

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

ИННОВАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА
Саратовского государственного университета им. Н.Г.Чернышевского

Введение в физику открытых систем

Факультет нелинейных процессов
Физика открытых нелинейных систем
Саратов - 2008

2

Немного истории, или почему Больцман определил XIX век как век Дарвина, а Пуанкаре отвергал теорию Больцмана

В нашем курсе нам наиболее интересны и важны сложные макроскопические системы, содержащие упорядоченные структуры, в которых порядок рождается из хаоса. Таких систем много и они разнообразны:

- Конвективные и гидродинамические ячейки
- Вихри в атмосфере и океане
- Оптические квантовые генераторы (лазеры)
- Химические реакции с временной и пространственной периодичностью
- Живые организмы и экосистемы
- Социальные системы

3

Примеры самоорганизации

■ Реакция Белоусова — Жаботинского



Изменение цвета реакционной смеси в реакции Белоусова — Жаботинского с ферроином

Некоторые конфигурации, возникающие при реакции Белоусова-Жаботинского в тонком слое в чашке Петри

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

4

Примеры самоорганизации

- Оптические квантовые генераторы (лазеры)



Гелий-неоновый лазер. Светящийся луч в центре — это не собственно лазерный луч, а электрический разряд, порождающий свечение, подобно тому, как это происходит в неоновых лампах. Луч проецируется на экран справа в виде светящейся красной точки.

Оптическая схема на основе лазера

Полупроводниковый лазер, применяемый в уале генерации изображения принтера HP

5

Примеры самоорганизации

- Ячейки Бенара — возникновение упорядоченной структуры конвективных ячеек в форме цилиндрических валов или правильных шестигранных структур в слое вязкой жидкости с вертикальным градиентом температуры



Вязкая жидкость

Нагреватель (T)

6

Немного истории, или почему Больцман определил XIX век как век Дарвина, а Пуанкаре отвергал теорию Больцмана


Существование и развитие самоорганизующихся систем до недавнего времени казалось противоречащим второму началу термодинамики, которое утверждает, что **развитие изолированной системы идет от порядка к хаосу**

«Клаузиус и Дарвин не могут быть одновременно правы!» — так недавно звучали некоторые утверждения.

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

7


Теория самоорганизации



- Теория самоорганизации
- Теория диссипативных структур
- Теория открытых систем
- Синергетика
- Информационная динамика
- Динамическая теория формообразования

8


Теория самоорганизации



- Все имеющиеся экспериментальные данные и результаты наблюдений показывают, что для существования в системе упорядоченных структур (исключая равновесные структуры типа кристалла) система должна быть **открытой**, т.е. **должна обмениваться с окружающей средой энергией и энтропией, переносимыми средой и/или излучением, и, что не менее важно, информацией.**
- Обмен с окружающей средой должен быть столь велик, чтобы система находилась **вдали от термодинамического равновесия в области нелинейной зависимости** обобщенных термодинамических потоков от термодинамических сил

9

Основатели физики открытых систем




Возникновение физики открытых систем было подготовлено в конце XIX – в начале XX веков такими выдающимися учеными как

- Людвиг Больцман (1844-1906)
- Анри Пуанкаре
- Александр Ляпунов
- Чарльз Дарвин
- ...

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

10

Людвиг Больцман (20.2.1844, Вена — 5.9.1906, Дуино, близ Триеста)



Австрийский физик, один из основоположников статистической физики и физической кинетики. Член Венской АН (1895) и многих академий мира. В 1866 Больцман окончил Венский университет. В 1867 приват-доцент этого университета. Профессор теоретической физики университета в Граце (1869—73), профессор математики в Венском университете (1873—1876), профессор экспериментальной физики университета в Граце (1876—89). В 1889—94 занимал кафедру теоретической физики в Мюнхене, в 1894—1900 в Вене, в 1900—02 в Лейпциге, а затем снова в Вене.

Научные интересы Больцмана охватывали почти все области физики (и ряд областей математики). Автор работ по математике, механике, гидродинамике, теории упругости, теории электромагнитного поля, оптике, термодинамике и кинетической теории газов. Однако наибольшее значение имеют работы по кинетической теории газов и статистическому обоснованию термодинамики. Применяя статистические методы к кинетической теории идеальных газов, Больцман вывел основное кинетическое уравнение газов, являющееся основой физической кинетики. Важнейшая его заслуга — исследование необратимых процессов и статистическая трактовка второго начала термодинамики.

Больцман был ревностным последователем электромагнитной теории Максвелла. Ему принадлежат первые экспериментальные работы по проверке справедливости выводов максвелловской теории электромагнитного поля. Он провёл измерения диэлектрической проницаемости газов и твёрдых тел и установил её связь с оптическим показателем преломления. Свои взгляды на теорию Максвелла он изложил в «Лекциях о максвелловской теории электричества и света» (1891—93). В 1884 Больцман теоретически вывел закон излучения абсолютно чёрного тела, ранее установленный И. Стефаном экспериментально. Эта работа сыграла большую роль в развитии современной теории излучения. Больцману приходилось вести напряжённую идейную борьбу, чтобы отстоять право молекулярно-атомистической теории на существование: его труды не были приняты рядом его соотечественников. Возможно, это сыграло известную роль в трагическом конце: больной и подавленный, он покончил жизнь самоубийством.

11

Почему Больцман назвал XIX век веком Дарвина?

Больцман считал, что **теория эволюции Дарвина** является наиболее значительным открытием XIX века.

И это на фоне:

- Никола Леонарда Сади Карно
- Рудольфа Клаузиуса
- Вильяма Томпсона (термодинамика)
- Майкла Фарадея и Джеймса Максвелла (ЭМ теория)
- Сам Людвиг Больцман: МКТ, первое кинетическое уравнение для необратимых процессов в газах, статистическое определение энтропии, доказал H-теорему и самое главное, он понял, что в замкнутых системах энтропия может служить мерой относительной степени хаотичности.

Поставив на первое место **принципы биологической эволюции**, Больцман был уверен, что его **теория временной эволюции газа в замкнутой системе будет обобщена и на открытые системы**, к которым относятся **все биологические объекты и системы**.

Казалось бы, XIX век – век физики!

12

Диссипативные структуры Ильи Романовича Пригожина

- **Основные объекты**, которые мы будем изучать в курсе лекций – это **макроскопические открытые системы, которые состоят из многих объектов, принимаемых за элементы структуры**.
- Элементы могут быть как микроскопические (атомы и молекулы в физических и химических системах), но могут малыми, оставаясь все же макроскопическими (макромолекулы в полимерах, клетки в биологических структурах). Они могут быть и не малыми телами, например, «элементарные» объекты в социологии.

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

13

Диссипативные структуры Ильи Пригожина. Сложность открытых систем и синергетика



- Благодаря сложности макроскопических открытых систем в них возможно образование различного рода структур (паттернов).
- При этом диссипация при образовании структур играет конструктивную роль. **«Диссипация необходима для формирования паттернов в открытых системах!»**
- Что бы подчеркнуть это обстоятельство Илья Романович Пригожин ввел термин **«диссипативные структуры»**, который объединяет все виды паттернов: временные (автоколебания в генераторе), пространственные (ячейки Бенара на поверхности жидкости), пространственно-временные структуры (автоволны на поверхности жидкости, паттерны в электронных потоках и т.д.).

14

Илья Романович Пригожин (1917-2003)



(1917-2003)

Илья Пригожин – Бельгийский физик и лауреат Нобелевской премии по химии за работы по неравновесной термодинамике, диссипативным структурам и сложным системам.

Илья Пригожин родился 25 января 1917 года в Москве. В 1921 году семья эмигрировала из России в Западную Европу. В 1942 году Илья Пригожин окончил брюссельский университет (Université Libre de Bruxelles).

С начала 1960-х годов Пригожин жил и работал в городе Остин (штат Техас), где он в 1967 году основал Центр по изучению сложных квантовых систем (Center for Complex Quantum Systems), которым руководил до конца жизни.



15

Сложность открытых систем, диссипативные структуры и синергетика



- Сложность открытых систем предоставляет широкие возможности для существования в них коллективных явлений.
- Подчеркивая определяющую роль кооперации при образовании диссипативных структур, Герман Хакен ввел термин **«синергетика»**, который означает коллективное действие.

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

16

Герман Хакен



Хакен Герман (род. 12 июля 1927 г.) — немецкий физик-теоретик, основатель синергетики. Изучал физику и математику в университетах Галле (1946—1948) и Эрлангена (1948—1950), получив степени доктора философии и доктора естественных наук. С 1960 г. является профессором теоретической физики университета Штутгарта. До ноября 1997 г. был директором Института теоретической физики и синергетики университета Штутгарта. С декабря 1997 г. является почетным профессором и возглавляет Центр синергетики в этом институте, а также ведет исследования в Центре по изучению сложных систем в университете Флориды (Бока Рэтон, США).

Основопологающие работы Г. Хакена, посвященные синергетике:

- Синергетика. М.: Мир, 1985.
- Synergetics: introduction and advanced topics. Berlin: Springer, 2004.
- Information and self-organization. Berlin : Springer, 2006.

17

Синергетика – новое междисциплинарное научное направление

По Ю.Л. Климонтовичу «**синергетика – не самостоятельная научная дисциплина, а новое междисциплинарное научное направление, цель синергетики – выявление общих идей, методов и общих закономерностей в самых различных областях естествознания, а также социологии и даже лингвистики; более того, в рамках синергетики происходит кооперирование различных специальных дисциплин**»

18

Юрий Львович Климонтович (1924-2002)



Родился 28 сентября 1924 г. в Москве, профессор Московского государственного университета


Крупнейший физик-теоретик в области статистической физики и кинетической теории плазмы

Основные результаты исследований Ю.Л. Климонтовича в области физики открытых систем собраны в трехтомной монографии:
Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. Т. 1. М.: Янус, 1995; Т. 2. М.: Янус, 1999; Т. 3. М.: Янус, 2001

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

19


Роль энтропии в открытых системах



- Для описания равновесных или близких к равновесию систем достаточно рассмотреть баланс массы, импульса и энергии
- **I начало термодинамики:** Количество теплоты, полученное системой, идёт на изменение её внутренней энергии и совершение работы против внешних сил
- При описании открытых систем **важную роль играет баланс энтропии.**
- В любой реальной системе всегда идут необратимые диссипативные процессы (диффузия, вязкость, теплопроводность, химические реакции, фазовые переходы), в которых растёт энтропия.
- Причина необратимости – в неустойчивости траекторий атомов и молекул при наличии их взаимодействий (столкновений). Игрет роль и то, что атомы и молекулы не «твёрдые шарики» как принимали в большинстве моделей, а сложные квантовые системы.

20

Роль энтропии в открытых системах



Единственная функция состояния, которая различается в необратимых и обратимых процессах – это **энтропия**: во-первых она растёт, а во-вторых меняется.

II начало термодинамики: процесс, единственным результатом которого было бы извлечение теплоты из некоторого резервуара и превращение этой теплоты в работу, невозможен.


Принцип Карно: ни одна тепловая машина, поглощающая теплоту Q_1 при температуре T_1 и выделяющая теплоту Q_2 при температуре T_2 не может производить больше работы, чем обратимая машина, работа которой равна:

$$Q_1 - Q_2 = Q_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad \text{или:} \quad \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}$$

Величина Q/T называется **энтропией** (Рудольф Клаузиус, 1865 г., от др. греч. *troph* - "обращение", "поворот"). Энтропия, по Клаузиусу характеризует превращение, превратимость.

21

Роль энтропии в открытых системах



Если газ при температуре T получает порцию теплоты ΔQ , то его энтропия возрастает на величину: $\Delta S = \Delta Q/T$, или в дифференциальных обозначениях $dS = dQ/T$. Полное изменение энтропии:

$$\Delta S = S(V_2, T_2) - S(V_1, T_1) = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

Так как энтропия есть функция состояния, то полученная разность не зависит от пути интегрирования, а определяется начальными и конечными точками пути. **Для теплоты Q такое интегрирование не возможно!**

Выражение $\int_1^2 dQ$

неопределено – интеграл зависит от пути интегрирования, в этом смысле dQ – не полный дифференциал. Но множитель $1/T$ играет роль интегрирующего множителя, превращая дифференциал dQ в полный!

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

22

Цикл Карно

Вычислим энтропию идеального газа.
На первой стадии цикла Карно при T_1 и Q_1 :

$$W_1 = \int_1^2 p dV = Q_1$$

Используя уравнение состояния (количество газа равно один моль) $pV = RT$ и проведя интегрирование, находим:

$$W_1 = Q_1 = RT_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Изменение энтропии при изотермическом расширении газа от V_1 до V_2 в результате сообщения ему теплоты Q_1 равно:

$$\Delta S = \frac{Q_1}{T_1} = R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Так как $V_2 > V_1$, энтропия возрастает $\Delta S > 0$ при изотермическом расширении:

При адиабатическом расширении от V_2 до V_3 : $T_2 V_2^{\gamma-1} = T_3 V_3^{\gamma-1}$

При адиабатическом сжатии от V_4 до V_1 : $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$

При изотермическом сжатии от V_3 до V_4 энтропия убывает на величину: $\Delta S = R \ln \frac{V_3}{V_4}$

Поделив, получаем: $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$

Убывь энтропии на пути 3-4 в точности компенсирует ее возрастание на пути 1-2. Энтропия как функция состояния остается неизменной.

23

Никола Леонард Сади Карно (1.06.1796-24.08.1832)

Сын известного политического деятеля и математика Лазара Карно. Сади Карно получил хорошее домашнее образование. В 1812 году поступил в Политехническую школу — лучшее на тот момент учебное заведение Франции. В 1814 году он ее закончил шестым по успеваемости и был направлен в Инженерную школу в г. Metz. В 1820 году познакомился с химиком Никола Клеманом, занимавшимся изучением газов. Общение с ним вызвало интерес у Карно к работе паровых машин.

В 1824 году вышла первая и единственная работа Сади Карно — «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Эта работа считается основополагающей в термодинамике. В ней был произведен анализ существующих в то время паровых машин, и были выведены условия, при которых КПД достигает максимального значения (в паровых машинах того времени КПД не превышал 2 %).

Умер Карно в 1832 году от холеры. По правилам все его имущество, в том числе и бумаги, было сожжено. Таким образом, его научное наследие было утрачено. Уцелела только одна записная книжка — в ней сформулировано Первое начало термодинамики. Труд Карно получил широкую известность в 1834 году благодаря Б. Клапейрону, который придал его идеям доступную математическую форму.

24

Изменение энтропии открытой системы

$$dS = dS_i + dS_e$$

За счет процессов внутри системы $dS_i \geq 0$ всегда!

Приток или отток энтропии из вне. Возможны следующие ситуации:

- $dS_e > 0, dS > 0$
- $dS_e < 0, \text{ но } |dS_e| < dS_i, dS > 0$
- $dS_e < 0, \text{ но } |dS_e| > dS_i, dS < 0$
- $dS_e < 0, \text{ но } |dS_e| = dS_i, dS = 0$

Если в системе нет производства энтропии, то: $dS = dS_e = \frac{dQ}{T}$

Если имеется производство энтропии внутри системы, то: $dS = dS_i + dS_e = dS_i + \frac{dQ}{T}$

Таким образом, получаем неравенство, справедливое для необратимых процессов:

$$dS \geq \frac{dQ}{T}$$

Знак равенства имеет место лишь при $dS_i = 0$

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

25

Функция диссипации

В системах, внутри которых протекают физические, химические, биологические процессы, всегда производится энтропия (с определенной скоростью)!

$$\frac{dS_i}{dt} \geq 0$$

Обозначим σ производство энтропии в единицу времени в единице объема открытой системы (σ называется функцией диссипации):

Неравновесные процессы!

$$\frac{dS_i}{dt} = \int \sigma dV \geq 0$$

Как же поступать с началами термодинамики применительно к открытым системам?

Следует рассматривать открытую систему вместе с ее окружением – с источниками вещества и энергии – и все вместе окружить адиабатической оболочкой от окружающего мира. К такой системе законы термодинамики можно применить. Классический пример: космонавт в кабине космического корабля.

26

Функция диссипации: примеры

Теплопроводность:

Пусть система содержит два тела при разных температурах, контактирующих друг с другом. Сразу после соприкосновения возникнет поток теплоты от более нагретого тела к менее нагретому. Энтропия производится благодаря теплопроводности. Для теплопроводности функция диссипации:

Поток энергии $\sigma = \frac{dF}{dt} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$ Движущая сила, создающая поток энергии

Функция диссипации выражается произведением потока энергии и силы, его вызывающей (это является универсальным определением)

Электропроводность:

Между концами проводника приложена разность потенциалов и, как следствие, имеет место движение зарядов, т.е. электрический ток:

$$\sigma = I \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{T} \right), \quad I = \frac{dq}{dt}$$

27

Как поступать с законами термодинамики применительно к открытым системам?

- Необходимо рассматривать открытую систему вместе с ее окружением – с источниками вещества и энергии – и все вместе отделить от окружающего мира адиабатической, изолирующей оболочкой. К такой системе законы термодинамики можно применить.

Изменение энтропии космонавта:

$$dS^{(k)} = dS_i^{(k)} + dS_e^{(k)}$$

Определяется обменом энтропии с окружающей средой

Изменение энтропии среды, окружающей космонавта:

$$dS^{(c)} = -dS_e^{(k)}$$

Общее изменение энтропии:

$$dS = dS^{(k)} + dS^{(c)} = dS_i^{(k)} > 0$$



В соответствии со вторым началом термодинамики энтропия возрастает на величину производства энтропии в организме космонавта. Его состояние поддерживается неравновесным, но стационарным:

$$dS^{(k)} = dS_i^{(k)} + dS_e^{(k)} = 0, \quad \text{т.е. } dS_e^{(k)} < 0$$

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

28

Энтропия живых систем




- В стационарном состоянии открытой системы производство энтропии внутри системы в точности компенсируется ее оттоком наружу. Можно показать, что энтропия веществ, выделяемых живым организмом больше, чем энтропия веществ им потребляемых.
- Э. Шредингер (1945):

«...Что же тогда составляет то драгоценное нечто, содержащееся в нашей пище, что предохраняет нас от смерти? На это легко ответить. Каждый процесс, явление, событие (назовите это, как хотите), короче говоря, все, что происходит в Природе, означает увеличение энтропии в той части Вселенной, где это имеет место. Так и живой организм непрерывно увеличивает свою энтропию, или, иначе, производит положительную энтропию и, таким образом, приближается к опасному состоянию максимальной энтропии, представляющему собой смерть. Он может избежать этого состояния, то есть оставаться живым, только постоянно извлекая из окружающей его среды отрицательную энтропию, которая представляет собой нечто весьма положительное, как мы сейчас увидим. Отрицательная энтропия - это то, чем организм питается. Или, чтобы выразить это менее парадоксально, существенно в метаболизме то, что организму удается освободиться от всей той энтропии, которую он вынужден производить, пока жив.»

29

Зачем мы имеем зимнее отопление?




- Пусть давление в комнате равно атмосферному. Энергия единицы массы воздуха в комнате равна

$$E_m = c_v T$$
- Следовательно, энергия единицы объема: $E_v = c_v \rho T$
- Учитывая уравнение состояния $p = \rho R T$

$$E_v = c_v \frac{p}{R} = 2.5 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3$$
- Отсюда следует, что количество энергии в комнате не зависит от температуры и целиком определяется давлением.
- Температура холодного предмета выравнивается, однако ее внутренняя энергия увеличивается не за счет комнатного, а за счет наружного воздуха. Аналогично с живыми существами: человек не меняет своего веса, несмотря на принятие пищи!
- Условия существования требуют поддержания известной температуры, и для этого используется не увеличение энергии, а **уменьшение энтропии**.

30

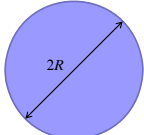
Почему делится клетка?



- Клетка – открытая система
- Баланс энтропий: $\Delta S = \Delta S_i + \Delta S_e$

$$\Delta S = A \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 - B \cdot 4 \pi R^2$$

Производство энтропии внутри клетки



Отток энтропии из клетки

$$\Delta S = 0 \Rightarrow R = 3B / A$$

$$R > 3B / A \Rightarrow \Delta S > 0$$

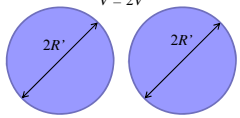
В клетке накапливаются вещества с избыточной энтропией, и она перегревается

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

31

Почему делится клетка?

- Поэтому клетке необходимо разделиться, иначе она погибнет

$$R^3 = 2R'^3 \Rightarrow R' = \frac{R}{\sqrt[3]{2}}$$


$$\Delta S = A \cdot \frac{8}{3} \pi R'^3 - 2B \cdot 4\pi R'^2$$

при $R = 3B/A$ $\Delta S = 36\pi \frac{B^3}{A^2} (1 - \sqrt[3]{2}) < 0$

В результате деления отток энтропии превышает ее производство в $\left| \frac{\Delta S_e}{\Delta S_i} \right| = \sqrt[3]{2} = 1.26$

32

Рост живых организмов – неравновесный фазовый переход

- Рост организмов, состоящих из клеток, связан делением клеток и с оттоком энтропии в окружающую среду. Это неравновесные процессы.
- В этом принципиальное отличие развитие живого организма, например, с ростом кристалла из расплава или раствора, что является равновесным процессом, возникающим при равенстве свободных энергий кристалла и расплава – равновесным фазовым переходом.
- Биологическое развитие – тоже фазовый переход, но неравновесный

33

Свободная энергия

- Для обратимых процессов изменение внутренней энергии можно записать:

$$dE = dQ - dW$$

$\underbrace{dQ}_{\substack{\text{Теплота,} \\ \text{сообщенная} \\ \text{системе}}}$

$\underbrace{dW}_{\substack{\text{Работа,} \\ \text{произведенная} \\ \text{системой}}}$

$$dQ = TdS \Rightarrow dE = dQ - dW \Rightarrow dW = -dF = -(dE - TdS)$$

Работа производится системой не за счет внутренней энергии, а за счет внутренней энергии за вычетом теплоты

$$F = E - TS \quad \text{- свободная энергия Гельмгольца}$$

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

34

Процесс при постоянном давлении

- Совершается работа $p dV$ против постоянного давления (независимо от того, обратимый или необратимый процесс). Для практического применения остается только работа:

$$dW = -dF - p dV$$

- Полезная величина работы равна убыли свободной энергии Гиббса (термодинамического потенциала):

$$G = F + pV = E + pV - TS$$

- Процессы структурообразования означают, что в открытой системе должно наблюдаться уменьшение энтропии, т.е. «уход» энтропии в окружающую среду:

$$dS_e < 0, \quad |dS_e| > dS_i > 0, \quad dS < 0$$

- Такие условия могут возникнуть только вдали от равновесия, вблизи равновесия доминирует величина dS_i и можно в лучшем случае ожидать возникновения стационарного состояния

35

Процесс при постоянном давлении

- Для того, чтобы в открытой системе происходило структурообразование, т.е. возросла упорядоченность, необходимо, чтобы уход энтропии превысил некоторое критическое значение.
- Для того, чтобы происходил отток энтропии из системы, нужна «прибыль» свободной энергии в количестве, превышающем изменение внутренней энергии, и вклад, определяемый продукцией энтропии:

$$dG_e > dH + T dS_i$$

где $H = E + pV$ – энтальпия.

- В стационарных условиях, когда внутренняя энергия и энтальпия не меняются

$$dE = dH = 0$$
$$dF_e = dG_e > T dS_i > 0$$

- Таким образом, необходимо вводить в систему свободную энергию для поддержания стационарного состояния.

36


Процесс эволюции в открытых системах

- Эволюция – это процесс изменения, развития в природе и обществе**
- В замкнутых физических системах, как мы обсуждали выше, эволюция во времени приводит к равновесному состоянию, которому, как показал Больцман, соответствует максимальная степень хаотичности (неупорядоченности)

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

37


Два типа эволюционных процессов в открытых системах



- Временная эволюция к равновесному (неравновесному, но стационарному) состоянию)
- Эволюция через последовательность неравновесных нестационарных состояний открытой системы (смена стационарных состояний происходит благодаря медленному изменению так называемых управляющих параметров)

38


Процесс эволюции в открытых системах



- Самоорганизация – не единственный процесс в эволюции. Более того не в физических, не в биологических, не в социальных системах не заложено «внутреннее стремление» к самоорганизации.
- Примеры деградации в физике – временная эволюция замкнутой системы к равновесному состоянию; в биологии, в теории эволюции Дарвина – деградация видов

39

Процесс эволюции в открытых системах




Т.о. **самоорганизация** – это лишь один из возможных путей эволюции. В качестве критерия самоорганизации можно использовать результаты анализа относительной степени упорядоченности (хаотичности) состояний открытой системы.

Именно на этом пути можно ответить на вопрос: «Является ли процесс в открытой системе самоорганизацией или деградацией?»

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

40

Процесс эволюции в открытых системах



Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем. М.: Янус-К, 2002.

- **Энтропия** – удобная мера упорядоченности (хаотичности) состояний систем в процессе их эволюции
- Критерий «Н-теорема»
- Трудности введения относительных критериев (меры) упорядоченности (или, наоборот, хаотичности) открытых систем связан в первую очередь с отсутствием четких определений самих базовых понятий: хаос, порядок, деградация, самоорганизация

41

Условия, необходимые для возникновения неравновесных фазовых переходов, которые проявляют себя в образовании новых диссипативных структур (ДС)



1. ДС могут образовываться только в открытых системах. Только в них возможен приток энергии, компенсирующий потери за счет диссипации и обеспечивающий существование более упорядоченных состояний
2. ДС возникают в макроскопических системах, т.е. в системах, состоящих из большого числа элементов (атомов, молекул, макромолекул, клеток и т.д.). Благодаря этому возможны коллективные (синергетические) взаимодействия, необходимые для перестройки системы

42

Условия, необходимые для возникновения неравновесных фазовых переходов, которые проявляют себя в образовании новых диссипативных структур (ДС)



3. ДС возникают лишь в системах, описываемых нелинейными уравнениями для макроскопических функций. Примерами могут служить кинетические уравнения (например, уравнения Больцмана, уравнения газовой динамики и гидродинамики, уравнения Максвелла в электродинамике для напряженностей электромагнитных полей)

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

43

Условия, необходимые для возникновения неравновесных фазовых переходов, которые проявляют себя в образовании новых диссипативных структур (ДС)

4. Для возникновения ДС нелинейные уравнения должны при определенных значениях управляющих параметров допускать изменение симметрии решения. Такое изменение выражается, например, при переходе от молекулярного теплопереноса к конвективному теплопереносу по ячейкам Бенара.



Нагреватель (Т)

44

Динамическое и статистическое описание сложных движений

Два способа описания сложных систем:

- Динамическое
- Статистическое

Соответственно выделяют два класса систем:

- Динамические
- Статистические (стохастические)

45

Динамическое и статистическое описание сложных движений

Подобное разделение **условно**, так как сложно провести различие между динамическим и физическим хаосом

Однако, подобное разделение можно осуществить на основе численного моделирования. В этом случае в основе классификации лежит свойство воспроизводимости движений по начальным условиям:

- Динамические системы демонстрируют воспроизведение динамики при задании одних и тех же начальных условий
- Стохастические системы не воспроизводят по начальным данным движение

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

46

Динамическое и статистическое описание сложных движений



В физическом эксперименте всегда есть источники шумов и флуктуаций, поэтому движение в той или иной мере всегда является **стохастическим**.

Однако в численном «эксперименте» существует возможность точного повторения начальных условий. Тогда, если модель не содержит случайных источников, то процесс воспроизводим и, следовательно, движение является **динамическим**, хотя и может быть очень сложным.

В противном случае, когда движение не воспроизводимо благодаря случайным источникам, мы имеем дело со **стохастическим движением**.

47

Связь между динамическим и статистическим описанием



Основная особенность динамического хаоса – **динамическая неустойчивость траекторий движения**, обусловленная экспоненциальной расходимостью близких траекторий.

Следствием этого является **перемешиваемость траекторий** в фазовом пространстве, что и позволяет перейти от полного описания на основе уравнения движения всех частиц к более простым уравнениям для функций, сглаженных по объему перемешивания.

Отсюда следует **радикальное изменение способа описания – системы частиц заменяется сплошной средой**.

48

Связь между динамическим и статистическим описанием




Именно такой переход осуществил Больцман, вводя кинетическое уравнение для плотности распределения частиц в пространстве шести измерений – \mathbf{r} и \mathbf{p} (\mathbf{v}). Функция распределения здесь является макроскопической характеристикой.

При таком переходе к макроскопическим уравнениям изменяется временная симметрия уравнений.

Система обратимых уравнений механики заменяется необратимыми уравнениями для макроскопических характеристик сплошной среды. Как следствие, появляются новые характеристики, которых нет в механике частиц, в частности, энтропия.

Лекция 1: Введение в физику открытых систем

49

 **Рекомендуемая литература**

- Трубецков Д.И. Введение в синергетику. Хаос и структуры. М.: Эдиториал УРСС, 2004.
- Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем. М.: Янус-К, 2002.
- Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. М.: Физматлит, 2002.
- Безручко Б.П., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Путь в синергетику. Экскурсы в десяти лекциях. 1-е издание. М.: Комкнига, 2005; 2-е издание. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2010.
- Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. Физика процессов эволюции. М.: УРСС, 2001.
- Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980.
- Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогноз будущего. М.: Наука, 1997.
