



ФИЗИКА ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ

Проект программы междисциплинарного курса лекций

Ю.Л. Климонтович

Цель курса – изложение основ, круга проблем, которые объединены названием «Физика открытых систем». По своему содержанию и научно-педагогической направленности курс является междисциплинарным. Такой курс впервые вводится в учебные планы университетского образования.

В настоящее время идеи, методы и результаты курса «Физика открытых систем» должны служить (на разных уровнях изложения!) фундаментом образования студентов и аспирантов университетов, а также основой научной деятельности специалистов разного профиля – физиков и математиков, химиков и биологов, экономистов и социологов.

Естественно, что изучением различных процессов и явлений в открытых системах занимаются уже много лет специалисты разного профиля. И, тем не менее, имеется целый комплекс новых проблем, решение которых требует развития новых подходов описания неравновесных процессов в самых различных ситуациях.

Содержание научного направления «Физика открытых систем» кратко, и в большой мере условно, определяется перечнем ключевых слов и понятий.

В кратком варианте курс «Физика открытых систем» читается на физическом факультете Московского государственного университета в виде специального курса «Статистическая теория открытых систем» в течение 5 лет. С весеннего семестра курс «Физика открытых систем» будет читаться для более широкой аудитории.

Программа курса «Физика открытых систем» является оригинальной. Она обсуждалась и была одобрена Советом деканов физических факультетов университетов России, на заседании в Москве на физическом факультете университета.

Ключевые слова и понятия

Открытые системы. Диссипативные структуры. Синергетика. Эволюция. Деградация и самоорганизация. Хаос и порядок. Физический хаос. Управляющие параметры. Энтропия открытых систем. Норма хаотичности открытых систем. Критерии относительной степени упорядоченности состояний открытых систем. Определение понятий «самоорганизация» и «деградация» на основе критерия «S-теорема.» Диагностика физических, химических, биологических, экономических и социальных систем на основе методов физики открытых систем. Возможности долгосрочного прогноза развития открытых систем.

Переход от системы частиц к сплошной среде. Структура «сплошной среды» – физически бесконечно малые масштабы. Конструктивная роль динамической неустойчивости движения – экспоненциальной расходимости траекторий. Ансамбль Гиббса для неравновесных процессов. Кинетические уравнения с учетом структуры «сплошной среды». Единое описание кинетических и

гидродинамических процессов. Уравнение баланса энтропии. Связь теплового потока с градиентом температуры. Кинетическая теория флуктуаций.

Обобщенное кинетическое уравнение в теории броуновского движения. Ламинарное и турбулентное течения. Единое кинетическое описание ламинарного и турбулентного движений. Активные среды. Автоколебания и автоволны. Равновесные и неравновесные фазовые переходы. Кинетическая теория фазовых переходов.

Аномальное броуновское движение. Фрактальная диффузия. Фликкер шум.

Кинетическое описание плазмы с учетом структуры «сплошной среды». Структура «интегралов столкновений». Роль пространственной диффузии на кинетических и гидродинамических масштабах.

Квантовые открытые системы. Квантовые микроскопические и макроскопические уравнения Шредингера. Понятие «сплошная среда» в квантовой теории. Физически бесконечно малые масштабы. Структура основного состояния в квантовой механике. Примеры обобщенных квантовых кинетических уравнений. Физическое содержание принципа неопределенности Гейзенберга.

Квантовые макроскопические когерентные явления. Лазерное излучение. Сверхизлучение. Сверхтекучесть. Сверхпроводимость. Нелокальные квантовые эффекты.

1. Введение в физику открытых систем

- 1.1. Экспериментальные основы физики открытых систем.
- 1.2. Основные идеи и методы физики открытых систем.
- 1.3. Динамическая неустойчивость движения частиц. Перемешивание траекторий.
- 1.4. Физически бесконечно малые масштабы.
- 1.5. Ансамбль Гиббса для неравновесных процессов.
- 1.6. Конструктивная роль динамической неустойчивости движения.
- 1.7. Переход от уравнений движения частиц к уравнениям сплошной среды.
- 1.8. Единое описание кинетических и гидродинамических процессов.
- 1.9. Кинетическое описание неравновесных процессов в активных средах.
- 1.10. Фазовые переходы. Термодинамическая и кинетическая теория.
- 1.11. Неравновесные фазовые переходы.
- 1.12. Критерий относительной степени упорядоченности состояний открытых систем.
 - 1.12.1. Временная эволюция к равновесному состоянию. H–теорема.
 - 1.12.2. Эволюция стационарных состояний открытых систем. S–теорема.
 - 1.12.3. Норма упорядоченности (хаотичности) состояний открытых систем.
 - 1.12.4. Процессы деградаци и самоорганизации.
 - 1.12.5. Переход от ламинарного течения к турбулентному течению – пример процесса самоорганизации.
 - 1.12.6. Принцип минимума производства энтропии в процессах самоорганизации.

2. Физика нелинейных динамических систем

- 2.1. Примеры сложных движений в нелинейных динамических системах.
- 2.2. Нелинейные Гамильтоновы системы.
- 2.3. Теорема Лиувилля. Уравнение Лиувилля.
- 2.4. Уравнение для микроскопической плотности в шестимерном фазовом пространстве. Микроскопические уравнения переноса.
- 2.5. Нелинейные динамические диссипативные системы.
- 2.6. Динамическая неустойчивость движения. Динамический хаос.
- 2.7. Странные аттракторы.
- 2.8. Тепловая конвекция. Ячейки Бенара. Уравнения Лоренца.
- 2.9. Распределенные диссипативные нелинейные динамические системы.

- 2.10. Сложные движения в автоколебательных системах.
- 2.11. Автоволны. Автосолитоны.

3. Неравновесная нелинейная термодинамика

- 3.1. Термодинамический метод описания. Квазистатические процессы.
- 3.2. Законы термодинамики.
- 3.3. Каноническое распределение Гиббса.
- 3.4. Распределения Максвелла и Больцмана.
- 3.5. Статистическое обоснование законов термодинамики для квазистатических процессов. Энтропия. Теорема Гиббса.
- 3.6. Термодинамика неравновесных процессов.
 - 3.6.1. Кинетическое описание. Уравнение Больцмана. Управляющее уравнение.
 - 3.6.2. Уравнения гидродинамики.
 - 3.6.3. Реакционно-диффузионное приближение.
 - 3.6.4. Уравнения химической кинетики.
- 3.7. Флуктуационно-диссипационные соотношения.
- 3.8. Соотношения Онзагера.
- 3.9. Принцип Больцмана. Эффективная функция Гамильтона.
- 3.10. Свободная энергия неравновесного состояния. Функционал Ляпунова.
- 3.11. Нелинейная термодинамика активных сред.
- 3.12. Временная эволюция. H-теорема.
- 3.13. Эволюция стационарных состояний. Физический хаос. S-теорема.
- 3.14. Норма упорядоченности. Деградация и самоорганизация.

4. Нелинейное броуновское движение

- 4.1. Стохастические явления в открытых системах.
- 4.2. Методы описания стохастических процессов. Метод Ланжевена. Уравнения Фоккера – Планка и Эйнштейна – Смолуховского. Управляющие уравнения.
 - 4.3. Нелинейное броуновское движение.
 - 4.4. Броуновское движение в среде с нелинейным трением. Три формы уравнений Ланжевена и Фоккера – Планка.
 - 4.5. Переход от управляющего уравнения к уравнению Фоккера – Планка.
 - 4.6. Управляющие уравнения для одношаговых процессов.
 - 4.7. Броуновское движение квантовых атомов-осцилляторов.
 - 4.8. Теория кинетических флуктуаций.
 - 4.8.1. Кинетическое уравнение Больцмана. Флуктуации функции распределения. Интенсивность источника Ланжевена в кинетической теории.
 - 4.8.2. Источник Ланжевена в уравнении Фоккера – Планка.
 - 4.8.3. Источник Ланжевена в уравнении Эйнштейна – Смолуховского.
 - 4.9. H-теорема в кинетической теории и в теории броуновского движения.
 - 4.10. Броуновское движение в автоколебательных системах. Генератор Ван-дер-Поля.
 - 4.11. H-теорема для генератора Ван-дер-Поля.
 - 4.12. Эволюция стационарных состояний генератора. S-теорема на примере генератора Ван-дер-Поля.
 - 4.13. Генераторы с мультистабильными стационарными состояниями.
 - 4.14. Генераторы в дискретном времени. Бифуркации энергии предельного цикла и периода колебаний.
 - 4.15. Критерий устойчивости при переходе к дискретному времени на основе H-теоремы.
 - 4.16. Броуновское движение в химически реагирующих системах. Частично ионизованная плазма.

- 4.17. Броуновское движение в системах с нелинейной частотой. Бистабильные элементы. Переход через барьер – задача Крамерса.
- 4.18. Фазовые переходы. Термодинамическое и кинетическое описание.
- 4.19. Обобщенное кинетическое уравнение в теории броуновского движения.
- 4.20. Взаимное влияние равновесных и неравновесных фазовых переходов.

5. Кинетическое и гидродинамическое описание неравновесных процессов

- 5.1. Основы кинетической теории газов. Переход от системы частиц к приближению сплошной среды.
- 5.2. Кинетическое уравнение Больцмана. Общие свойства.
- 5.3. Уравнение баланса энтропии. H–теорема.
- 5.4. Функционал Ляпунова для газа Больцмана. Газ Больцмана – открытая система.
- 5.5. Приближение свободномолекулярного течения.
- 5.6. Переход от уравнения Больцмана к уравнениям газовой динамики.
- 5.7. Трудности традиционной кинетической теории газов.
- 5.8. Структура «сплошной среды».
- 5.9. Обобщенное кинетическое уравнение.
- 5.10. Обобщенное уравнение баланса энтропии.
- 5.11. Обобщенное определение теплового потока.
- 5.12. Уравнения газовой динамики с учетом самодиффузии.
- 5.13. Кинетическое и газодинамическое описание теплопереноса.
- 5.14. Диффузионная стадия релаксации к равновесному состоянию.
- 5.15. Волновые свойства газа Больцмана.

6. Кинетическая теория флуктуаций

- 6.1. Диссипативное уравнение для многочастичной функции распределения – уравнение Леонтовича.
- 6.2. Приближение вторых корреляционных функций.
- 6.3. Метод Ланжевена. «Молекулярная» и «турбулентная» интенсивности источника Ланжевена в уравнении Больцмана.
- 6.4. Энтропия и производство энтропии с учетом флуктуаций.
- 6.5. Источники Ланжевена в уравнениях гидродинамики.
- 6.6. Расчет гидродинамических флуктуаций.
- 6.7. Единое описание кинетических и гидродинамических флуктуаций на основе обобщенного кинетического уравнения.
- 6.8. Расчет гидродинамических флуктуаций с учетом самодиффузии.
- 6.9. Кинетические флуктуации при броуновском движении.
- 6.10. Кинетические флуктуации в активных средах.
- 6.11. Источники Ланжевена в реакционно–диффузионных уравнениях.
- 6.12. Кинетические флуктуации при теплопереносе в активной среде.

7. Равновесные и неравновесные фазовые переходы

- 7.1. Экспериментальные результаты исследования фазовых переходов. Основные закономерности.
- 7.2. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках и ферромагнетиках.
- 7.3. Сверхтекучесть.
- 7.4. Сверхпроводимость.
- 7.5. Примеры неравновесных фазовых переходов. Автогенераторы. Ячейки Бенара. Вихри Гейлора. Лазеры. Сверхизлучение.
- 7.6. Переход от ламинарного течения к турбулентному – пример неравновесного фазового перехода.

- 7.7. Фазовые переходы в химических и биологических системах.
- 7.8. Фазовые переходы в экономике.
- 7.9. Взаимное влияние равновесных и неравновесных фазовых переходов.
- 7.10. Теория Ландау. Основы флуктуационной теории фазовых переходов. Влияние фазового перехода второго рода на характеристики лазерного излучения. Обратное влияние – неравновесный катализ.
- 7.11. Кинетическая теория фазовых переходов в сегнетоэлектриках и системе Ван дер Ваальса.
- 7.12. Приближение первых моментов. Уравнение Гинзбурга – Ландау. Однодоменное состояние. Термодинамические функции.
- 7.13. Приближение вторых моментов. Полидоменные состояния. Особенности поведения термодинамических функций.

8. Новый подход в кинетической теории плазмы

- 8.1. Введение. История вопроса.
- 8.2. Микроскопические уравнения для полностью ионизованной плазмы.
- 8.3. Усреднение микроскопических уравнений. Приближение вторых корреляционных функций.
- 8.4. Два альтернативных приближения в статистической теории плазмы.
- 8.5. Кинетические уравнения для полностью ионизованной плазмы. Традиционное приближение.
- 8.6. Уравнения газовой динамики для разреженной плазмы.
- 8.7. Нетрадиционное описание неравновесных процессов в плазме. Обобщенное кинетическое уравнение.
- 8.8. Роль диссипации в «бесстолкновительной» плазме.
- 8.9. Законы сохранения вещества и заряда с учетом самодиффузии.
- 8.10. Электронная плазма. Обобщенное кинетическое уравнение. Волновые свойства. «Столкновительная» природа затухания Ландау.
- 8.11. Расчет равновесных флуктуаций. Корреляционная функция Дебая.
- 8.12. Уравнение баланса энтропии. Тепловой поток.
- 8.13. Уравнения газовой динамики плазмы на основе обобщенного кинетического уравнения.
- 8.14. Кинетическая теория флуктуаций в плазме.
- 8.15. Проблемы статистической теории плазмы.

9. Аномальное броуновское движение. Фликкер–шум

- 9.1. Низкочастотные шумы. Долговременные корреляции. Фликкер–шум.
- 9.2. Равновесный естественный фликкер–шум.
- 9.3. Уравнение Ланжевена для фликкер–шума.
- 9.4. Остаточные временные корреляции.
- 9.5. Фликкер–шум в пространстве волновых чисел.
- 9.6. Фликкер–шум в активных средах.
- 9.6.1. Среда из бистабильных элементов. Модель сегнетоэлектрика.
- 9.6.2. Фликкер–шум при теплопередаче в активной среде.
- 9.7. Фликкер–шум в среде из элементов со сложной динамикой.
- 9.8. Фликкер–шум в музыке.
- 9.9. Фликкер–шум и сверхпроводимость.
- 9.10. Тепловое излучение – нарушение закона Рэлея – Джинса в области фликкер–шума.
- 9.11. Фликкер–шум в системах с экспоненциальным распределением времени релаксации.
- 9.12. Диффузия в пространстве фрактальной (дробной) размерности. Аномальное броуновское движение.

10. Физика турбулентного движения

- 10.1. Экспериментальное исследование турбулентности.
- 10.2. Турбулентное движение представляет хаос или порядок?
- 10.3. Характерные черты турбулентного движения.
- 10.4. Несжимаемая жидкость. Уравнения и напряжения Рейнольдса.
- 10.5. Гидродинамическая неустойчивость и возникновение турбулентности.
- 10.6. Интенсивность источника Ланжевена, производство энтропии и турбулентная вязкость для развитой турбулентности.
- 10.7. Развитая турбулентность. Теория Колмогорова.
- 10.8. Полуэмпирическая теория турбулентности – теория Прандтля и Кармана.
- 10.9. Оценка критического числа Рейнольдса для потока в канале.
- 10.10. Производство энтропии при ламинарном и турбулентном течениях.
- 10.11. Уменьшение энтропии при ламинарном и турбулентном потоках.
- 10.12. Аргументы в пользу кинетического описания турбулентности.
- 10.13. Гипотеза Рейнольдса в кинетической теории. Проблема замыкания.
- 10.14. Единое кинетическое описание ламинарного и турбулентного движений.
- 10.15. Кинетическое описание течения Пуазейля.
- 10.16. Уравнение баланса энтропии при турбулентном движении.
- 10.17. Проблемы теории турбулентности.

11. Диагностика физических и медико–биологических систем на основе критериев физики открытых систем

- 11.1. Физика открытых систем. Примеры диссипативных структур. Неравновесные фазовые переходы.
- 11.2. Деградация и самоорганизация в процессах временной эволюции.
- 11.3. Динамический и физический хаос.
- 11.4. Динамическое и статистическое описание сложных движений.
- 11.5. Динамическая неустойчивость движения.
- 11.6. Конструктивная роль динамической неустойчивости.
- 11.7. Эволюция к равновесному состоянию. Функционалы Ляпунова. H–теоремы.
- 11.8. Эволюция в пространстве управляющих параметров.
- 11.9. Критерии относительной степени упорядоченности состояний открытых систем. S–теорема.
- 11.10. Определение относительной степени упорядоченности по экспериментальным данным.
- 11.11. Диагностика медико–биологических систем по критерию «S–теорема».
- 11.12. Норма хаотичности (упорядоченности) открытых систем. Определение понятий «деградация» и «самоорганизация».
- 11.13. Относительная степень упорядоченности аperiодических и периодических кристаллов. Аналогия с ламинарным и турбулентным движением.
- 11.14. Роль критериев относительной степени упорядоченности состояний открытых систем в социологии и экономике.

12. Физика квантовых открытых систем

- 12.1. Мост от классической к квантовой теории открытых систем.
- 12.2. Микроскопическое и макроскопическое уравнение Шредингера.
- 12.3. Два альтернативных описания рассеяния электромагнитного излучения на свободных электронах. Формула Томсона для эффективного сечения.

12.4. Флуктуационно–диссипационное соотношение для системы электрон–поле.

12.5. Приближение сплошной среды в квантовой теории. Физически бесконечно малые масштабы для системы атомы–поле.

12.6. Переход от обратимых уравнений квантовой механики к диссипативным уравнениям сплошной среды.

12.7. Установление основного состояния в системе атомов–осцилляторов.

12.8. Уравнение Фоккера – Планка для системы атомов–осцилляторов и поля.

12.9. Структуры основного состояния при рассеянии света на атомах.

12.10. «Вечные» вопросы квантовой механики.

12.10.1. Оправдано ли понятие «чистый ансамбль» в квантовой механике.

12.10.2. Вопрос Эйнштейна: «Является ли квантовомеханическое описание полным?»

12.10.3. Существуют ли в квантовой теории «скрытые параметры»?

12.11. Квантовые макроскопические явления в открытых системах.

12.12. Сверхтекучесть и сверхпроводимость.

Подбор литературы будет по каждому специальному курсу проводиться лектором. Позиция автора программы изложена в книгах, приведенных в списке литературы.

Литература

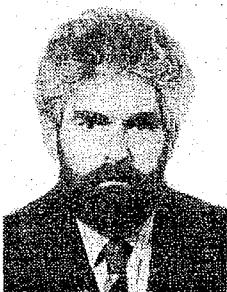
1. *Климатович Ю.Л.* Статистическая теория открытых систем. Т.1. М.: Янус, 1995.

2. *Климатович Ю.Л.* Статистическая теория открытых систем. Т.II. (манускрипт) Ч.1. Новый подход в кинетической теории плазмы. Ч.2. Кинетическая теория фазовых переходов. М.: Янус, 1995.

3. *Климатович Ю.Л.* Статистическая теория открытых систем. Т.III. Квантовые открытые системы (Проект).

Московский государственный университет

Поступила в редакцию 18.04.97



Климатович Юрий Львович – поступил на физический факультет МГУ осенью 1948 на третий курс. Окончил в 1948 году. Дипломную работу «Влияние взаимодействия молекул на коэффициент радиационного трения» выполнил под руководством профессора В.С. Фурсова. Работа опубликована в ЖЭТФе в 1949. Учеба в аспирантуре под руководством Н.И. Боголюбова. В 1951 году защитил диссертацию. С 1955 года и по настоящее время доцент, профессор, главный научный сотрудник физического факультета МГУ. С 1994 – заведующий лабораторией «Синергетика».

Основные направления научной деятельности: метод микроскопической фазовой плотности в теории плазмы; кинетическая теория неидеальных газов и плазмы; кинетическая теория неравновесных флуктуаций; кинетическая теория электромагнитных процессов, динамические и флуктуационные процессы в лазерах; критерии самоорганизации для целей технической и медико–биологической диагностики; единое описание кинетических, гидродинамических и диффузионных процессов в активных открытых системах.

Опубликовал более 150 научных работ. В их числе 10 монографий, учебных пособий, изданных на русском и иностранных языках.

Почетная медаль Ростокского университета, Германия. Почетный доктор Ростокского университета, Германия; Макс–Планк–Профессор, Берлин, Германия, 1990; Государственная премия России за 1991 год; Почетная медаль института Синергетики Академии Творчества России; Член Академии Творчества России; Соросовский профессор 1994; Лауреат премии имени Александра Гумбольдта за 1995 год, Германия; Медаль «50 лет Победы в великой отечественной войне», 1995.

В настоящее время на физическом факультете читает курс лекций «Статистическая теория открытых систем». Разрабатывает программы междисциплинарной специализации «Физика открытых систем». Руководит (в составе Оргбюро) семинаром «Синергетика».