

Статистическая физика

Статистическая теория открытых систем

Ю.Л. Климонтович

(М.: ТОО "Янус", 1995) 624 с.

PACS numbers: **05.90. + m**

Явления самоорганизации и фазовые переходы в сильно неравновесных открытых системах являются, пожалуй, наиболее интересными областями приложения статистической физики. Спектр макроскопических открытых систем, обменивающихся с окружением энергией и веществом, чрезвычайно широк; он охватывает системы, которые изучаются не только в физике, но и в химии, биологии и даже в социологии. Как и в других разделах теории неравновесных процессов, предполагается, что статистическая физика должна сформулировать и обосновать единый подход к описанию открытых макроскопических систем, который затем может послужить основой для построения частных теорий. Хотя до завершения этой программы, по-видимому, еще далеко, исследования, выполненные в последние десятилетия, показали, что в поведении открытых систем обнаруживается много общих закономерностей, которые естественным образом удается описать в рамках неравновесной статистической механики.

В настоящее время усилиями многих авторов теория открытых систем достигла уровня более традиционных разделов неравновесной статистической механики, таких, например, как теория линейных процессов и кинетическая теория. Поэтому ощущается потребность в систематическом изложении физической теории открытых систем, доступном для студентов старших курсов университетов, аспирантов и научных работников, которые не являются специалистами в неравновесной статистической механике, но ведут исследования в смежных областях. Рецензируемая книга является первой в мировой литературе попыткой такого изложения на "физическом уровне". Автор избегает громоздких математических деталей, но сохраняет при этом конструктивный подход, необходимый для применения теории к конкретным проблемам. Таким образом, по стилю книга может быть названа учебником-монографией (примерно то же, что в зарубежной литературе называется "textbook"). Автор является одним из крупнейших специалистов в теории неравновесных процессов, так что многие сведения читатель получает, как говорится, "из первых рук". Это обстоятельство является очень важным, особенно для книги, где излагается теория, находящаяся в стадии развития. Не секрет, что в учебных пособиях по статистической физике неравновесных систем, написанных авторами, которые не ведут активных исследований в этой области, можно нередко встретить сомнительное, а то и ошибочное изложение принципиальных вопросов.

Книга состоит из 23-х глав. В первых восьми главах рассматриваются фундаментальные понятия статистической физики, такие как равновесные и неравновесные статистические ансамбли Гиббса, информационная и термодинамическая энтропия, функции распределения и корреляционные функции флуктуаций. В отличие от стандартных руководств по статистической физике, в этой книге большое внимание уделяется понятию

"физически бесконечно малого масштаба" для различных способов описания макроскопической системы и связанному с этим выделению мелкомасштабных и крупномасштабных флуктуаций, играющих различные роли в эволюции неравновесных систем. При изложении кинетической теории в главах 6–8 автор подробно обсуждает важный и далеко не тривиальный вопрос о механизме возникновения диссиpации и необратимости на кинетическом масштабе.

Главы 9 и 10 посвящены теории кинетических флуктуаций в неравновесных системах. Рассматриваются два подхода, каждый из которых представляет интерес для практических задач. Один подход основан на диссиpативном уравнении Леонтovichа для N -частичного распределения, а другой — на неравновесном методе Ланжевена. Обсуждается поведение энтропии в системе с учетом кинетических флуктуаций.

Важные проблемы перехода от кинетического к полумакроскопическому (гидродинамическому) описанию неравновесных систем рассматриваются в главах 11–14. Традиционный метод Чепмена–Энскога, хорошо известный из теории уравнения Больцмана, применим для состояний близких к локальному равновесию. Между тем, в сильно неравновесных открытых системах часто бывают ситуации, когда необходимо учитывать одновременно процессы, происходящие на кинетическом и гидродинамическом масштабах. В таких ситуациях некоторые локальные параметры (например, температура) теряют обычный термодинамический смысл и локальное равновесие не может служить отправной точкой для построения уравнений переноса. В книге излагается альтернативный способ перехода от кинетического к гидродинамическому описанию, в котором используется сглаживание функций распределения по физически бесконечно малому объему и введение физического параметра Кнудсена. Этот параметр представляет собой отношение размера "точки" среди при выбранном способе задания неравновесного состояния к характерному масштабу в задаче. Используя далее теорию возмущений по физическому параметру Кнудсена, автор получает обобщенное кинетическое уравнение для единого описания кинетических и гидродинамических процессов. Исследуются физические следствия из этого уравнения, в частности, поведение энтропии и переход к макроскопическим уравнениям переноса.

В следующих трех главах, с 15-й по 17-ю, рассмотрены те разделы теории открытых систем, которые не связаны непосредственно с микроскопическими моделями. Эволюция неравновесных состояний описывается управляющим уравнением (Master Equation) для вероятности перехода в пространстве огрубленных переменных, уравнением Фоккера – Планка для функции распределения этих переменных или нелинейными стохастическими уравнениями (уравнениями Ланжевена) для флуктуаций. Этот круг проблем, особенно важный для применений в химии, биологии и социологии, является далеко идущим обобщением теории броуновского движения макроскопических частиц в жидкостях и газах. Необходимо отметить, однако, что остающийся "за склоной" микроскопический подход, рассмотренный в

предыдущих главах, проявляет себя в некоторых принципах, которые приходится привносить в полумакроскопическую теорию. К ним относятся, в частности, связь диссипации с флуктуациями и общие свойства ланжевеновских случайных источников, описывающих неравновесный шум. Весьма важно, что наряду с фундаментальными вопросами, из которых отметим различные формы уравнения Фоккера – Планка и их связь с физическими свойствами процессов в системе, а также взаимное влияние равновесных и неравновесных фазовых переходов, автор дает ряд интересных примеров из различных разделов физики и биологии: частичная ионизованная плазма, сегнетоэлектрики, жидкие кристаллы, лазеры, динамика популяций. Таким образом, читатель может получить представление о том, как теория "работает" в конкретных задачах.

В главах 18 и 19 кинетическая теория применяется к исследованию активных сред, характерной особенностью которых является возникновение макроскопических диссипативных структур при изменении так называемых управляющих параметров, описывающих степень отклонения системы от равновесия. В последнее время активные среды широко изучаются в физике, химии и биологии, однако, как правило, используются лишь довольно грубые модели, основанные на феноменологических уравнениях типа "реакция – диффузия". Впервые в учебной литературе излагается кинетический подход к активным средам, что позволяет рассмотреть важные вопросы флуктуаций в таких средах. Эти главы представляют большой интерес и для специалистов — физиков, химиков и биологов, работающих в областях, связанных с изучением активных сред.

Отдельная глава посвящена низкочастотному фликкер-шуму (шуму вида $1/f$), возникающему в системах различной природы и имеющему ряд удивительных свойств: рост спектральной функции флуктуаций при уменьшении частоты, независимость временных корреляций от размерности системы и т.д. Фликкер-шум остается во многих отношениях загадочным явлением, хотя известен давно и активно изучается на протяжении семидесяти лет. В книге фликкер-шум рассматривается как пример аномальной диффузии в ограниченной среде. Такая точка зрения естественным образом вписывается в общую теорию открытых систем, излагаемую автором. Дано изящное объяснение некоторых закономерностей фликкер-шума и выяснены характерные особенности ланжевеновских источников, вызывающих этот шум.

В последних трех главах обсуждается фундаментальная проблема теории неравновесных открытых систем — критерий самоорганизации. Поскольку процессы самоорганизации в некотором смысле можно интерпретировать как цепочку неравновесных фазовых переходов, приводящих к появлению диссипативных структур, возникает естественный вопрос о физическом принципе (подобном второму закону термодинамики), который отражает степень упорядоченности состояний открытых

систем при различных значениях управляющего параметра. Основное утверждение, сформулированное автором в виде так называемой *S-теоремы* (*S* от слова "self-organization"), состоит в том, что в процессе самоорганизации происходит уменьшение энтропии открытой системы, т.е. состояние с диссипативными структурами является более упорядоченным, чем то состояние, из которого оно возникло. На протяжении всей книги автор иллюстрирует *S-теорему* частными примерами и дает ее общую формулировку в главе 21. Нетривиальность *S-теоремы* хорошо показана в главе 22, где в рамках статистической теории открытых систем обсуждается проблема турбулентности. Согласно критерию самоорганизации, предложенному автором, переход от ламинарного движения к турбулентному можно трактовать как неравновесный фазовый переход "от хаоса к порядку", хотя с "наивной" точки зрения обратное утверждение кажется более естественным.

Последняя глава является кратким введением в теорию квантовых открытых систем. Переход к необратимым уравнениям в квантовой теории, а также взаимное влияние неравновесности и типично квантовых эффектов тесным образом связаны с принципиальными и до конца не решенными вопросами о полноте квантовой механики, роли взаимодействия квантовой системы с макроскопическим окружением и т.д. Предварительная дискуссия с точки зрения теории открытых систем готовит читателя к обсуждению этих проблем в следующем томе книги.

Книга представляет собой интересное и необычное сочетание учебника и монографии на дискуссионную тему. Следует, однако, отметить, что такой стиль книги отражает современное состояние статистической теории сильно неравновесных открытых систем, где наряду с твердо установленными принципами и результатами имеется гораздо больше "белых пятен" и нерешенных проблем. Поскольку книга адресована не только специалистам, но и студентам, автору пришлось решать весьма сложную проблему отбора материала. В целом достигнуто разумное сочетание "старого" и "нового". Как и все предыдущие книги автора, рецензируемая книга отличается оригинальностью, ясностью изложения и глубиной физического содержания. Она является ценным пособием по одной из актуальных проблем современной теории неравновесных процессов.

Следует отметить, что наряду с изданием в России рецензируемая книга вышла зарубежом (Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995). Дальнейшее развитие идей, обсуждаемых в книге, с выходом на проблемы формулировки "Физики открытых систем" как нового междисциплинарного научного направления можно найти в статье автора в УФН (166 1231 (1996)); в настоящее время готовится к выходу второй том рецензируемой монографии.

В.Г. Морозов, Ю.Г. Рудой