинамических процессов. 13.4. H–теорема для обобщенного кинетического уравнения. Поток энтропии и производство энтропии. Функционалы Ляпунова. 13.4.1. H–теорема. 13.4.2. Состояние локального равновесия. 13.4.3. Функционал Ляпунова Λ_S для замкнутой системы. 13.4.4. Незамкнутая система. Функционал Ляпунова Λ_F . 13.5. Определение теплового потока при произвольных числах Кнудсена. 13.6. Тепловой поток во внешнем поле.

Глава 14. Переход от обобщенного кинетического уравнения к уравнениям газовой динамики. 14.1. Уравнения газовой динамики с учетом самодиффузии. 14.2. Диффузионная стадия релаксации к

равновесному состоянию. 14.3. Волновые возбуждения в газовой динамике. 14.4. Уравнение Навье – Стокса для «несжимаемого» газа. 14.5. Уравнение баланса энтропии для «несжимаемого» газа. 14.6. Тепловая конвекция в разреженном газе. 14.6.1. Обобщенное кинетическое уравнение для описания тепловой конвекции. 14.6.2. Газодинамические уравнения для конвективного движения. 14.7. Условие неустойчивости конвективного движения. 14.8. Кинетическое и газодинамическое описания теплопереноса.

Глава 15. Нелинейное броуновское движение. 15.1. Два способа описания броуновского движения. 15.1.1. Уравнения Ланжевена. 15.1.2. Уравнение Фоккера – Планка. 15.2. Броуновское движение в среде с нелинейным трением. Три формы уравнений Ланжевена и Фоккера – Планка. 15.3. Уравнение Фоккера – Планка для газа Больцмана. 15.4. Уравнение Смолуховского. Управляющее уравнение (Master Equation). 15.5. Два способа перехода от управляющего уравнения к уравнению Фоккера – Планка. 15.6. Управляющее уравнение для системы атомов в электромагнитном поле. 15.7. Броуновское движение квантовых атомов–осцилляторов. 15.7.1. Управляющее уравнение. 15.7.2. Уравнение Фоккера – Планка. 15.8. Управляющие уравнения для одношаговых процессов. 15.8.1. Традиционное определение вероятностей перехода. 15.8.2. Нетрадиционное определение вероятностей перехода. 15.9. Пространственная диффузия. Уравнение Эйнштейна – Смолуховского. 15.9.1. Пространственная диффузия. Метод Ланжевена. 15.9.2. Диффузия броуновской частицы во внешнем поле. 15.9.3. Стационарные распределения в «линейном» и «нелинейном» термостате. 15.10. Гидродинамическое описание броуновского движения. 15.11. Эволюция свободной энергии и энтропии при броуновском движении. Функционалы Ляпунова A_L , A_S . 15.11.1. Управляющее уравнение. H–теорема. 15.11.2. Уравнение Фоккера – Планка. H–теорема. 15.11.3. Уравнение Эйнштейна – Смолуховского. H–теорема.

Глава 16. Нелинейное броуновское движение. Примеры. 16.1. Броуновское движение в автоколебательных системах. Генератор Ван дер Поля. 16.2. Генератор Ван дер Поля. Симметризованная нелинейность. 16.3. Совместное действие естественного и внешнего шума. 16.4. Симметризованный генератор. Распределение значений координаты и скорости. 16.5. H–теорема для генератора Ван дер Поля. 16.6. Самоорганизация в генераторе Ван дер Поля. S–теорема. 16.7. Генератор с инерционной нелинейностью. 16.8. Ветвления значений энергии предельного цикла. Генераторы с мультистабильными стационарными состояниями. 16.9. Генераторы в дискретном времени. Бифуркации энергии предельного цикла и периода колебаний. 16.10. Критерий устойчивости при переходе к дискретному времени на основе H–теоремы. 16.11. Броуновское движение в химически реагирующих системах. Частично ионизованная плазма. 16.12. Процесс Мальтуса – Ферхюльста (Malthus – Verhust).

Глава 17. Нелинейное броуновское движение. Единое описание кинетических и гидродинамических и диффузионных процессов. 17.1. Обобщенное кинетическое уравнение в теории броуновского движения. 17.2. Диффузионное описание броуновского движения. 17.3. Две модели гармонических осцилляторов. 17.3.1. Броуновское движение в плазменном колебательном контуре. 17.3.2. Броуновское движение в диэлектрическом колебательном контуре. 17.4. Броуновское движение атомов–осцилляторов. 17.5. Броуновское движение в генераторе с нелинейной частотой. Система Ван дер Поля – Дuffинга (Van der Pol – Duffing). 17.6. Время перехода через барьер. 17.7. Взаимное влияние равновесных и неравновесных фазовых переходов. 17.7.1. Влияние фазового перехода на сегнетоэлектрике на процесс генерации лазерного излучения. 17.7.2. Влияние фазового перехода в жидком кристалле на характеристики лазерного излучения. 17.8. Эволюция к стационарному состоянию в системах с двумя управляющими параметрами. H–теорема. 17.9. Оптимизация процесса эволюции в пространстве управляющих параметров на основе критерия «S–теорема».

Глава 18. Кинетическая теория активных сред. 18.1. Кинетические уравнения реакционно–диффузионного типа. Кинетическое и гидродинамическое описание теплопереноса в активной среде. 18.2. Проявление структуры «сплошной среды» в процессах временной релаксации. 18.3. Среда из бистабильных элементов. Кинетический подход в теории фазовых переходов. 18.3.1. Кинетическое уравнение. 18.3.2. «Гидродинамическое приближение» в статистической теории открытых сред. 18.4. Функционалы Ляпунова A_L , A_S . H–теорема. 18.5. Пример обобщенного уравнения Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова. 18.6. Температура – управляющий параметр при фазовых переходах. 18.6.1. Теория Ландау. Кинетический подход. 18.6.2. Относительная степень упорядоченности при фазовых переходах. S–теорема. 18.7. Среда из связанных генераторов. 18.8. Кинетическое описание сред с химическими реакциями.

Глава 19. Кинетическая теория флуктуаций в активных средах. 19.1. Единое описание кинетических и гидродинамических флуктуаций. 19.2. Кинетические флуктуации при броуновском движении. 19.2.1. Источник Ланжевена в уравнении Фоккера – Планка. 19.2.2. Источник Ланжевена в уравнении Эйнштейна – Смолуховского. 19.2.3. Временные корреляции при броуновском движении. 19.3. Расчет гидродинамических флуктуаций на основе кинетической теории Больцмана. 19.3.1. Общие свойства источника Ланжевена в уравнении Больцмана. 19.3.2. Источники Ланжевена в уравнениях газовой динамики. 19.4. Традиционный расчет флуктуаций газодинамических функций. Метод Ланжевена. 19.4.1. Уравнения Ланжевена для газодинамических функций. 19.4.2.

Высокочастотные флуктуации δ_p , δ_r , δT , δu^i . 19.4.3. Низкочастотные флуктуации δ_p , δT , δs . Непоследовательность традиционного расчета газодинамических флуктуаций. 19.5. Расчет гидродинамических флуктуаций с учетом самодиффузии. 19.6. Кинетические флуктуации в активной среде. 19.6.1. Источник Ланжевена в кинетическом уравнении. 19.6.2. Источник Ланжевена в реакционно-диффузионном уравнении. 19.6.3. Кинетические флуктуации при теплопереносе в активной среде.

Глава 20. Аномальное броуновское движение. Равновесный и неравновесный фликкер-шум («шум $1/f$ ») и остаточные временные корреляции. 20.1. Равновесный естественный фликкер-шум. 20.2. Теория равновесного естественного фликкер-шума. 20.3. Остаточные временные корреляции. 20.4. Уравнение Ланжевена для области фликкер-шума. 20.5. Фликкер-шум в пространстве волновых чисел. 20.6. Естественный фликкер-шум в активных ограниченных системах при реакционно-диффузионных процессах. 20.6.1. Активная среда из бистабильных элементов. 20.6.2. Фликкер-шум при теплопроводности в среде с источником тепла. 20.7. Фликкер-шум в средах из элементов со сложным поведением. 20.8. Естественный фликкер-шум в музыке. 20.9. Фликкер-шум и сверхпроводимость. 20.10. Спектр теплового излучения в сверхпроводниках – нарушение закона Рэлея – Джинса (Raeleigh – Jeans) в области фликкер-шума. 20.11. Фликкер-шум системы независимых источников с экспоненциальным распределением времен релаксации. 20.12. Диффузия в пространстве фрактальной (дробной) размерности. Аномальное броуновское движение.

Глава 21. Критерии самоорганизации. 21.1. Эволюция во времени. Деградация и самоорганизация. H-теорема. 21.2. Эволюция в пространстве управляющих параметров. S-теорема. 21.3. Определение относительной степени упорядоченности по спектрам. 21.4. Функция распределения расстояний между траекториями. 21.5. K-энтропия и показатели Ляпунова при динамическом и статистическом описаниях сложных движений. 21.6. Нелинейная характеристика расхождения траекторий. K_{int} -энтропия. 21.7. K-энтропия и производство энтропии. Статистический аналог K-энтропии – K_{st} -энтропия. 21.8. Эволюция в пространстве управляющих параметров. S-теорема. 21.9. Энтропия Реньи в статистической теории открытых систем. 21.10. Самоорганизация при переходе через критическую точку газ – жидкость. 21.11. Некоторые нерешенные проблемы.

Глава 22. Турбулентное движение. Кинетическое описание турбулентности. 22.1. Представляет ли турбулентное движение хаос или порядок? 22.2. Характерные черты турбулентного движения. 22.3. Несжимаемая жидкость. Уравнения и напряжения Рейнольдса. 22.4. Гидродинамическая неустойчивость и возникновение турбулентности. 22.5. Развитая турбулентность. Число степеней свободы. 22.6. Интенсивность источника Ланжевена, производство энтропии и турбулентная вязкость для развитой турбулентности. 22.7. Полуэмпирическая теория Прандтля – Кармана. 22.8. Возникновение стационарных турбулентных течений. Оценка критического числа Рейнольдса. 22.9. Производство энтропии при ламинарном и турбулентном течениях. 22.10. Уменьшение энтропии при переходе от ламинарного течения к турбулентному. 22.11. Аргументы в пользу кинетического описания турбулентного движения. 22.11.1. Максимальные значения числа Рейнольдса в теории Колмогорова. 22.11.2. Проблемы замыкания при кинетическом и гидродинамическом описаниях. 22.11.3. Уравнение баланса энтропии при турбулентном движении в несжимаемой жидкости. 22.12. Две возможности кинетического описания турбулентного движения. Гипотеза Рейнольдса в кинетической теории. 22.12.1. Времена релаксации при ламинарном течении. 22.12.2. Отношение времен релаксации для турбулентного движения. 22.12.3. Локальное равновесие. Гипотеза Рейнольдса в кинетической теории. 22.13. Аналогия с переходом газ – жидкость в системе Ван дер Ваальса. 22.14. Кинетическое описание стационарного турбулентного течения Пуазейля в плоском канале. 22.15. Уравнение баланса энтропии при турбулентном движении. 22.16. Заключительные замечания.

Глава 23. Мост от классической статистической теории открытых систем к квантовой теории. 23.1. Микроскопическое и макроскопическое уравнения Шредингера. 23.2. Электрон в равновесном электромагнитном поле. 23.3. Флуктуационное движение электрона в равновесном поле. 23.4. Переход от обратимых динамических уравнений к диссипативным уравнениям «сплошной среды». 23.5. Пример структуры основного состояния. 23.6. Оправдано ли понятие «чистого ансамбля» в квантовой механике? Является ли квантовомеханическое описание полным? Существуют ли в квантовой теории скрытые параметры?

Заключение.

Дополнение. Два уравнения для квантовой функции распределения – функции Вигнера.

Список литературы.

Предметный указатель.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ

Том II

Ю.Л. Климонтович

© Ю.Л. Климонтович, 1999
М.: «Янус-К», 1999. 440 с.
ISBN 5-8037-0032-0

Предисловие

Читателю предлагается второй том книги «Статистическая теория открытых систем». Первый том был опубликован в 1995 году на английском языке издательством Kluwer (Голландия, Дордрехт) и в том же году на русском языке издательством «Янус» (Москва). Цель этой книги – продолжить изложение и анализ круга идей, методов и результатов, которые можно объединить единым названием «Физика открытых систем». Третий том предполагается посвятить физике квантовых открытых систем.

Естественно, что все рассматриваемые системы являются в той или иной мере открытыми. Содержание введенного термина «Физика открытых систем» определяется в значительной мере соответствующим перечнем ключевых слов и понятий. Нет необходимости воспроизводить здесь этот перечень. Его можно извлечь из оглавления. Исключение сделаем лишь для одного ключевого понятия «сплошная среда», которое является, несомненно, одним из важнейших понятий физики открытых систем. Это утверждение нуждается, однако, в некотором пояснении.

Понятия «замкнутая» и «открытая» системы вводятся на примере систем «частиц», движение которых описывается обратимыми уравнениями Гамильтона. К их числу относится, например, газ Больцмана – система «бесструктурных атомов». Более сложной базовой моделью является система заряженных частиц (электронов и ионов) и осцилляторов электромагнитного поля – полностью ионизованная плазма. Система Гамильтона является замкнутой, если нет обмена частицами и энергией с окружающими телами. Тем самым полная энергия системы неизменна. Более того, описание движения частиц в замкнутой системе является полным. Это означает, что по заданным начальным условиям можно, в принципе, точно предсказать значения координат и импульсов частиц в любой последующий момент времени. Наконец, движение частиц в замкнутой системе Гамильтона является обратимым.

В первом томе неоднократно отмечалось, что в силу сложности динамического движения и наличия неконтролируемых внешних воздействий потенциальная возможность полного описания движения частиц на основе обратимых уравнений Гамильтона не может быть реализована. Неизбежным оказывается переход от точных (для рассматриваемой модели) обратимых уравнений движения к приближенным необратимым (диссипативным) уравнениям сплошной среды.

Впервые представление сплошной среды было введено в термодинамике. При этом вообще не использовалось понятие «частица». Понятие же обратимости в термодинамике сохранилось – квазистатические процессы представляются обратимыми. Квазистатические процессы являются, однако, лишь предельным случаем более реалистичного описания процессов на основе уравнений термодинамики неравновесных необратимых процессов. Известна целая иерархия таких уравнений. Если двигаться от термодинамического описания к полному описанию на основе уравнений Гамильтона, то можно в простейшем случае (без учета химических реакций) выделить три уровня: диффузионное, гидродинамическое и кинетическое описания неравновесных необратимых процессов.

На каждом из этих уровней описания используется модель сплошной среды. Эти модели различны по степени их приближенности. В первом томе на примере газа Больцмана было показано, сколь важным является конкретное определение физически бесконечно малых масштабов и, следовательно, размера точки «сплошной среды». Именно на таком пути удалось построить обобщенное кинетическое уравнение для единого описания неравновесных процессов на кинетических и газодинамических масштабах. При этом удалось избежать ряда принципиальных трудностей, возникающих при переходе от кинетического к газодинамическому описанию на основе традиционной теории возмущений по малому числу Кнудсена. Было показано, что учет структуры сплошной среды необходим и в теории броуновского движения, а также при построении кинетических уравнений для описания неравновесных процессов в активных средах.

Существенна еще одна особенность сплошных сред: они, даже при условии внешней замкнутости, являются внутренне незамкнутыми – внутренне открытыми.

Действительно, при переходе от системы частиц к сплошной среде теряется информация о движении частиц на масштабах в пределах точек сплошной среды. Тем самым, описание системы становится неполным. По этой причине все уравнения сплошных сред являются диссипативными. Пренебрежение диссипацией в уравнениях сплошной среды, например, переход к кинетическому уравнению для свободной молекулярного течения или к уравнению Эйлера в газовой динамике является весьма грубым приближением.

Внутренняя незамкнутость внешне замкнутой сплошной среды проявляется в наличии производства энтропии. Это было показано на примере временной эволюции к равновесному состоянию в газе Больцмана.

Напомним, что при условии внешней замкнутости энтропия газа Больцмана возрастает со временем – H-теорема Больцмана. Рост энтропии и, следовательно, ее производство и указывают на наличие внутренней незамкнутости. В процессах эволюции сохраняется не полная энергия, как в замкнутой системе Гамильтона, а лишь ее среднее статистическое значение.

Выразим то же другими словами. Уравнение Больцмана описывает эволюцию лишь на масштабах, превышающих размер точки сплошной среды. Наличие огромного резервуара недоступных для описания движений на масштабах в пределах точек сплошной среды и делает систему Больцмана внутренне незамкнутой.

Несмотря на кажущуюся очевидность понятия «внутренняя незамкнутость» сплошной среды, до недавнего времени «структура сплошной среды» на всех уровнях от кинетической теории до термодинамики не конкретизировалась. Это, как мы уже видели на примерах газа Больцмана и теории броуновского движения, приводит к ряду принципиальных трудностей. В частности, без ее учета невозможно дать физическое определение ансамбля Гиббса для неравновесных процессов.

В настоящем томе роль структуры сплошной среды будет продемонстрирована на примерах кинетической теории электрон-ионной плазмы, а также термодинамической и кинетической теории фазовых переходов второго рода. В результате будет предложено альтернативное традиционному построение теории неравновесных процессов в плазме и теории фазовых переходов.

Существенно также следующее.

Явное определение физически бесконечно малых масштабов, и следовательно размера точки сплошной среды, позволяет ввести наиболее естественный малый параметр для всех случаев, когда используется модель сплошной среды. Это отношение физически бесконечно малой длины l_{ph} , определяющей размер «точки» сплошной среды к характерному размеру системы L . Естественно, что значение величины l_{ph}/L зависит как от выбора задачи, так и от принятого уровня описания. Однако, этот параметр всегда мал, если в основу положена модель сплошной среды.

В первом томе эффективность разложения по l_{ph}/L была продемонстри-

рована на примере Больцмана. Именно на этой основе удалось получить обобщенное кинетическое уравнение для единого описания кинетических и гидродинамических процессов в газе. В настоящем томе эффективность теории возмущений по «параметру сплошной среды» будет продемонстрирована при описании неравновесных процессов в электрон-ионной плазме, а также в теории фазовых переходов второго рода.

При этом удается избежать как «проблемы бесконечно малых» (математическая точка), так и «проблемы бесконечности», которая возникает при стремлении объема и числа частиц к бесконечности предельного перехода. Будут фигурировать лишь отношения «малого к большому» или, напротив, «большого к малому».

Такая позиция может служить иллюстрацией точки зрения Д. Гильберта. Приведем некоторые выдержки из его статьи «О бесконечном (см. стр. 431–448 в т. 1 собрания трудов («Факториал», Москва, 1998)).

«И аналогично тому, как оперирование с бесконечно малыми (здесь размерами «точки» сплошной среды – Ю.Л.К.) было заменено операциями с конечными, дающими в точности те же самые результаты и приводящими к абсолютно тем же самым элегантным формальным соотношениям, рассуждения с использованием бесконечного должны быть вообще заменены оперированием конечными операциями...»

«Математическая литература, если повнимательнее присмотреться к ней, изобилует бессмыслицами и нелепостями, в которых в большинстве случаев повинна бесконечность.»

Далее Д. Гильберт обращается к теории Кантора и к некоторым аспектам физики и химии. Приведем лишь некоторые выводы. На стр. 448 читаем:

«И напоследок давайте еще раз вспомним о нашей исходной теме и подведем итог всем нашим рассуждениям о бесконечном. Наш общий вывод таков: в реализованном виде бесконечное не встречается нигде. Его нет в природе, и оно также недопустимо и в качестве основы нашего разумного мышления. ...для возможности научного познания необходимы некоторые наглядные представления и благоразумие и что одной только логики для этого недостаточно...»

Приведенные утверждения Д. Гильберта являются ободряющими для проведения намеченной уже в первом томе программы развития нового подхода как в кинетической теории плазмы, так и в теории фазовых переходов второго рода. Эта программа оказывается плодотворной и в квантовой теории открытых систем. Начало этому уже положено в заключительной главе первого тома. Ее реализация будет продолжена в гл. 15. Физике квантовых открытых систем будет целиком посвящен заключительный – третий – том настоящей книги.

При написании второго тома естественно было стремление сделать изложение материала в наибольшей степени независимым. Именно этим объясняется включение в него небольших фрагментов из первого тома. Однако полная независимость так же недостижима, как и полная замкнутость описания в физике открытых систем.

Оглавление

Предисловие.

ЧАСТЬ 1. НОВЫЙ ПОДХОД В КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПЛАЗМЫ (МИФ О БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ).

Глава 1. Введение. История вопроса.

Глава 2. Статистическая теория полностью ионизованной плазмы. 2.1. Микроскопические уравнения для заряженных частиц и поля. 2.2. Основные параметры кулоновской плазмы. 2.2.1. Собственные колебания плазмы. Частота Ленгмюра. 2.2.2. Экранирование внешнего поля в плазме. Длина Дебая. 2.2.3. Пространственная корреляция заряженных частиц. Корреляционный радиус. 2.2.4. Времена и длины релаксации. 2.2.5. Корреляционное время и корреляционная длина (корреляционный радиус) для разреженной плазмы. 2.3. Физически бесконечно малые интервалы (масштабы) длины и времени для разреженного газа и разреженной плазмы. 2.3.1. Общее определение физически бесконечно малых масштабов. 2.3.2. Газ Больцмана. Кинетический уровень описания. 2.3.3. Газ Больцмана. Гидродинамическое описание. 2.3.4. Физическое число Кнудсена.

2.3.5. Согласование кинетического и гидродинамического определений сплошной среды. 2.3.6. Разреженная кулоновская плазма (приближение Дебая). 2.3.7. Сильно неизотермическая плазма.

Глава 3. Усреднение микроскопических уравнений для плазмы. Традиционный метод. 3.1. Приближение вторых моментов. 3.2. Приближение вторых корреляционных функций.

Глава 4. Два альтернативных приближения в статистической теории плазмы. 4.1. Традиционный и нетрадиционный способы описания неравновесных процессов в газе Больцмана. 4.2. Традиционный и нетрадиционный методы описания неравновесных процессов в разреженной плазме. 4.2.1. Сглаживание по объему «точки» сплошной среды. 4.2.2. Метод адиабатического включения взаимодействия.

Глава 5. Кинетические уравнения для полностью ионизованной плазмы. Традиционное приближение. 5.1. Спектральные плотности флуктуаций в кулоновской плазме. 5.2. Кинетические уравнения для разреженной кулоновской плазмы. 5.3. Эффективный потенциал. Интеграл столкновений Ландау. 5.4. Свойства интегралов столкновений Балеску – Ленарда и Ландау. 5.5. Времена релаксации. Частоты столкновений. 5.6. Приближение первых моментов – нулевое приближение по флуктуациям. Уравнение Власова. 5.7. Волны в «бесстолкновительной» кулоновской плазме. Затухание Ландау. 5.7.1. Электрическая восприимчивость кулоновской плазмы. Дисперсионное уравнение. 5.7.2. Решение дисперсионного уравнения. 5.8. Электрическая проницаемость и затухание Ландау в кинетической теории флуктуаций. 5.8.1. Кинетическая теория. 5.8.2. Теория флуктуаций.

Глава 6. Уравнения газовой динамики для разреженной кулоновской плазмы. 6.1. Уравнения переноса для плазмы. 6.2. Уравнения газовой динамики для плазмы. 6.3. Релаксация температур в плазме. 6.4. Электрическая проводимость плазмы.

Глава 7. Нетрадиционное описание неравновесных процессов в плазме. 7.1. Первый шаг к необратимым уравнениям физики открытых систем. 7.2. Обобщенное кинетическое уравнение для разреженной кулоновской плазмы. 7.3. Свойства обобщенных кинетических уравнений для плазмы. 7.3.1. Равновесное пространственно–однородное распределение частиц плазмы. 7.3.2. Соотношение Эйнштейна для коэффициентов диффузии и трения в пространстве импульсов. 7.3.3. Равновесное состояние по внешнему полю. Распределение Больцмана. 7.3.4. Экракирование внешнего поля равновесной плазмой. 7.3.5. Коэффициенты пространственной диффузии. Амбиполярная диффузия в полностью ионизованной плазме. 7.3.6. Свойства интеграла столкновений Ландау. 7.3.7. H–теорема при пространственно однородном распределении плазмы. Функционал Ляпунова.

Глава 8. Миф о бесстолкновительной плазме. Роль диссипации в «бесстолкновительной» плазме. 8.1. Что же такое «бесстолкновительная» плазма? 8.2. «Свободномолекулярные течения» в полностью ионизованной ограниченной плазме. 8.3. Возможно ли «бесстолкновительное приближение» в неограниченной плазме. 8.4. «Столкновительная» природа затухания Ландау. 8.5. Волны Ван Кампена.

Глава 9. Законы сохранения вещества и заряда в кулоновской плазме с учетом самодиффузии. 9.1. Поток вещества к средней скорости в микроскопической теории. 9.2. Поток вещества и средняя скорость в кинетической теории. 9.2.1. Два определения ансамбля Гиббса для неравновесных процессов. 9.2.2. Кинетическое и гидродинамическое определение средней скорости. 9.3. Уравнение непрерывности для плазмы.

Глава 10. Электронная плазма. 10.1. Обобщенное кинетическое уравнение для электронной плазмы. 10.2. Уравнение непрерывности для заряда. Электрический ток. 10.3. Самодиффузия в электронной плазме. 10.4. Волновые свойства электронной плазмы. «Столкновительное» затухание Ландау. 10.4.1. Неограниченная плазма. Большие числа Кнудсена: $\lambda \ll l$. 10.4.2. Неограниченная плазма. Малые числа Кнудсена: $l \ll \lambda$. 10.4.3. Ограниченная плазма. Затухание Ландау.

Глава 11. Расчет равновесных флуктуаций. Корреляционная функция Дебая. 11.1. «Бесстолкновительные» флуктуации в равновесной кулоновской плазме. 11.1.1. Метод Ланжевена. 11.1.2. Флуктуации поля в равновесном состоянии. 11.1.3. Флуктуационно–диссипационное соотношение. 11.1.4. Пространственная спектральная плотность флуктуаций поля. 11.1.5. Пространственная корреляционная функция Дебая. 11.2. «Столкновительные» флуктуации в равновесной кулоновской плазме в диффузионном приближении. 11.2.1. Уравнение непрерывности для плазмы. 11.2.2. Уравнения Ланжевена. Расчет флуктуаций в диффузионном приближении. 11.2.3. Расчет индуцированных флуктуаций. 11.2.4. Расчет флуктуаций источника. 11.3. Заключение к гл. 11.

Глава 12. H–теорема для электронной плазмы. Функционалы Ляпунова. 12.1. Уравнение баланса энтропии для уравнения Ландау. 12.2. Кинетическое уравнение для электронной плазмы. 12.3. Уравнение баланса локальной энтропии. 12.3.1. Вклад в производство энтропии от интеграла столкновений Ландау. 12.3.2. Диффузионный вклад в уравнение баланса энтропии. 12.3.3. Вклад подвижности в уравнение баланса энтропии. 12.3.4. Локальное уравнение баланса энтропии. 12.3.5. Производство энтропии. 12.3.6. Интегральное уравнение баланса энтропии. 12.3.7. Уравнение баланса энтропии для локального распределения Максвелла. 12.3.8. Модельные интегралы столкновений. 12.4. Заключение к гл. 12.

Глава 13. Уравнения газовой динамики на основе обобщенного кинетического уравнения. 13.1. Уравнения газовой динамики с учетом самодиффузии и подвижности заряженных частиц. 13.2. Поток тепла в электронной плазме.

Глава 14. Кинетическая теория плазменно–молекулярных систем. 14.1. Введение. 14.2. Микроскопические уравнения плазменно–молекулярной системы. 14.2.1. Фазовое пространство $x'=(r', p')$, $x''=(r'', p'', t)$. 14.2.2. Фазовое пространство r, p, R, P . 14.3. Уравнение для вектора поляризации. 14.3.1. Нулевое приближение по запаздыванию. 14.3.2. Коэффициент радиационного трения. 14.4. Кинетическое уравнение для системы атомов осцилляторов. 14.5. Структура кинетических уравнений частично ионизированной кулоновской плазмы. 14.6. Равновесное состояние. Ионизационное равновесие. 14.7. Структура кинетических уравнений для распределения электронов, ионов и атомов. 14.8. Уравнения баланса концентраций электронов, ионов и атомов. 14.9. Флуктуации концентраций электронов, ионов и атомов.

Глава 15. Второй мост к квантовой теории открытых систем. 15.1. Введение. 15.2. Микроскопические и макроскопические уравнения Шредингера. 15.3. Приближение сплошной среды в квантовой теории. 15.4. Установление основного состояния в атоме–осцилляторе. 15.4.1. Быстрая и медленная диффузия. 15.4.2. Физически бесконечно малые масштабы. 15.4.3. Уравнения Ланжевена для атомов в тепловом поле. 15.5. Уравнение Фоккера – Планка для атомов в тепловом поле. 15.5.1. Учет быстрых и медленных процессов. 15.5.2. Исключение быстрой релаксации. 15.6. Физическая интерпретация принципа неопределенности Гейзенберга. 15.7. Два «выхода» из области квантовой теории в классическую. 15.7.1. «Выход» в сторону больших масштабов. 15.7.2. «Выход» в сторону малых масштабов. «Классический квант действия». 15.8. Осцилляторная форма соотношения Гейзенберга. 15.9. Квантовая функция распределения при знаке « \Rightarrow ». 15.9.1. Квантовая функция распределения Вигнера. 15.9.2. Соотношение неопределенности Гейзенберга при отличной от нуля температуре. 15.9.3. Предельные случаи. 15.10. Квантовая корреляционная функция. 15.10.1. Чистый и смешанный ансамбли. 15.10.2. «Скрытые переменные». Смешанный ансамбль. 15.10.3. Матрица плотности. 15.10.4. Матрица плотности в равновесном состоянии. 15.10.5. Классическое соотношение неопределенности. 15.11. S–теорема для квантовых систем. Относительная упорядоченность состояний « \Rightarrow », « \gg ». 15.12. Теорема Нернста. Функционал Ляпунова Λ . 15.13. Информация. 15.14. Закон сохранения энтропии и информации.

ЧАСТЬ 2. КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ВТОРОГО РОДА

Глава 16. Введение. 16.1. Фазовые превращения – фазовые переходы. 16.2 Фазовые переходы первого и второго рода. Критическая точка. 16.2.1. Фазовые переходы первого рода. 16.2.2. Фазовые переходы второго рода. 16.2.3. Критическая точка. 16.3. Фазовый переход газ–жидкость. Модель Ван дер Ваальса. 16.4. Фазовые переходы в магнитных кристаллах. 16.5. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках. 16.6. «Путеводитель» по гл. 17–22.

Глава 17. Термодинамическое описание. Принцип Больцмана. Эффективная функция Гамильтона. 17.1. Статистическое обоснование законов термодинамики по Гиббсу. 17.2. Принцип Больцмана. Эффективная функция Гамильтона. 17.3. Теплоемкость. 17.4. Средние и наиболее вероятные значения внутренних параметров. 17.5. Определение термодинамических функций через наиболее вероятные значения.

Глава 18. Фазовый переход в сегнетоэлектриках. Теория Ландау. 18.1. Введение. 18.2. Простейшая модель сегнетоэлектрика. 18.3. Уравнение для вектора поляризации. 18.3.1. Пространственно–однородное состояние. 18.3.2. Учет пространственной нелокальности. 18.4. Функции распределения Ландау и Больцмана. 18.5. Теория Ландау. Время перехода через барьер. Формула Крамерса. 18.6. Энтропия и теплоемкость в теории Ландау. 18.7. Распределение Больцмана. Флуктуационный вклад в температурную зависимость теплоемкости. 18.8. Теплоемкость неравновесных состояний. 18.9. Релаксационное уравнение Гинзбурга – Ландау. 18.10. Вывод формулы Ориштейна – Цернике на основе уравнения Гинзбурга – Ландау. 18.10.1. Флуктуационно–диссипационное соотношение. 18.10.2. Источник Ланжевена. 18.11. Заключение к гл. 18

Глава 19. Кинетическая теория фазовых переходов. 19.1. Кинетическое уравнение для сегнетоэлектриков. 19.2. Самосогласованное приближение для первого момента. 19.3. Два альтернативных расчета структуры доменной стенки. 19.4. Расчет флуктуаций на основе уравнения Ланжевена. 19.5. Приближение вторых моментов. Полидоменные сегнетоэлектрики. 19.6. Быстрые флуктуации при фазовых переходах. 19.7. Медленные флуктуации при фазовых переходах. 19.8. Теплоемкость полидоменных сегнетоэлектриков. 19.9. Физически бесконечно малые масштабы.

Глава 20. Процессы самоорганизации при фазовых переходах. 20.1. Равновесные и неравновесные фазовые переходы. 20.2. Изменение степени упорядоченности в процессе фазового перехода. 20.2.1. Переход в монодоменное состояние. 20.2.2. Переход в полидоменное состояние. 20.3. Сравнительная степень упорядоченности монодоменного и полидоменного состояний. 20.4. Эволюция свободной энергии при фазовых переходах.

Глава 21. Сопоставление с результатами эксперимента. 21.1. Доменная структура. 21.2. Температурная зависимость теплоемкости в критической области. 21.3. Рассеяние света в критической области. Ширина спектра рассеянного излучения. 21.4. Центральный пик в спектре рассеянного излучения.

Глава 22. «Неклассические» критические индексы. 22.1. Роль структуры сплошной среды. Локальный термодинамический предельный переход. 22.2. Критические индексы. Гипотеза

масштабной инвариантности. 22.3. Предельный переход $T \rightarrow T_C$. 22.4 Приближение второго момента для сплошной среды. 22.5. Термодинамические функции в критической области. 1. Быстрые флуктуации. 22.6. Термодинамические функции в критической области. 2. Медленные флуктуации. 22.7. Переход к самосогласованному приближению. 22.7.1. Корреляционный параметр. 22.7.2. Критерий применимости приближения самосогласованного поля в критической точке. 22.7.3. Переход от неклассических индексов к классическим. «Параметр Вильсона». 22.8. Критические индексы для пространственно–временных процессов. 22.9. Время релаксации в критической области.

Заключительные замечания к главам 16–22.

Глава 23. Фазовый переход газ–жидкость. Модель Ван дер Ваальса. 23.1. Модель Ван дер Ваальса. 23.1.1. «Ван дер Ваальсовский предел». 23.1.2. Критическая область. Предельный переход $T \rightarrow T_C$. 23.2. Термодинамические функции для модели Ван дер Ваальса. 23.3 Функция распределения $f(n, R, t)$. 23.3.1. Корреляторы флуктуации плотности. 23.4. Учет структуры сплошной среды. 23.5. Эффективная функция Гамильтона. 23.6. Критическая область. 23.6.1. Уравнение для наиболее вероятного значения плотности числа частиц. 23.6.2. Изотермическая сжимаемость. 23.6.3. Эффективная функция Гамильтона для критической области. 23.7. Кинетическое уравнение для критической области. 23.7.1. Самосогласованное приближение для первого момента. 23.7.2. Коэффициент изотермической сжимаемости. 23.7.3. Область сосуществования двух фаз. Правило Максвелла. 23.7.4. Время релаксации. 23.7.5. Радиус экранирования. 23.7.6. Приближение Гаусса.

Глава 24. Кинетические флуктуации в критической области. 24.1. Источник Ланжевена в кинетическом уравнении. 24.1.1. Источник Ланжевена. 24.1.2. Спектральные плотности и пространственный коррелятор. 24.1.3. Спектральная плотность на нулевой частоте. Связь с формулой Орнштейна – Чернике. 24.2. Эффективные коэффициенты затухания и пространственной диффузии. 24.3. Приближение второго момента. Двухфазное состояние – аналог полидисперсного состояния. 24.3.1. Уравнение для второго момента. 24.3.2. Быстрые флуктуации. 24.3.3. Медленные флуктуации. 24.3.4. Спектральная плотность медленных флуктуаций.

Глава 25. Сопоставление с экспериментом. 25.1. Молекулярное рассеяние электромагнитного излучения. 25.1.1. Спектр рассеянного излучения. 25.1.2. Критическая область. Интегральные по частотам характеристики. 25.1.3. Критическая область. Максимум спектра рассеянного излучения. 25.2. Сопоставление двух альтернативных подходов в теории рассеяния. Экспериментальные данные. 25.2.1. Зависимость интенсивности рассеянного света от $r_c^2 q^2$. 25.2.2. Экспериментальное исследование зависимости полуширины спектра рассеянного излучения от фактора $r_c^2 q^2$. 25.2.3. Температурная зависимость теплоемкости газа Ван дер Ваальса в критической области.

Глава 26. «Неклассические» критические индексы в системе Ван дер Ваальса. 26.1. Итоги гл. 22. Последовательность двух предельных переходов. 26.2. Предельный переход $T \rightarrow T_C$. Модификация гипотезы масштабной инвариантности. 26.3. Температурная зависимость теплоемкости в критической области. Экспериментальные данные. 26.4. Термодинамические функции в критической области. 26.4.1. Быстрые флуктуации. 26.4.2. Медленные флуктуации. 26.5. Критерий применимости самосогласованного приближения. 26.6. Время релаксации в критической области.

Глава 27. Процесс самоорганизации при переходе через критическую точку. 27.1. Равновесные и неравновесные фазовые переходы. 27.2. Изменение степени упорядоченности в процессе перехода к двухфазному состоянию. 27.3. Эволюция свободной энергии при фазовых переходах.

Глава 28. Заключение.

Список литературы.

Предметный указатель.

Заинтересованный читатель может заказать монографию

по электронной почте:

yklm@hklm.phys.msu.ru
wadim@chaos.ssu.runnet.ru

по телефону:

(845–2) 51–45–49

по почте:

410026, Саратов, Астраханская 83, СГУ
редакция журнала «ПНД»