

Современная естественнонаучная картина мира

ЛЕКЦИЯ 4

Основные концепции современного естествознания

§4.1 Развитие представлений о пространстве и времени

Пространство и время играют важнейшую роль в человеческом мышлении. Эти понятия настолько фундаментальны, что на определенной ступени развития культуры в древних мифологических, религиозных и философских системах они рассматривались как генетическое начало мира. Отношение к пространству и времени в Древней Греции было тесно связано с представлениями о структуре материи. Полярность мнений по этому вопросу, о чем шла речь в предыдущей главе, в значительной степени была обусловлена отношением к реальности пустого пространства, пустоты.

Так, атомисты (Левкипп, Демокрит) придерживались мнения о пустоте как о необходимом условии движения атомов: пустота — это «сцена», на которой «атомы разыгрывают пьесу Бытия». Если бы пустота (пустое пространство) отсутствовала, то атомы оказались бы вплотную прижатыми друг к другу и не могли бы двигаться.

Противоположное мнение о существовании пустого пространства высказывали древнегреческие континуалисты (Анаксагор, Аристотель). Не отрицая категории пространства какместилища материи, они тем не менее не допускали возможности существования пустого пространства, в котором отсутствует материя. Такое «атрибутивное» представление о пространстве (в отличие от рассмотренного выше «субстанционального» подхода древних атомистов) имело множество сторонников в истории естествознания. Например, древнегреческий философ Зенон так доказывал невозможность существования пустого пространства: «...Если все существующее существует в пространстве и само пространство существует, то где существует последнее?» Аналогичное мнение высказывал один из великих предшественников Ньютона Р. Декарт.

Развивая атомистическую доктрину материи, Ньютон ввел в созданную им механику и непрерывные составляющие этой доктрины — абсолютное, не зависящее от материи, пустое пространство и абсолютное, не зависящее от пространства и от материи, время. Абсолютное пространство, считал Ньютон, по своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным, являясь пустымместилищем материальных объектов. Важно отметить, что согласно такому представлению абсолютное пространство выступает фактически не как протяженность, а как абсолютное условие существования и движения материальных объектов.

Абсолютное, истинное, математическое время у Ньютона — это время, которое само по себе и по своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью.

Созданная Ньютоном концепция абсолютного пространства и абсолютного времени безраздельно господствовала в науке вплоть до конца XIX в. Ее ограниченность

стала выясняться лишь в связи с развитием представлений об электромагнетизме.

В истории науки можно выделить два подхода к объяснению свойств пространства и времени.

Концепции пространства и времени в науке

	Субстанциональная концепция	Реляционная концепция
Суть концепции	пространство и время – самостоятельные субстанции, не зависящие друг от друга и независимые от материи.	пространство и время взаимосвязаны друг с другом и связаны
Свойства пространства и времени	<p>Пространство – пустоеместилище для тел. Тела не взаимодействуют с ним. Пространство – абсолютная СО, остается всегда неподвижным. Оно однородно, изотропно (обладает во всех точках и направлениях одинаковыми свойствами), трехмерно (евклидово).</p> <p>Время – чистая длительность. Время однородно, обратимо. Реальные процессы, происходящие во времени, не взаимодействуют с абсолютным временем.</p> <p>По Ньютону абсолютные пространство и время – чисто математические понятия.</p>	<p>Согласно СТО пространство и время взаимосвязаны: представляют собой единый четырехмерный пространственно-временной континуум.</p> <p>Расстояния и размеры тел в пространстве могут меняться в зависимости от протекающих в нем процессов.</p> <p>Временные интервалы так же могут меняться, в зависимости от условий наблюдения явлений.</p> <p>ОТО связала эффекты искривление пространства-времени с гравитацией.</p>
Представители	<p>Демокрит, Левкипп, Ньютон</p> <p>Основополагающая концепция в классической науке</p>	<p>Анаксагор, Аристотель Лейбниц, Эйнштейн</p> <p>В результате создания СТО реляционная концепция сместила субстанциональную концепцию в фундаменте науки и заняла ее место.</p>

§4.2 Специальная теория относительности

Был этот мир глубокой тьмой окутан.
 Да будет свет! И вот явился Ньютон.
 Но Сатана недолго ждал реванша.
 Пришел Эйнштейн - и стало всё, как раньше.

(Первые две строки - Александр Поул (1688-1744),
 вторые - Джон Сквайр (1884-1958))

Принятие реляционной концепции пространства и времени стало следствием решения проблемы света.

Восторжествовавшая в науке теория электромагнетизма Максвелла имела один недостаток – уравнения Максвелла плохо согласовались с ключевыми законами механики Ньютона. Изначально высказывались предположения, что новая теория Максвелла не верна. Но в 1887 году Г. Герц блестящими экспериментами подтвердил большинство выводов теории Максвелла.

В том же 1887 году физики Альберт Майкельсон и Эдвард Морли провели высокоточный эксперимент, целью которого было обнаружение эфира. Результат эксперимента оказался отрицательным. Если эфир и существует, он в никак себя не проявляет в экспериментах. Таким образом, был сделан вывод, что данная гипотеза является излишней в теории электромагнетизма. Вторым удивительным следствием опыта было постоянство скорости света и ее независимость от относительного движения источника и приемника света. Данный факт приводил ученых в замешательство. **Инвариантность** скорости света являлась нарушением классического закона сложения скоростей.

Многие ученые высказывали различные идеи – способы разрешения данного парадокса. Одним из них был Хендрик Лоренц, который вывел уравнения, согласовавшие механику Ньютона с теорией электромагнетизма. (Эти уравнения носят название «преобразования Лоренца»). Парадокс, казалось бы, устранялся. Но этот шаг был чисто математическим, «подгонкой» одной теории под другую. Человеком, поставившим точку в вопросе, был Альберт Эйнштейн. Эйнштейн делает решающий шаг, провозгласив: «уравнения Максвелла правильны, ошибка кроется в самой механике Ньютона». В 1905 году он создает специальную теорию относительности (СТО), а в 1916 году – общую теорию относительности (ОТО).

А. Эйнштейн в 1905 г. выдвинул новую радикальную идею, заменив произвольные предположения теории эфира только двумя постулатами, на которых и основана **специальная теория относительности (СТО)**.

Эти постулаты довольно просты и понятны:

1. все физические законы одинаковы во всех инерциальных системах;
2. скорость света (в пустоте) одинакова с точки зрения всех наблюдателей независимо от движения источника света относительно наблюдателя.

В известном смысле СТО перебросила мостик между классической механикой и электромагнетизмом. Заметим, что СТО применима ко всем системам, движущимся без ускорения, т.е. инерциальным системам, а **общая теория относительности (ОТО)** - для систем, движущихся с ускорением, т.е. неинерциальных систем.

Поясним два постулата СТО. Любое равномерное и прямолинейное движение относительно. При наличии двух инерциальных систем отсчета (ИСО) бессмысленно выяснять, какая из них движется, а какая покоится. Они обе равноправны. Более того, никакими экспериментами мы, находясь в движении, не сможем установить, покоимся мы или движемся равномерно и прямолинейно. Соответственно любое явление природы (процесс) должно протекать одинаково в любой ИСО.

Факт инвариантности скорости света – факт установленный экспериментально. Более того, значение скорости света – это максимально возможная скорость движения

в природе. Структура пространства и времени такова, что превысить этот предел нельзя¹.

Ключевые понятия теории относительности и релятивистские эффекты:

- 1. Пространство и время представляет собой единый четырехмерный пространственно-временной континуум.** При разработке постулатов СТО Эйнштейн отказался от трех основных постулатов Ньютона - представления об абсолютном пространстве и времени, закона сложения скоростей и закона сохранения массы, заменив последний обобщенным законом сохранения массы-энергии. Пространство и время у Эйнштейна перестали быть абсолютными, не связанными друг с другом субстанциями. Согласно СТО пространство и время взаимосвязаны и зависят от тех явлений, которые в них рассматриваются. Пространственные расстояния и промежутки времени являются относительными по отношению к тем системам отсчета, в которых мы рассматриваем конкретный процесс или явление.
- 2. Скорость света в вакууме – неизменна и максимальна.** Никакое материальное тело ни в одной системе отсчета не может иметь скорости, равной или большей скорости света c . Кстати, это означает, что скорость света инвариантна. Согласно СТО и ОТО, никакой сигнал не может быть передан со скоростью, превышающей скорость света c .
- 3. Причинно-следственная связь.** Последовательность событий во времени с точки зрения разных наблюдателей зависит от их относительного движения. В этом заключается эффект «относительности одновременности». События одновременные в одной системе отсчета, могут быть не одновременными в другой системе отсчета. Однако, никакой наблюдатель, как бы он не двигался, не может зарегистрировать следствия раньше причины.
- 4. Сокращение длин движущихся тел.** Измерение длины предмета наблюдателем, движущимся относительно него, дает меньшее значение, чем измерение той же длины наблюдателем, неподвижным относительно предмета (сокращение длин). Сокращение испытывает только размер предмета вдоль направления движения. Поперечные значения остаются неизменными.
$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$
, где l_0 - длина тела (или расстояние), измеренное в системе, относительно которой тело покоится, l - длина тела, измеренная в системе отсчета, относительно которой тело движется.
- 5. Замедление времени.** Наблюдатель, движущийся относительно часов, установит, что они идут медленнее точно таких же часов, находящихся в покое в его системе отсчета (замедление течения времени): $\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, где Δt_0 - время, измеренное по часам, движущимся вместе с объектом, Δt - время, измеренное по часам неподвижного наблюдателя, v - скорость движения объекта относительно неподвижного наблюдателя. С этим релятивистским эффектом связан «парадокс близнецов».

¹ Из этого факта вытекает интересное следствие – существование таких экзотических астрономических объектов как «черные дыры».

6. **Изменение масс.** Тело, движущееся относительно наблюдателя, имеет массу, большую, чем такое же тело, покоящееся относительно наблюдателя.
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
 где m_0 - масса покоя тела (масса неподвижного тела), m - масса движущегося тела. Таким образом, с увеличением скорости тела растет и его масса, а при $v \rightarrow c$ $m \rightarrow \infty$. Чем быстрее движется тело, тем труднее изменить его скорость, то есть телу придется сообщить всё большее и большее количество энергии.
7. **Эквивалентность массы и энергии.** Полная энергия тела равна сумме его собственной энергии (энергии покоя) и его кинетической энергии. Одна из самых известных формул физики $E = m_0c^2$ означает следующее: даже покоящееся тело, имеющее массу покоя m_0 , обладает огромной энергией. Понятия «масса» и «энергия» по сути эквивалентны. Энергия способна превращаться в массу, и наоборот. Формула Эйнштейна $E = mc^2$ открыла к двери в ядерную физику и привела к созданию ядерной энергетики и ядерного оружия.
8. **Искривление пространства-времени.** Общая теория относительности (созданная Эйнштейном в 1916 году) связала возможное искривление пространства-времени с действием гравитационных полей. Вблизи массивных космических объектов, создающих сильные поля тяготения, пространство будет искривляться, а время замедлять свой ход. Это нарушило представления об однородности пространства и времени.
9. **Связь пространства, времени и материи** – это другое важнейшее следствие ОТО. Пространство и время не являются самостоятельными субстанциями, а являются формами существования единственной субстанции – материи. Массивные объекты (планеты, звезды) своей гравитацией искривляют пространство-время. Также, вблизи массивных тел время течет по другому, нежели в удалении от массивных тел.
10. **Экспериментальное подтверждение.** Экспериментально проверены следующие предсказания ОТО: *прецессия перигелия* орбиты Меркурия, искривления световых лучей при прохождении их вблизи Солнца. ОТО наиболее полно проявила себя в вопросах происхождения и эволюции нашей Вселенной.

Эффект замедления времени получил ряд непосредственных экспериментальных и наблюдательных подтверждений. В составе космических лучей имеются частицы, именуемые μ^+ - и μ^- - мезонами («мю-плюс» и «мю-минус» мезоны). Эти частицы нестабильны — они распадаются самопроизвольно на позитрон (или электрон) и два нейтрино. Среднее время жизни μ - мезонов, измеренное в условиях, когда они неподвижны (или движутся с малой скоростью), составляет около $2 \cdot 10^{-6}$ сек. Казалось бы, что, даже двигаясь со скоростью света, μ - мезоны могут пройти лишь путь порядка 600 м. Однако, как показывают наблюдения, μ - мезоны образуются в космических лучах на высоте 20—30 км и успевают в значительном количестве достигнуть земной поверхности. Это объясняется тем, что $2 \cdot 10^{-6}$ сек — собственное время жизни μ - мезона, т. е. время, измеренное по часам, движущимся вместе с ним. Время, отсчитанное по часам экспериментатора, связанного с Землей, оказывается

гораздо большим [см. формулу $\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$; скорость мезона близка к c]. Поэтому нет

ничего удивительного в том, что этот экспериментатор наблюдает пробег мезона, значительно больший 600 м. Отметим, что с позиции наблюдателя, движущегося вместе с мезоном, расстояние, пролетаемое им до поверхности Земли, сокращается до 600 м [см. формулу $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$], так что мезон успевает пролететь это расстояние за $2 \cdot 10^{-6}$ сек.

Эффект замедления времени из-за относительного движения систем отсчета, наряду с гравитационным замедлением времени учитывается в спутниковых системах навигации, например, в GPS ход времени часов спутников скорректирован на разницу с поверхностью Земли, составляющую суммарно 38 микросекунд в день. Важно отметить, что эффекты СТО (релятивистские эффекты) начинают проявляться при скоростях движения тел, близких к скорости света либо равных ей. При скоростях, многократно меньших скорости света, они пренебрежимо малы. По этой причине во времена Ньютона данные эффекты оказались «за бортом» науки.

Связь теории относительности и классической механики Ньютона – хороший пример принципа соответствия научных теорий (см. §2.5). При скоростях много меньших скорости света (то есть при скоростях движения в окружающем нас мире) уравнения СТО (преобразования Лоренца) переходят в уравнения классической механики. Таким образом, специальная теория относительности не опровергла законы Ньютона, а лишь ограничила область их применимости.

§5.3 Понятие сложности и системный подход

Теория относительности, изучающая универсальные физические закономерности, относящиеся ко всей Вселенной, и квантовая механика, изучающая законы микромира, нелегки для понимания, и тем не менее они имеют дело с системами, которые с точки зрения современного естествознания считаются простыми. Простыми в том смысле, что в них входит небольшое число переменных, и поэтому взаимоотношение между ними поддается математической обработке и выведению универсальных законов.

Однако, помимо простых, существуют сложные системы, которые состоят из большого числа переменных и, стало быть, большого количества связей между ними. Чем оно больше, тем труднее поддается предмет исследования достижению конечного результата — выведению закономерностей функционирования данного объекта. Трудности изучения данных систем связаны и с тем обстоятельством, что чем сложнее система, тем больше у нее так называемых эмерджентных свойств, т. е. свойств, которых нет у ее частей, и которые являются следствием эффекта целостности системы.

Такие сложные системы изучает, например, метеорология — наука о климатических процессах. Именно потому, что метеорология изучает сложные системы, процессы образования погоды гораздо менее известны, чем гравитационные процессы, что, на первый взгляд, кажется парадоксом. Действительно, почему мы точно можем определить, в какой точке будет находиться Земля или какое-либо другое небесное тело через миллионы лет, но не можем точно предсказать погоду на завтра?

Потому, что климатические процессы представляют гораздо более сложные системы, состоящие из огромного количества переменных и взаимодействий между ними...

Разделение систем на простые и сложные является фундаментальным в естествознании. Среди всех сложных систем наибольший интерес представляют системы с так называемой «обратной связью». Это еще одно важное понятие современного естествознания.

Если мы ударим по бильярдному шару, то он полетит в том направлении, в котором мы его направили, и с той скоростью, с которой мы хотели. Полет брошенного камня тоже соответствует нашему желанию, если ничего не препятствует этому. Сам камень совершенно индифферентен по отношению к нам. Он не сопротивляется, если только не имеет в виду закона инерции.

Совсем иным будет поведение кошки, которая активно реагирует на наше воздействие. Так вот, если поведение объекта (поведением будем называть любое изменение объекта по отношению к окружающей среде) зависит от воздействия на него, мы говорим, что в такой системе имеется обратная связь — между воздействием и ее реакцией.

Поведение системы может усиливать внешнее воздействие: это называется **положительной** обратной связью. Если же оно уменьшает внешнее воздействие, то это **отрицательная** обратная связь. Особый случай — **гомеостатические** обратные связи, которые действуют, чтобы свести внешнее воздействие к нулю. Пример: температура тела человека, которая остается постоянной благодаря гомеостатическим обратным связям. Таких механизмов в живом теле огромное количество. Свойство системы, остающееся без изменений в потоке событий, называется **инвариантом** системы.

В любом нашем движении с определенной целью участвуют механизмы обратной связи. Мы не замечаем их действия, потому что они включаются автоматически. Но иногда мы пользуемся ими сознательно. Скажем, один человек предлагает место встречи, а другой повторяет: да, мы встречаемся там-то и во столько-то. Это обратная связь, делающая договоренность более надежной. Механизм обратной связи и призван сделать систему более устойчивой, надежной и эффективной.

В широком смысле понятие обратной связи «означает, что часть выходной энергии аппарата или машины возвращается на вход... Положительная обратная связь прибавляется к входным сигналам, она не корректирует их. Термин «обратная связь» применяется также в более узком смысле для обозначения того, что поведение объекта управляется величиной ошибки в положении объекта по отношению к некоторой специфической цели» (Н. Винер. Кибернетика.- М., 1968. - С. 288). Механизм обратной связи делает систему принципиально иной, повышая степень ее внутренней организованности и давая возможность говорить о самоорганизации в данной системе. Итак, все системы можно разделить на системы с обратной связью и без таковой. Наличие механизма обратной связи позволяет заключить о том, что система преследует какие-то цели, т. е. что ее поведение целесообразно.

С отрицательной обратной связью можно связать так называемый принцип Ле Шателье-Брауна (1884 год):

«Если на систему, находящуюся в устойчивом равновесии, воздействовать извне, изменяя какое-либо из условий равновесия (температура, давление, концентрация), то в системе усиливаются процессы, направленные на компенсацию внешнего воздействия».

Введенный изначально для описания процессов физической химии принцип Ле Шателье-Брауна часто употребляется для объяснения и в других областях знания.

Обратимся теперь к проблеме фундаментальности естественных наук, которая фактически сводится к ответу на вопрос: возможно ли в будущем описать социальные процессы на языке биологии, биологические — на языке химии, химические — на языке физики, а физику представить в виде простых математических соотношений? При положительном ответе на этот вопрос мы приходим к понятию **редукционизма**, под которым понимают возможность сведения сложных явлений к более простым, элементарным.

Редукционизм (от лат. *reductio* — возвращение, приведение обратно) — методологический принцип, согласно которому сложные явления могут быть полностью объяснены с помощью законов, свойственных явлениям более простым (например, социологические явления объясняются биологическими или экономическими законами)

Принцип редукционизма гласит, что все более сложные законы развития более сложных уровней реальности должны быть сводимы к законам более простых уровней. Редукционизм абсолютизирует принцип редукции (сведения сложного к простому и высшего к низшему), игнорируя появление эмергентных свойств в системах более высоких уровней организации. Хотя как таковая, обоснованная редукция может быть плодотворной (пример — планетарная модель атома).

Редукционизм являлся и является весьма мощным методологическим принципом в науке, с его помощью были получены важные результаты, позволившие связать, казалось бы, совершенно различные явления. Например, электромагнитная картина мира установила единую природу электрических, магнитных и оптических явлений. Однако, как показало развитие науки, возможности редукционизма не беспредельны: далеко не всегда поведение сложной системы можно свести к простой сумме поведения ее компонентов.

Сложные системы, начиная с определенного уровня организации своей структуры, обнаруживают новые качества, которые не могут быть даже описаны с помощью тех характеристик, которыми пользуются для описания отдельных частей системы. Например, свойства кирпичного здания нельзя свести к свойствам кирпичей хотя бы потому, что из одних и тех же кирпичей можно построить совершенно разные здания. Точно так же из одних и тех же букв алфавита можно составить совершенно разные слова, а значит «свойства» слов не вытекают из «свойств» входящих в них букв. Такие примеры появления нового качества при переходе от простых объектов к сложным можно приводить до бесконечности.

Эмерджентность (эмергентность) (от англ. *emergence* — возникновение, появление нового) в теории систем — наличие у какой-либо системы особых свойств, не присущих её подсистемам и блокам, а также сумме элементов, не связанных особыми системообразующими связями; несводимость свойств системы к сумме свойств её компонентов; синоним — «системный эффект».

В биологии и экологии понятие эмерджентности можно выразить так: одно дерево — не лес, скопление отдельных клеток — не организм. Например, свойства биологического вида или биологической популяции не представляют собой свойства отдельных особей, понятия рождаемость, смертность, неприменимы к отдельной особи, но применимы к популяции или виду в целом. В эволюционистике выражается как возникновение новых функциональных единиц системы, которые не сводятся к простым перестановкам уже имевшихся элементов. В почвоведении: эмерджентным свойством почвы является плодородие. В классификации систем эмерджентность может являться основой их систематики как критериальный признак системы.

Системный подход в науке гласит, о том, что любой объект исследования науки является сложным (т.е. системой).

Система — совокупность взаимосвязанных элементов, образующих целостность или единство, обладающая новыми свойствами, отсутствующими у элементов, из которых она состоит.

Другими словами, любая система имеет структуру (элементы и их связи) и новые свойства.

Системный способ объединения элементов выражает принципиальное единство мира благодаря иерархическому включению систем разных уровней друг в друга, причем каждый элемент любой системы оказывается связанным со всеми элементами всех возможных систем. Например, элементарные частицы образуют атомы. Атомы формируют молекулы. Клетки живых организмов состоят из молекул. Клетки образуют многоклеточные организмы, а из них состоят популяции. Популяции образуют биоценозы и в конечном счете – биосферу Земли. Планета Земля – составная часть Солнечной системы, которая является частью галактики Млечного пути и т.д.

Понятие «элемент» означает минимальный, далее уже неделимый компонент в рамках данной системы. Хотя в других отношениях он сам может представлять сложную систему (например, биоценоз – совокупность взаимосвязанных популяций; популяция – совокупность взаимосвязанных организмов одного вида на данной территории ареала вида; организм – совокупность взаимосвязанных клеток и т.д.)

Система может состоять не только из однородных элементов, но и разнородных. Она может быть по своему строению простой и сложной. Сложная система состоит из элементов, которые в свою очередь образуют подсистемы разного уровня сложности и иерархии.

Свойства системы определяет ее структура – это взаимосвязь и взаимодействие ее частей. Так, кучу камней нельзя назвать системой, в то время как физическое тело, состоящее из большого числа взаимодействующих молекул, - можно.

Упорядоченность системы определяют устойчивые связи.

Исследуя систему, в какой-то момент мы понимаем, что высшие уровни в ней не сводятся к низшим. Исходным пунктом всякого системного исследования является представление именно о целостности изучаемой системы. Целостность системы означает, что все составные части, взаимодействуя и соединяясь вместе, образуют уникальное целое, обладающее новыми системными свойствами. Еще раз повторим, что свойства системы – это не сумма свойств ее отдельных элементов, а совершенно новые свойства, которые присущи только ей как единому целому.

Итак, согласно современным научным взглядам на природу, все природные объекты представляют собой упорядоченные, структурированные, иерархически организованные системы.

В естественных науках выделяют два больших класса материальных систем: системы неживой природы и системы живой природы.

Системы неживой природы: от элементарных частиц, полей и вакуума – до Метагалактики;

Системы живой природы: от информационных молекул (биополимеров) – до биосферы.

В природе все взаимосвязано, поэтому можно выделить и такие системы, которые включают в себя элементы как живой, так и неживой природы – биогеоценозы, и биосферу Земли.

Проникновение в научную методологию принципа системности привело к возникновению еще одной важнейшей концепции – концепции **глобального эволюционизма**.

Идея эволюции живых организмов достаточно быстро получила признание ученых мира благодаря работам И. Гёте, Ж. Ламарка, Ч. Дарвина и др. В настоящее время довольно основательно проработана и постоянно дорабатывается синтетическая теория эволюции (она будет рассматриваться позже). Однако классические фундаментальные науки, прежде всего физика, астрономия, составляющие основу механистической картины мира, довольно долго оставались в стороне от эволюционного учения. Вселенная в целом представлялась равновесной и неизменяемой.

Множество научных открытий XX века постепенно продвинуло концепцию эволюции сначала в астрономию и космологию, затем в химию, геологию.

Современное естествознание проходит под лозунгом «Все существующее есть результат эволюции!» В современной научной картине мира укоренилось представление о всеобщем характере эволюции.

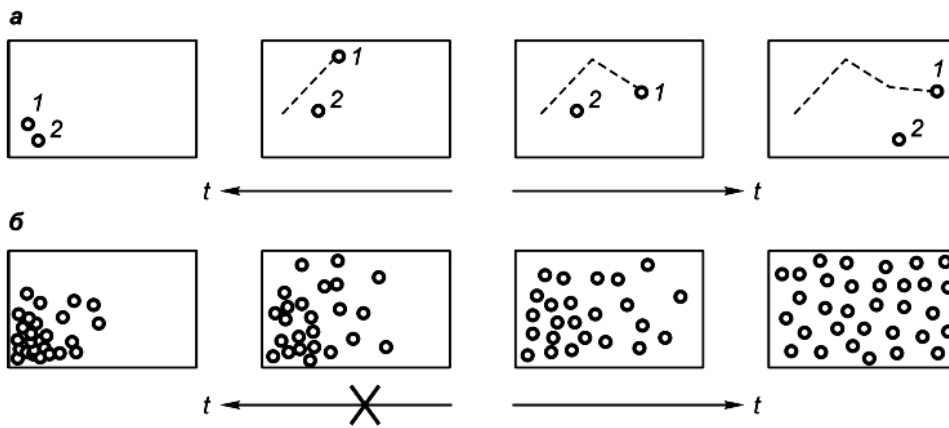
Академик Н.Н. Моисеев определяет универсальный (глобальный) эволюционизм как соединение идеи эволюции с принципами системного подхода, анализом объектов как исторически развивающихся систем.

§5.4 Необратимость в природе и статистическое описание

В классической механике согласно принципу причинности (детерминизма) всякая частица движется по определенной траектории и всегда имеет точечное значение координаты, импульса, энергии. Это позволяет точно описать состояние частицы в любой последующий момент, таким образом, классическая механика так понимает причинно-следственные связи: взаимодействие частиц, определяющее данное состояние механической системы, есть причина, а ее последующее состояние – следствие. Классическая физика имеет дело с обратимыми процессами.

Одной из основных проблем в классическом естествознании долгое время оставалась проблема объяснения физической природы необратимости реальных процессов. Суть проблемы заключается в том, что движение материальной точки, описываемое II законом Ньютона ($F = ma$), обратимо, тогда как большое число материальных точек ведет себя необратимо.

Если число исследуемых частиц невелико (например, две частицы на рисунке а)), то мы не сможем определить, куда направлена ось времени: слева направо или справа налево, так как любая последовательность кадров является одинаково возможной. Это и есть **обратимое явление**. Ситуация существенно меняется, если число частиц очень велико (рис.б)). В этом случае направление времени определяется однозначно: слева направо, так как невозможно представить, что равномерно распределенные частицы сами по себе, без каких-то внешних воздействий соберутся в углу «ящика». Такое поведение, когда состояние системы может изменяться только в определенной последовательности, называется **необратимым**. Все реальные процессы необратимы.



Примеры необратимых процессов: диффузия, теплопроводность, вязкое течение. Почти все реальные процессы в природе являются необратимыми: это и затухание маятника, и эволюция звезды, и человеческая жизнь. Необратимость процессов в природе как бы задает направление на оси времени от прошлого к будущему. Это свойство времени английский физик и астроном А. Эддингтон образно назвал «стрелой времени».

Почему же, несмотря на обратимость поведения одной частицы, ансамбль из большого числа таких частиц ведет себя необратимо? В чем природа необратимости? Как обосновать необратимость реальных процессов, опираясь на законы механики Ньютона? Эти и другие аналогичные вопросы волновали умы самых выдающихся ученых XVIII–XIX вв.

Первоначально проблему необратимости стали серьезно изучать в термодинамике, которая занимается тепловыми явлениями в природе.

После отказа от гипотезы теплорода и перехода к молекулярно-кинетической модели тепловых явлений возникла надежда свести тепловые явления к механическим, что на заре классического естествознания являлось конечной целью любой теории. Формально для этого надо было записать уравнение движения $F = ma$ и задать начальные состояния для каждой молекулы нагретого тела, например газа. Но если вспомнить, что в одном моле идеального газа — а для водорода это всего-навсего 2 г — находится $\sim 10^{23}$ атомов, то понятно, что ни решить такую чудовищно большую систему уравнений, ни, главное, проанализировать полученное решение невозможно. А значит, и природа необратимого поведения при таком механическом подходе к этой проблеме не раскрывается.

Поскольку проследить за движением каждой молекулы газа невозможно, пришлось признать ограниченность своих возможностей и согласиться, что закономерности, наблюдаемые в поведении массы газа как целого, есть результат хаотического движения составляющих его молекул. И тогда Клаузиус ввел «**принцип элементарного беспорядка**», который понимался как независимость координат и скоростей отдельных частиц друг от друга при равновесии.

Первым, кто осознал, что задачу о динамике поведения систем, состоящих из очень большого числа частиц, нужно решать по-другому, был Дж. К. Максвелл. Именно он в 1859 г. ввел в физику понятие вероятности, используемое математиками при анализе случайных явлений. Максвелл исходил из того, что в принципе невозможно не только проследить за изменениями положений и импульсов каждой частицы на протяжении большого интервала времени, но и точно определить импульсы и координаты всех молекул газа или любого другого макроскопического тела в заданный момент времени. Их следует рассматривать как случайные величины,

которые могут принимать различные значения, подобно тому, как при бросании игральной кости может выпасть любое число очков от 1 до 6. Несомненно, что поведение молекул в сосуде гораздо сложнее движения брошенной игральной кости. Но и здесь можно надеяться обнаружить определенные количественные закономерности, если ставить задачу так же, как и в теории игр, а не как в классической механике. Нужно отказаться, например, от неразрешимой задачи определения точного значения импульса молекулы в данный момент, а попытаться найти вероятность того, что этот импульс имеет то или иное значение.

Максвелл решил эту задачу! Но главная его заслуга состояла не столько в решении, сколько в постановке самой задачи. Он ясно осознал, что случайное поведение молекул подчиняется не детерминированным законам классической механики, а вероятностным (или статистическим) законам.

Максвелл указал на принципиальное отличие механики отдельной частицы от механики большой совокупности частиц, подчеркнув, что большие системы характеризуются параметрами (давление, температура и др.), не применимыми к отдельной частице.

В дальнейшем Л. Больцман разработал идею Клаузиуса и создал кинетическую теорию газов, в которой законы термодинамики предстали как следствие более глубоких статистических законов поведения ансамблей, состоящих из большого числа частиц. Классическая статистическая механика получила завершение в работах американского физика Дж. Гиббса, создавшего общий метод расчета термодинамических функций любых систем (а не только газов), находящихся в состоянии равновесия или вблизи него.

Идея элементарного беспорядка, или хаоса, устранила противоречие между механикой и термодинамикой. На основе статистического подхода удалось совместить обратимость отдельных механических явлений (движений отдельных молекул) и необратимый характер движения их совокупности (рост энтропии в замкнутой системе).

Динамический закон – закон, управляющий поведением отдельного объекта и позволяющий предсказать однозначную связь его состояний. **Динамическая теория** – совокупность динамических законов. Динамические теории: классическая механика, классическая теория излучения, релятивистская механика. Динамические теории не учитывают флуктуаций.

Системы, для которых можно однозначно определить состояние в любой момент времени, называются динамическими. Таким образом, поведение динамических систем полностью детерминировано (определено) начальными условиями и действующими силами. Никаких качественных изменений в поведении динамических систем не происходит, просто одно состояние сменяется другим. Такое поведение обратимо в том смысле, что разные направления движения по траекториям не имеют никакого преимущества друг перед другом.

Можно привести много примеров естественных и искусственных объектов, которые с большой точностью могут считаться динамическими. Это космические объекты (звезды, планеты, спутники, космические корабли), артиллерийские снаряды. К динамическим теориям относятся гидро- и аэродинамика. Однозначно предсказуемо поведение термодинамических систем в состоянии равновесия и вблизи него, поэтому и эти системы относятся к динамическим. Динамическими теориями являются классическая электродинамика, теория относительности, теория химического строения и др. Динамические системы — это в определенном смысле

абсолютно упорядоченные системы, поведение которых абсолютно предсказуемо. Никаких случайных изменений состояния таких систем быть не может.

Статистический закон – закон, управляющий поведением больших совокупностей и в отношении отдельного объекта позволяющий делать лишь вероятные выводы о его поведении. Статистическая теория – теория, представляющая совокупность статистических законов. Стат.теории – квантовая механика, квантовая теория излучения, релятивистская квантовая механика. Флуктуации в биологии и соц. науках. Статистические теории фундаментальны.

Еще древние греки, впервые осознавшие и восхитившиеся феноменом порядка, отмечали и противоположное порядку качество — хаос. При хаотическом поведении невозможно установить никакие, даже кратковременные пространственно-временные корреляции между состояниями системы. Другими словами, при хаотическом поведении каждое последующее состояние системы совершенно не зависит от предыдущего, никак с ним не связано. Хаотически ведут себя пылинки в воздухе и цветочная пыльца в жидкости (броуновское движение), языки пламени костра и пузырьки воздуха в кипящей воде и т. д.

И все-таки о поведении хаотически движущихся частиц, если их достаточно много, можно сказать нечто вполне определенное, если описывать их состояние не так, как это делалось в случае динамических систем. Например, при каждом бросании монеты невозможно предсказать, выпадет «орел» или «решка». Однако если бросать монету много раз, то примерно в половине случаев выпадет «орел», а в половине — «решка». Выпадения «орла» в ста случаях из ста практически не будет никогда, вероятность этого ничтожно мала. Отметим, что вместо того, чтобы бросать сто раз одну монету, можно бросить одновременно сто монет. Результат будет тот же: примерно половина монет ляжет «орлом» вверх. Очевидно, чем больше монет, тем с большей точностью половина монет упадет «орлом» вверх.

Таким образом, при абсолютно хаотическом поведении отдельных частиц большой ансамбль таких частиц обнаруживает вполне определенные закономерности в поведении. Но эти закономерности относятся уже не к одной частице, а ко всему ансамблю, и формулируются на языке теории вероятностей. Так мы приходим к понятию статистических закономерностей, статистических систем.

Состояние статистической системы — это прежде всего вероятностная характеристика. Оно определяется не значениями физических или каких-то других величин, а статистическими распределениями этих величин, задаваемыми в той или иной форме, например функцией плотности вероятности. Соответственно в статистических теориях однозначно определяются не сами физические величины, а вероятности того, что значения этих величин лежат внутри тех или иных интервалов. Однозначно определяются также средние значения, средние отклонения и т. д. В этом состоит главная задача статистических теорий.

Подчеркнем, что классические статистические системы, например, газ — это системы из очень большого числа хаотически движущихся частиц, поведение каждой из которых непредсказуемо. А вот все вместе они ведут себя так, что можно однозначно предсказать те или иные статистические характеристики этой системы, например давление газа при определенной температуре.

Важной особенностью статистических систем является необратимость их перехода в равновесное состояние, характеризуемое максимальной энтропией. При этом независимо от начального состояния (начального статистического распределения), система переходит в одно и то же конечное, равновесное состояние,

характеризуемое определенной температурой. В этом состоит смысл второго начала термодинамики или, иначе, закона возрастания энтропии.

Говоря о статистическом, вероятностном описании законов природы, можно упомянуть **соотношение неопределенностей** Гейзенберга и **принцип дополнительности** Бора. Н. Бор сформулировал основополагающий принцип в общем процессе научного познания: При экспериментальном исследовании микрообъектов могут быть получены точные данные либо об их энергиях и импульсах (энергетически-импульсная картина), либо о поведении в пр-ве и времени (пространственно-временная картина). Эти взаимоисключающие картины применяться одновременно не могут, т.к. свойства квантовых объектов запрещают их одновременное использование.

§5.5 Начала термодинамики

Феномены порядка и беспорядка (хаоса) в природе объясняются в физике на основе законов (начал) термодинамики. **Термодинамика** - это раздел физики, изучающий тепловые явления.

Термодинамика сначала исследовала тепловые явления, а после установления закона сохранения и превращения энергии стала изучать также превращения энергии во всех ее формах. Термодинамика основана на трех-четырех утверждениях, которые включили в себя огромный опыт человечества по превращению энергии и называются началами термодинамики. Исторически первым установлено второе начало, потом — первое и третье, а последним — нулевое.

Нулевое начало термодинамики (общее начало термодинамики) — физический принцип, утверждающий, что вне зависимости от начального состояния изолированной системы в конце концов в ней установится термодинамическое равновесие, а также что все части системы при достижении термодинамического равновесия будут иметь одинаковую температуру. Тем самым нулевое начало фактически вводит и определяет понятие температуры.

Первое начало термодинамики называют еще законом сохранения энергии. Приведем его школьную формулировку:

$$Q = \Delta U + A$$

Данная формулировка гласит: «подведенное к системе количество теплоты идет (расходуется) на увеличение внутренней энергии системы и совершение этой системой механической работы».

Согласно этому фундаментальному закону, энергия сохраняется в изолированной системе. Ее количество всегда остается постоянным, превращаясь лишь из одной формы в другую - механическую, тепловую, внутреннюю. Внутренняя энергия складывается из движений атомов, энергии химических связей, электронов. Первый закон термодинамики утверждает, что тепло, сообщенное системе, расходуется на увеличение ее внутренней энергии. Закон не имеет исключений и доказывает принципиальную невозможность создания *вечного двигателя первого рода*, который совершал бы работу больше, чем подводимая к нему энергия (то есть, такой двигатель противоречил бы закону сохранения энергии). Более того, коэффициент полезного действия любого теплового двигателя всегда меньше 100%, так как некоторая часть подводимого тепла к системе неизбежно рассеивается (ΔU можно рассматривать как тепловые потери).

Первое начало термодинамики, связанное с законом сохранения и превращения энергии, акцентирует внимание на внутренней энергии: приращение внутренней энергии при переходе системы из одного состояния в другое складывается из суммы работы внешних сил над системой и количества теплоты, получаемого системой. Оно требует сохранения энергии изолированной системы, но не указывает направления, в котором процессы могут происходить в природе.

Второе начало термодинамики устанавливает направленность всех процессов в изолированных системах. Хотя полное количество энергии сохраняется в любом процессе, распределение энергии изменяется необратимо. Второе начало называют *принципом энтропии*. Теплота переходит самопроизвольно только от более нагретых тел к менее нагретым. Это начало проявилось при преобразовании теплоты в полезную работу, оно сыграло важнейшую роль в преобразовании энергии, запасенной в топливе, в движущую силу. Ограничения, устанавливаемые вторым началом термодинамики, показали, что трудно выделить упорядоченное движение из неупорядоченного. В формулировке Кельвина второе начало таково: «Невозможен процесс, единственный результат которого состоял бы в поглощении теплоты от нагревателя и полного преобразования этой теплоты в работу».

Второе начало термодинамики запрещает существование *вечного двигателя второго рода*, т. е. машины, способной совершать работу за счет переноса тепла от холодного тела к горячему. Второй закон термодинамики указывает на существование двух различных форм энергии - теплоты как меры хаотического движения частиц и работы, связанной с упорядоченным движением. Работу всегда можно превратить в эквивалентное ей тепло, но тепло нельзя полностью превратить в работу. Таким образом, неупорядоченную форму энергии нельзя без каких-либо дополнительных действий превратить в упорядоченную.

Полное превращение механической работы в теплоту мы делаем каждый раз, нажимая на педаль тормоза в автомобиле. А вот без каких-либо дополнительных действий в замкнутом цикле работы двигателя перевести всю теплоту в работу нельзя. Часть тепловой энергии неизбежно расходуется на нагревание двигателя, плюс движущийся поршень постоянно совершает работу против сил трения (на это тоже расходуется запас механической энергии).

Третье начало термодинамики определяет свойства веществ при очень низких температурах, утверждая, что нельзя охладить тела до температуры абсолютного нуля за конечное число процессов. Третье начало фактически постулирует существование наименьшей возможной в природе температуры. Оно предполагает *атомное строение вещества*, тогда как остальные являются обобщением опытных данных и не содержат сведений о какой-либо структуре вещества.

Достоинство термодинамики в том, что она позволяет рассмотреть общие свойства систем при равновесии и общие закономерности установления равновесия, получить многие сведения о веществе, не зная в полной мере его внутреннюю структуру. Ее законы применимы к любому веществу, к любым системам, включающим электрические и магнитные поля и излучение, поэтому они вошли в физику газовых и конденсированных сред, химию и технику, необходимы в геофизике и физике Вселенной, используются в биологии и управлении процессами.

Любые реальные термодинамические процессы необратимы. Например, передача тепла может самопроизвольно происходить только от более горячего тела к менее горячему (технически мы можем заставить тепло перетекать от холодного тела к горячему. Простейший пример реализации такого процесса – холодильник. Но холодильник сам может работать только потребляя энергию извне).

Еще одной формулировкой второго начала термодинамики является следующее утверждение: энтропия замкнутой системы является неубывающей функцией, то есть при любом реальном процессе она либо возрастает, либо остается неизменной.

Понятие энтропии, введенное в термодинамику Р. Клаузиусом, носило первоначально искусственный характер. Выдающийся французский ученый А. Пуанкаре писал по этому поводу: «Энтропия представляется несколько таинственной в том смысле, что величина эта недоступна ни одному из наших чувств, хотя и обладает действительным свойством физических величин, так как, по крайней мере в принципе, вполне поддается измерению».

По определению Клаузиуса, энтропией называется такая физическая величина, приращение которой ΔS равно количеству тепла ΔQ , полученному системой, деленному на абсолютную температуру:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Допустим, мы имеем два тела при разной начальной температуре, которые приведены в тепловой контакт. Покажем, что в этом примере с двумя телами, находящимися в тепловом контакте, энтропия действительно не может убывать. Если тела имеют разные температуры T_1 и T_2 , причем $T_1 > T_2$, то изменение энтропии этой системы ΔS будет складываться из изменения энтропии первого тела ΔS_1 и изменения энтропии второго тела ΔS_2 : $\Delta S_1 = -\Delta Q/T_1$, $\Delta S_2 = \Delta Q/T_2$, $\Delta S = \Delta Q(1/T_1 - 1/T_2) > 0$. Знак минус в первой формуле означает, что первое тело отдает тепло. Таким образом, при перетекании тепла от горячего тела к холодному энтропия системы действительно возрастает или же остается постоянной (при $T_1 = T_2$). «Энтропия является, следовательно, величиной, - продолжает Пуанкаре, - в некотором роде измеряющей эволюцию данной системы или, по крайней мере, указывающей направление этой эволюции».

Людвиг Больцман связал понятие энтропии с понятием термодинамической вероятности: $S = k \ln W$, где k – постоянная Больцмана, W – термодинамическая вероятность.

Опуская математический вывод скажем, что из данной формулы следует: любая система стремится перейти в наиболее вероятное состояние. А наиболее вероятное состояние – это всегда состояние наименьшей упорядоченности. Таким образом, любая изолированная система (не только термодинамическая) стремится перейти из состояния большей упорядоченности (*порядка*) в состояние меньшей упорядоченности (*хаоса*).

В соответствии со вторым законом термодинамики в изолированных системах, т. е. системах, не обменивающихся с окружающей средой энергией, неупорядоченное состояние (хаос) не может самостоятельно перейти в порядок. Таким образом, в изолированных системах энтропия может только расти. Эта закономерность получила название *принципа возрастания энтропии*. Согласно этому принципу, любая система стремится к состоянию термодинамического равновесия, которое отождествляется с

хаосом. Поскольку увеличение энтропии характеризует изменения во времени замкнутых систем, то энтропия выступает в качестве своеобразной *стрелы времени*.

Состояние с максимальной энтропией мы назвали неупорядоченным, а с малой энтропией — упорядоченным. Статистическая система, если она предоставлена самой себе, переходит из упорядоченного в неупорядоченное состояние с максимальной энтропией, соответствующей данным внешним и внутренним параметрам (давление, объем, температура, число частиц и т. д.).

Если система выведена из состояния равновесия (например, в результате флуктуации) и затем предоставлена самой себе, то она возвращается (релаксирует) в равновесное состояние. Статистическая система никогда не будет, в нарушение второго начала термодинамики, самопроизвольно далеко уходить из равновесия в упорядоченное состояние, никогда не будет образовывать структуры, обладающие более низкой энтропией по сравнению с неупорядоченным, равновесным состоянием.

Из этого принципа вытекает пессимистическая гипотеза о *тепловой смерти Вселенной*, сформулированная Р. Клаузиусом и У. Кельвином, в соответствии с которой:

- энергия Вселенной всегда постоянна;
- энтропия Вселенной всегда возрастает.

Таким образом, все процессы во Вселенной направлены в сторону достижения состояния термодинамического равновесия, соответствующему состоянию наибольшего хаоса и дезорганизации. Все виды энергии деградируют, превратившись в тепло, и звезды закончат свое существование, отдав энергию в окружающее пространство. Установится постоянная температура лишь на несколько градусов выше абсолютного нуля. В этом пространстве будут разбросаны безжизненные, остывшие планеты и звезды. Не будет ничего - ни источников энергии, ни жизни.

Такая мрачная перспектива предсказывалась физикой вплоть до 60-х годов XX столетия, хотя выводы термодинамики противоречили результатам исследований в биологии и социальных науках. Так, эволюционная теория Дарвина свидетельствовала, что живая природа развивается преимущественно в направлении усовершенствования и усложнения новых видов растений и животных. История, социология, экономика, другие социальные и гуманитарные науки так же показывали, что в обществе, несмотря на отдельные зигзаги развития, в целом наблюдается прогресс.

Опыт и практическая деятельность свидетельствовали, что понятие закрытой или изолированной системы является достаточно грубой абстракцией, упрощающей действительность, поскольку в природе трудно найти системы, не взаимодействующие с окружающей средой. Противоречие стало разрешаться, когда в термодинамике вместо понятия закрытой изолированной системы ввели фундаментальное понятие открытой системы, т. е. системы, обменивающейся с окружающей средой веществом, энергией и информацией.

§5.7 Понятие о самоорганизации. Синергетика

Наряду процессами уменьшения упорядоченности в природе существуют и противоположные им, а именно процессы, связанные с образованием структур из хаоса. Такие процессы называются процессами самоорганизации. Наиболее явственно и наглядно подобные явления демонстрирует живая природа. Из семечка, посаженного в землю, может вырасти большое растение со сложной структурой (ствол, ветви,

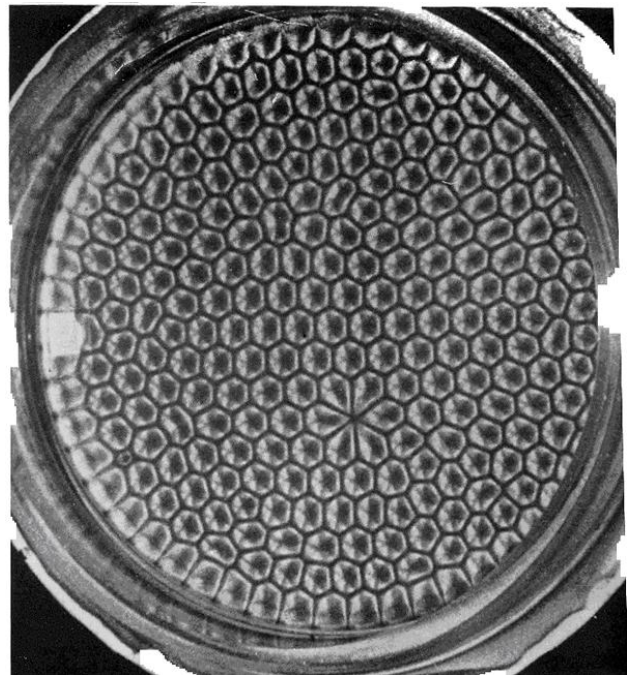
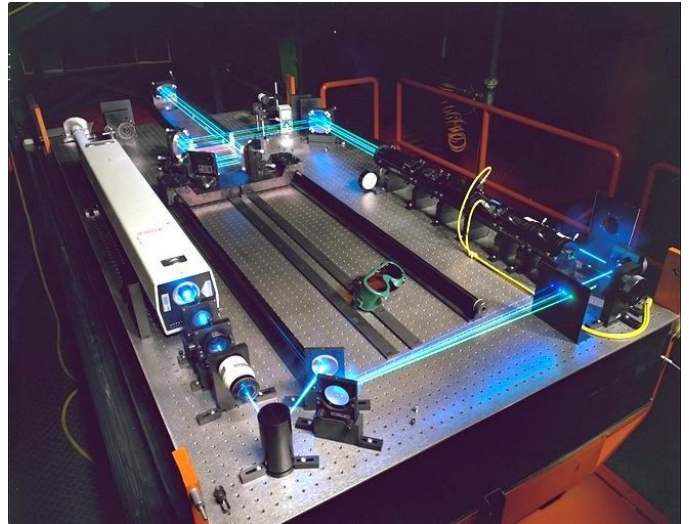
листья, цветы) и вся огромная по сравнению с первоначальным семечком масса этого растения образуется из бесструктурного вещества (вода, углекислый газ, элементы почвы). На первый взгляд такие процессы настолько отличаются от процессов в неживой природе, где в основном проявляются процессы разрушения структур, что долгое время существовало мнение о неприменимости законов физики к описанию живой природы. Тем не менее более пристальный взгляд дает достаточно много примеров процессов самоорганизации и в неживой природе.

Всем знакомые снежинки, обладающие прекрасной высокосимметричной структурой, образуются из бесструктурного водяного пара. В разные дни небо может быть затянуто пеленой облачности, хаотическими облаками (представляющими тем не менее определенные структуры), а также и симметричными (в смысле повторяемости) волнами облаков.

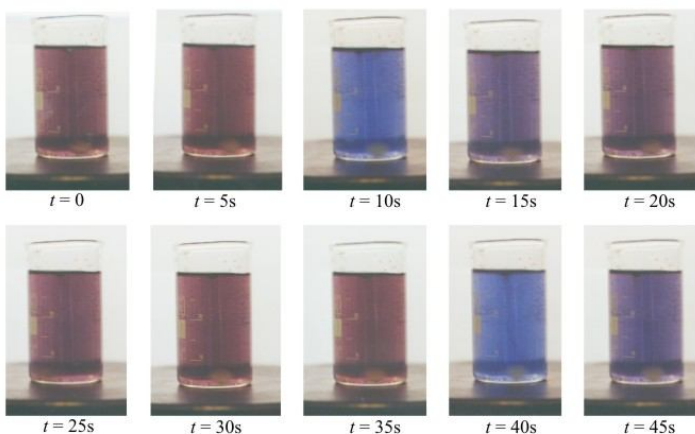
Три самых распространенных примера самоорганизации в физических и химических системах: лазер, ячейки Бенара и реакция Белоусова-Жаботинского.

Классическим примером образования структур из полностью хаотической фазы в лабораторных условиях являются **ячейки Бенара**. В 1900 г. была опубликована статья Ч. Бенара с фотографией структуры, по виду напоминавшей пчелиные соты.

Эта структура образовалась в ртути, налитой в плоский широкий сосуд, подогреваемый снизу, после того как перепад температуры между верхним и нижним слоем жидкости превысил некоторое критическое значение. Весь слой ртути (то же происходит и с другой вязкой жидкостью, например



растительным маслом) распадался на одинаковые вертикальные шестигранные призмы с определенным соотношением между стороной и высотой. В центральной области призмы жидкость поднимается, а вблизи вертикальных граней — опускается. В поверхностном слое жидкость растекается от центра к краям, в придонном — от границ призм к центру. По сравнению с однородным состоянием такие конвективные ячейки, очевидно,



являются более высокоорганизованной структурой.

Примерами образования структур являются автоколебания.

Автоколебания возникают и при некоторых химических процессах. Классическим примером химической реакции этого типа является **реакция Белоусова–Жаботинского**, наблюдавшаяся в смеси серной кислоты, малоновой кислоты, сульфата церия (Ce) и бромида калия. В процессе этой реакции ионы Ce^{4+} , находящиеся в растворе периодически превращаются в ионы Ce^{3+} и затем обратно. Внешне это проявляется в периодическом изменении цвета раствора. В зависимости от концентрации растворенных веществ период колебаний варьируется от 2 до 100 с.

Из приведенных примеров следует, что процессы самоорганизации существуют как в живой, так в неживой природе. Более того, такие процессы выходят за рамки объектов, исследуемых естественными науками, и проявляются и в обществе, живущем по социальным законам. Бесструктурное при первобытно-общинном строе общество в ходе истории трансформировалось в общество со многими иерархическими структурами и объединениями.

Автоколебания возникают в экономике и проявляются в виде периодических подъемов и спадов производства.

В понятии самоорганизации отражается общая тенденция развития Природы: от менее сложных к более сложным и упорядоченным формам организации материи. В более узком понимании самоорганизация есть спонтанный переход открытой неравновесной системы от простых и неупорядоченных форм организации к более сложным и упорядоченным.

Соответствующее научное направление, изучающее феномен самоорганизации в живой природе, выделилось в отдельную область, для которой Г. Хакен (1973) предложил название синергетика. Предметом этой новой области науки было названо изучение общих принципов функционирования систем, в которых из хаотических состояний самопроизвольно возникают упорядоченные пространственные, временные и пространственно-временные структуры. Синергетика призвана построить физическую модель этих процессов и подобрать для их описания адекватный математический аппарат.

Научному мировоззрению в XIX в. была присуща идея развития, которая в физике формировалась под влиянием статической механики и равновесной термодинамики. Эти две классические физические теории описывают поведение **замкнутых систем**, т. е. таких систем, которые не обмениваются ни веществом, ни энергией с другими системами (средой).

Природа иерархически структурирована в несколько видов открытых нелинейных систем разных уровней организации: динамически стабильные, в адаптивные, и наиболее сложные — эволюционирующие системы.

Самоорганизация — это процесс эволюции от беспорядка к порядку. Естественно энтропия системы, в которой происходит самоорганизация, должна убывать. Однако это ни в коей мере не противоречит закону возрастания энтропии в замкнутой системе, то есть второму началу термодинамики. Из приведенных выше примеров видно, что все подобные системы являются открытыми системами, то есть обменивающимися с окружающими их системами либо веществом, либо энергией или и тем, и другим. Понятно, что можно выделить замкнутую систему, в которой происходит самоорганизация. Например, можно представить себе изолированный от излучения звезд космический корабль, в котором произрастают растения. Очевидно, однако, что в любой такой замкнутой системе можно выделить подсистему, в которой

именно и происходит самоорганизация, и энтропия которой убывает, в то время как энтропия замкнутой системы в целом возрастает в полном соответствии со вторым началом термодинамики.

Таким образом, можно сформулировать общее правило: процессы самоорганизации происходят в **открытых системах**, в которых происходит приток энергии и вещества извне. Если самоорганизация происходит в замкнутой системе, то всегда можно выделить открытую подсистему, в которой происходит самоорганизация в то же время в замкнутой системе в целом беспорядок возрастает.

Следующей особенностью является то, что самоорганизация происходит в системах, состояние которых в данный момент существенно отличается от состояния статистического равновесия. Иногда упрощенно говорят, что к самоорганизации способны системы, находящиеся вдали от равновесия. Нарушение статистического равновесия вызывается внешним воздействием. В приведенном выше примере с ячейками Бенара внешнее воздействие — это нагревание сосуда, которое приводит к различию температур в отдельных макроскопических областях жидкости. В электрических генераторах внешнее воздействие — это напряжение, создаваемое источником, которое приводит к отличному от равновесного распределению электронов. То же происходит в оптических квантовых генераторах под воздействием внешней оптической накачки или электрического разряда, происходящего от внешнего источника. Состояние системы, далекой от равновесия, является неустойчивым, в отличие от состояния вблизи равновесия. Именно в силу этой неустойчивости и возникают процессы, приводящие к возникновению структур.

Итак, эти системы должны быть **неравновесными**.

Самоорганизация возможна лишь в системах с **большим числом частиц**, составляющих систему. То есть процесс самоорганизации может происходить, только начиная с определенного уровня сложности системы.

Фундаментальным принципом самоорганизации служит возникновение нового порядка и усложнение систем через **флуктуации** (случайные отклонения) состояний их элементов и подсистем. Только в системах с большим числом частиц возможно возникновение флуктуаций — макроскопических неоднородностей.

Роль флуктуаций в процессах самоорганизации, как мы далее покажем, оказывается весьма важной, поэтому рассмотрим это понятие подробнее. Если мы возьмем макроскопический сосуд, в котором находится порядка десяти молекул, то понятия плотности или давления в такой системе теряют смысл. Эти понятия применимы лишь к сосуду, содержащему большое число частиц, именно в этом случае мы можем измерить давление нашими приборами. При статистическом равновесии, как следует из определения, в различных областях пространства сосуда прибор должен показывать одинаковое давление. Однако оказывается, что в достаточно малых (но макроскопических) областях в какие-то моменты времени это давление, а следовательно, и плотность, отличается от среднего давления и средней плотности в сосуде. Самопроизвольное (спонтанное) отклонение от состояния статистического равновесия и называется флуктуацией. В случае с газом или жидкостью в сосуде флуктуации давления невозможно наблюдать обычными манометрами. Тем не менее, именно такими флуктуациями объясняется броуновское движение.

Самоорганизация основывается на **положительной обратной связи**, в отличие от динамического равновесия систем, которое опирается на отрицательную обратную связь. Флуктуации обычно подавляются во всех динамически стабильных и

адаптивных системах за счёт отрицательных обратных связей, обеспечивающих сохранение структуры и близкого к равновесию состояния системы. Но в более сложных открытых системах, благодаря притоку энергии извне и усилению неравновесности, отклонения со временем возрастают, накапливаются, вызывают эффект коллективного поведения элементов и подсистем и, в конце концов, приводят к «расшатыванию» прежнего порядка и через относительно кратковременное хаотическое состояние системы приводят либо к разрушению прежней структуры, либо к возникновению нового порядка.

Функционирование динамически стабильных, неэволюционирующих, но адаптивных систем — а это и гомеостаз в живых организмах и автоматические устройства — основывается на получении обратных сигналов от рецепторов или датчиков относительно положения системы и последующей корректировке этого положения к исходному состоянию исполнительными механизмами. В самоорганизующейся, в эволюционирующей системе возникшие изменения не устраняются, а накапливаются и усиливаются вследствие общей положительной реактивности системы, что может привести к возникновению нового порядка и новых структур, образованных из элементов прежней, разрушенной системы. Таковы, к примеру, механизмы фазовых переходов вещества или образования новых социальных формаций.

Эволюция систем, способных к самоорганизации, описывается нелинейными уравнениями. Здесь можно говорить о следующей отличительной особенности: **нелинейности**. В задачу данного курса не входит исследование уравнений, поэтому мы не будем давать строгого определения нелинейности, а лишь проиллюстрируем некоторые важные свойства, следующие из нелинейности уравнений.

В системах, эволюция которых описывается линейными уравнениями, малые изменения начального состояния приводят к малым изменениям их конечного состояния через ограниченный промежуток времени. Для систем, описываемых нелинейными уравнениями, такое свойство, вообще говоря, не имеет смысла.

Работая с нелинейными системами, мы вынуждены признавать существование сильной зависимости от начальных условий. Зависимость эту превосходно иллюстрирует детский стишок:

*Не было гвоздя - подкова пропала,
Не было подковы - лошадь захромала,
Лошадь захромала - командир убит,
Конница разбита, армия бежит.
Враг вступает в город, пленных не щадя,
Оттого что в кузнице не было гвоздя.*

(перевод С. Маршака)

В начале 1960-х годов Е. Лоренц, изучая компьютерные модели предсказания погоды, пришел к важному открытию, что уравнения, описывающие метеопроцессы, при почти тех же самых начальных условиях приводят к совершенно разным результатам. А это свидетельствовало о том, что детерминистская система уравнений обнаруживает хаотическое поведение.

В таких случаях применяется термин «эффект бабочки».

Эффект бабочки — термин в естественных науках, обозначающий свойство некоторых хаотичных систем. Незначительное влияние на систему может иметь большие и непредсказуемые эффекты где-нибудь в другом месте и в другое время.

Кроме того под нелинейностью поведения сложных систем мы понимаем и многовариантность будущего системы. Эволюция большинства сложных систем носит нелинейный характер, т. е. для такого типа систем всегда существует несколько возможных вариантов развития. Возникновение структур нарастающей сложности - не случайность, а закономерность. Случайность встроена в механизм эволюции.

Процесс самоорганизации предполагает **нарушение симметрии**. Самоорганизация всегда связана с самопроизвольным понижением симметрии. Красивая симметричная снежинка имеет, тем не менее, более низкую симметрию, чем бесструктурный водяной пар. Идеи такого понижения симметрии получили большое развитие в современной теории микромира, а также при описании фазовых переходов в физике (например, переход из жидкого состояния в кристаллическое). Вообще процессы самоорганизации во многом похожи на фазовые переходы, поэтому часто их называют кинетическими фазовыми переходами.

Возникновение структур в системе происходит, когда нелинейные эффекты, определяющие эволюцию и обусловленные внешним воздействием на систему, становятся достаточными для разрастания флуктуаций, присущих таким системам.

При переходе от неупорядоченного состояния к состоянию порядка все развивающиеся системы ведут себя одинаково (в том смысле, что для описания всего многообразия их эволюций пригоден обобщённый математический аппарат синергетики)

В состояниях, далеких от равновесия, начинают действовать бифуркационные механизмы — наличие кратковременных точек раздвоения перехода к тому или иному относительно долговременному режиму системы — аттрактору. Заранее невозможно предсказать, какой из возможных аттракторов займёт система. Такие критические точки, вблизи которых система ведет себя неустойчиво и осуществляет смену режима развития или движения, называют **точками бифуркации**. Обнаружение феномена бифуркации ввело в физику элемент исторического подхода.

Неустойчивость и неравновесность определяют развитие систем, т. е. последние непрерывно флуктуируют. В особой точке бифуркации (критическое состояние) флуктуация достигает такой силы, что организация системы разрушается. Разрешением кризисной ситуации является быстрый переход системы на новый и более высокий уровень упорядоченности, который получил название диссипативной структуры. Это и есть акт самоорганизации системы.

Скачок — это крайне нелинейный процесс, при котором малые изменения параметров системы (обычно они называются управляющими) вызывают очень сильное изменение состояния системы, ее переход в новое качество. Например, при снижении температуры воды до определенного значения она скачком превращается в лед. Достаточно изменить температуру воды (управляющий параметр) около критической точки перехода всего лишь на доли градуса, чтобы вызвать ее практически мгновенное превращение в твердое тело.

Переход сложной системы из критического состояния в устойчивое неоднозначен. Поскольку флуктуации случайны, то и выбор конечного состояния системы является случайным. Процесс перехода односторонний и необратимый.

Любое описание системы, претерпевшей бифуркацию, требует включения как вероятностных представлений, так и классического детерминизма (линейного и однозначного). Находясь между двумя точками бифуркации, система развивается закономерно, тогда как вблизи точек бифуркации существенную роль играют флуктуации, которые и определяют, какой из путей дальнейшего развития выберет система.

Самоорганизация проявляется в форме общей флуктуации, не имеющей ничего общего со статистическими законами физики. В процессе перехода все элементы системы ведут себя коррелированно, хотя до этого они находились в состоянии хаоса. В неравновесных условиях относительная независимость элементов системы уступает место корпоративному поведению элементов: вблизи равновесия элемент взаимодействует только с соседними, вдали от равновесия — «видит» всю систему целиком и согласованность поведения элементов возрастает.

Если неравновесная, нелинейная система достаточно удалена от точки термодинамического равновесия, то возникающие в ней флуктуации в результате взаимодействия со средой будут усиливаться и, в конце концов, приведут к разрушению прежнего порядка или структуры, а тем самым и к возникновению новой системы. Структуры и системы, возникающие в результате таких процессов, И.Р. Пригожин назвал диссипативными, поскольку они образуются за счет диссипации, или рассеивания, энергии, использованной системой, и получения из окружающей среды новой, свежей энергии.

Таким образом, теория самоорганизации - синергетика - заставляет по-новому взглянуть на соотношение случайного и закономерного в развитии систем, природы в целом. В этом процессе необходимо выделять две фазы: плавную эволюцию, ход которой достаточно закономерен и жестко детерминирован, и скачки в точках бифуркации, протекающие случайным образом и поэтому случайно определяющие последующий закономерный эволюционный этап вплоть до следующего скачка в новой критической точке.

И. Пригожин настаивает на необходимости нового диалога человека с природой. Собственно, по его мнению, этот диалог уже идет и прежде всего в результате изучения механизмов эволюции неживых систем в рамках новой науки - синергетики. «Установившееся в результате ее (науки) успехов, ставшее для европейцев традиционным видение мира - взгляд со стороны. Человек ставит опыты, ищет объяснение их результатам, но сам себя частью изучаемой природы не считает. Он - вне нее, выше. Теперь же начинают изучать природу изнутри, учитывать и наше личное присутствие во Вселенной, принимать во внимание наши чувства и эмоции».

Заслуга синергетики состоит, прежде всего, в том, что она впервые показала, что процессы самоорганизации могут происходить в простейших системах неорганической природы, если для этого имеются определенные условия (открытость системы и ее неравновесность, достаточное удаление от точки равновесия и др.). Чем сложнее система, тем более высокий уровень имеют в ней процессы самоорганизации.

Синергетика отвечает на вопрос, за счет чего происходит эволюция в природе. Везде, где создаются новые структуры, необходим приток энергии и обмен со средой (эволюция, как и жизнь, требует метаболизма). Если в эволюции небесных тел мы видим результат производства, то в синергетике изучается процесс творчества природы. И наконец, синергетика подтверждает вывод теории относительности: энергия творит более высокие уровни организации.

Рекомендуемая литература:

1. Кожевников Н.М. Концепции современного естествознания.
2. Айзек Азимов. Путеводитель по науке: От египетских пирамид до космических станций.
3. Ричард Фейнман. Характер физических законов.
4. Дэвид Боданис. $E=mc^2$. Биография самого знаменитого уравнения в мире.
5. Мартин Гарднер. Теория относительности для миллионов.
6. Стивен Хокинг, Леонард Млодинов. Кратчайшая история времени.
7. Джеймс Трейфил. 200 законов мироздания.

Современная естественнонаучная картина мира. Лекция 4.
Подымов Л.И. УВАУ ГА (И). 2014
podymovl.narod.ru