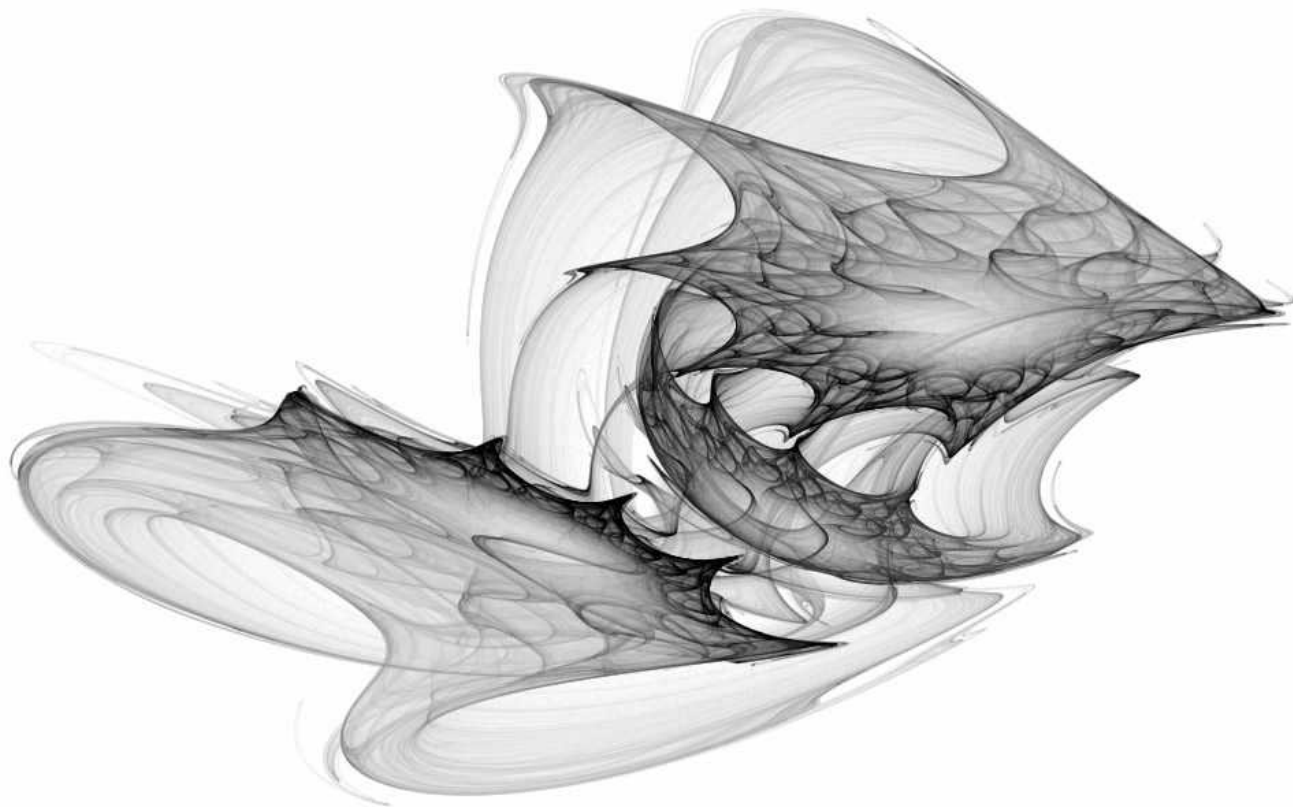


Дальневосточный государственный университет
Институт биологии моря им. А. В. Жирмунского ДВО РАН
НОЦ «Морская биота»

Ю. А. Каретин

Синергетика
Курс лекций для биологов



Владивосток
2007

Лекция 1. Введение. Смена научных парадигм

«Единственное, чему научила меня моя долгая жизнь: что вся наша наука перед лицом реальности выглядит примитивно и по-детски наивно - и всё же это самое ценное, что у нас есть».

А.Эйнштейн

Апологеты науки о хаосе и самоорганизации постулируют смену научной парадигмы, произошедшую во второй половине XX века. Чтоб понять, в чём её суть, надо прояснить, чем занимались, какие вопросы перед собой ставили классическая наука прошлого и наука сегодняшнего дня. Классическая наука, по сути своей, была наукой идеального: эвклидова геометрия описывала идеальные формы, никогда не встречающиеся в реальном мире, механика рассчитывала законы идеального равномерного или равноускоренного движения, биологическая систематика создала абстракцию вида, чтоб свести бесконечное разнообразие индивидуумов к некоей системе. Для того, чтоб из хаоса окружающего мира выделить какую-то информацию, познать этот хаос, различить в нём отдельные объекты, их взаимоотношения, понять и предсказать законы движения этих объектов, нужно выделить эти объекты или явления как целое, найти в них то общее, что отличает их от других объектов, явлений или взаимоотношений, т.е. создать идеальный образ изучаемого явления.

Достаточно просто было использовать достижения классической науки в технике XIX-XX веков: сравнительно просто устроенные механические машины, состоявшие из элементов, созданных на основе идеальных форм эвклидовой геометрии, простое предсказуемое поведение механического или электромеханического движения. Фундаментальная наука классического периода во многом началась с открытий Ньютона, позволивших объяснить равномерно развиваемое ускорение падающего на землю тела, движения планет вокруг солнца и естественных спутников вокруг планет. Искусственные формы, движения классической механики были близки к идеальным. Классическая наука исследовала устойчивые, равновесные, упорядоченные системы, ибо только упорядоченность, предсказуемость, стабильность можно было описать и предсказать. Это были замкнутые системы, или, по крайней мере, они исследовались как замкнутые, для них было характерно линейное поведение; задав начальные параметры и зная формулу, описывающую их движение, можно было рассчитать состояние или положение в пространстве исследуемого объекта (планета или механическое устройство) через любой промежуток времени, как в будущем, так и в прошлом. Их поведение описывалось линейными уравнениями и на графиках выявлялось в виде прямых или предсказуемым образом изогнутых непрерывных линий. Сложнее было с природными формами и явлениями не астрономического и не атомарного масштаба: облака, горы, живые существа, колебания численности популяций и экономические спады и подъёмы, химические реакции с одновременным участием десятков и сотен реагентов, революции, метаморфозы... В XXI веке к этому добавились информационные технологии, настолько сложные электронные устройства, что поведение их до конца предсказать стало не возможно, самособирающиеся наноструктуры и самоорганизующиеся компьютерные сети, попытки создать искусственный разум и смоделировать жизнь... Многое из этого никак не описывалось как замкнутая система, слишком много внешних воздействий накладываясь, влияя друг на друга, изменяли поведение системы самым непредсказуемым образом; поведение этих систем никак нельзя было ни назвать линейным, ни предсказать на какой-либо долгий срок.

Когда-то мир казался принципиально непознаваемым, непредсказуемым, но очень простым, потому что он был создан богом и подчинялся только воле божьей, которая сама непредсказуема и непознаваема для человеческого разума, это снимало многие вопросы познания. Открытия Ньютона пробили большую брешь в традиционном христианском мировоззрении: для описания движения планет оказалось достаточно несколько формул, планеты подчинялись им беспрекословно, а волюнтаризм божьей воли тут никак не проявлялся, что позволило Ньютону вообще отказаться от «теории бога». Предсказуемость движения механических тел вызвала к жизни представление о мире, как о гигантской заводной игрушке, мир стал абсолютно детерминирован и предсказуем. Ведь если любое взаимодействие, любое движение можно описать точной физической формулой, то можно и рассчитать поведение исследуемого объекта на бесконечно долгий промежуток времени, как в прошлом, так и в будущем. Это мировоззрение отразилось в философии французского философа *Лапласа*.

Согласно такой концепции мироустройства, если мы что-то ещё не знаем, что-то не в состоянии предсказать, то это происходит лишь от недостатка информации о начальном состоянии объекта и законов его движения. Получив эту информацию, мы сможем точно рассчитать любое физическое, биологическое, социальное явление. Мало того, неопределённости, свободной воли, случайности в подобном мироустройстве вообще существовать не может. Каждая наша мысль, каждое действие, падение каждого осеннего листа, даже каждый вираж его в воздухе при падении абсолютно предопределён с первого мгновения существования Вселенной. Всё сцеплено жёсткой цепью причинно-следственных взаимодействий, выражаемых в физических формулах и рассчитываемых математически, подобно расчету траекторий движений планет.

В наши дни философия полного детерминизма Лапласа уступила место точке зрения Анри Пуанкаре, принимающей существование принципиальной непредсказуемости, случайности в объективной, физической реальности. Казалось бы, откуда ей взяться, неужели что-то в объективном мире не подчиняется физическим законам, описываемым точными математическими формулами и потому подвластным точному расчёту? С другой стороны, согласитесь, интуитивно точка зрения Лапласа большинству из нас кажется абсурдистской, мы интуитивно принимаем присутствие случайности в этом мире, к тому же нам трудно согласиться с отсутствием в нас необусловленной свободной воли. Бытиё, как заводная игрушка, предопределённое от первого мига существования мироздания до последнего, субъективно представляется нам бессмысленным. Можно поставить вопрос о существовании трёх типов неопределённости, непредсказуемости: непредсказуемость в связи с отсутствием необходимых для точного расчёта данных о начальном состоянии исследуемого явления и законов, описывающих его развитие, этот тип неопределённости – единственный, принимаемый философией Лапласа; непредсказуемость действий разумного одухотворённого существа, исходящая из принципиальной свободы его духа, необусловленности и неподчинения причинно-следственным связям какой-то части его духовного существа, его сознания и воли, доминирование сознания над бытиём, признание такой неопределённости характерно для религиозного мировоззрения; и, наконец – третий тип возможной непредсказуемости истекает из принципиальной невозможности с полной точностью задать начальное состояние описываемого объекта. Для того, чтобы на бесконечно долгий промежуток времени предсказать поведение объекта, необходимо задать его начальное состояние с бесконечной точностью, с точностью до бесконечного количества знаков после запятой – как бы для фиксации такой точности нам не потребовалась вся Вселенная... На последний тип неопределённости и ссылается философия Пуанкаре, находя в ней долгожданную свободу, сокрушение оков абсолютной предопределённости бытия. Точку неопределённости, точку неустойчивого равновесия системы можно представить как шарик, лежащий на острие карандаша: любое небольшое воздействие должно его столкнуть в ту или другую сторону. Теперь представьте себе бесконечно тонкое острие и бесконечно точно уравновешенный на нём шарик, момент равновесия и взаимной аннигиляции воздействий, направленных в противоположные стороны, на какой-то момент возникает в любой неустойчивой системе, выбирающей путь дальнейшего развития; в эти моменты система чувствительна к бесконечно малым воздействиям, даже если этот момент бесконечно мал, что приходит в неустойчивую систему из этой бесконечности? Признание принципиальной непредсказуемости поведения даже простых физических систем, в сущности, и стало основой новой научной парадигмы, нового научного мировоззрения. Классической, линейной физики, математики, химии, биологии для познания мира оказалось недостаточно. Пришлось управляться не только с упорядоченным поведением, но и с хаосом, мало того, хаос, непредсказуемость, свобода выбора оказались необходимы для процессов самоорганизации, лежащих в основе эволюции и приведших к появлению всех сложных систем, включая биологическую жизнь. Выяснилось, что без методологии исследования хаоса, неопределённости невозможно познать и смоделировать процесс естественной эволюции, который всегда есть игра детерминированного бытия на границах хаоса. Признание невозможности построить достоверную картину мира без исследования хаоса и самоорганизации материи привело к смене научной парадигмы, породившей синтетическое, междисциплинарное направление исследований, названное синергетикой, предметом изучения которой и являются процессы хаоса и самоорганизации.

В развитии науки можно условно выделить несколько этапов: это, во-первых, этапы, ведущие от описания формы к познанию сущности исследуемых процессов и явлений, и, во-

вторых, от статичной картины мира к динамической. Вышеназванные этапы взаимосвязаны, так как чем глубже взор проникает в суть устройства мироздания, тем, как правило, более динамична возникающая перед нами картина. Наука начиналась с описания и классификации: если говорить об изучении биологической жизни, можно привести в качестве примера лестницу живых существ Аристотеля, многотомные труды – собрания всех известных исследователю существ, причём как реальных, так и мифических. (Конечно, все глубоко мыслящие исследователи задавались вопросом о законах и причинах существования, но из-за недостатка знаний многое из воззрений описательного периода науки теперь имеет лишь историческую ценность). Постепенно накапливаемые человечеством знания позволили ставить вопрос не только о том, *что* можно наблюдать в окружающем мире, но и *как* устроено, как возникает и функционирует то, что они наблюдают. Познание устройства изменило и принципы описания и классификации, привело к появлению естественных классификационных схем и методологии описания, отражающей реальную сущность явления. Ответом на вопрос «*как*» послужило открытие фундаментальных законов мироздания: закона всемирного тяготения Ньютона, теории относительности Эйнштейна, законов наследственности Менделя, периодической системы элементов Менделеева. Когда причинно-следственные взаимосвязи в ряде наук, каждая из которых исследовала свою грань реальности, стали более или менее проясняться, возникло стремление к созданию единой картины мира, ведь логика причинно-следственных взаимодействий едина, значит, из формул описывающих движение материи в одной сфере можно вывести формулы, описывающие движение материи в сфере другой. Если законы, описывающие разные формы и уровни движения материи, противоречат друг другу, то остаётся лишь признать, что какие-то из этих законов не верны. Пример таких противоречащих друг другу теорий: теория относительности и классическая квантовая физика. Каждая из этих теорий описывает явления, исследуемые в своей сфере, с колоссальной точностью, но попытки соединить их приводят к абсурдным результатам; это значит, необходимо искать новую теорию, которая бы описывала исследуемые феномены столь же хорошо, но была при этом более универсальной. В примере с теорией относительности и квантовой физикой наиболее вероятный кандидат на универсальную теорию – теория струн. Гипотетический конечный этап всеобщего научного объединения – комплекс универсальных теорий, описывающих любые формы движения материи и гладко выводимых друг из друга. Конечно, до этого научному миропознанию ещё далеко, многие естественные и большинство гуманитарных наук пока что находятся на описательной стадии своего развития. В физике же такая универсальная теория, объединяющая всю физическую картину мира, уже существует, правда, скорее, как идея, но ей уже посвящено немало работ, она так и называется: «Теория всего».

Раньше учёных интересовало лишь строение, устройство, принципы организации существующих и исследуемых явлений, но не их возникновение, не их создание (хотя, конечно, для познания устройства вопрос возникновения – это вопрос первостепенной важности). Вопрос возникновения более глубок, сложен, чем вопрос описания уже существующего. Этот вопрос уже предполагает переход от описания статической формы к познанию динамики процесса. Лестница существ Аристотеля была неподвижна. Лестница живых существ Лейбница была создана богом и также в целом неизменна, но некоторые наблюдения в дикой природе и за процессами селекции уже позволили предположить возможность некоторой трансформации существ, созданных богом и возникновение одного вида существ из другого, близкого ему. Правда, незнание законов изменчивости породило мифические воззрения о прямом порождении существами одного вида существ другого.

Ещё более динамичная картина мира, картина подлинного развития природы создавалась французскими материалистами *VIII* века, особенно Дени Дидро. Первым среди натуралистов и философов, кто не мимоходом, не в связи с обсуждением других вопросов, а специально обратился к изучению проблемы эволюции, был Жан-Батист Ламарк. Теория эволюции Чарльза Дарвина, объяснив объективные законы биологической эволюции, ставшие фундаментом всей биологии и превратившие биологию из скопления фактов в науку, окончательно ввела в научное мировоззрение шкалу времени. Большинство процессов, исследуемых наукой того времени, типа простых механических движений, не нуждались в шкале времени, поведение объекта можно было рассчитать как в прошлое, так и в будущее с одинаковой лёгкостью. Эволюция живых существ, как оказалось, не такова: эволюционный процесс оказался однонаправленным и необратимым, живые существа могут потерять и вновь приобрести в эволюции какой-либо признак, но вновь приобретенный признак не будет точной эволюционной копией утраченного, эволюция не пойдёт

вторично однажды пройденным путём, хотя бы потому, что эволюционное приобретение основывается на естественном отборе ряда случайно возникающих генетических мутаций. Возникновение точно такого же ряда мутаций, какое случилось уже однажды, статистически невозможно, это основа односторонности. Статистически невозможно также возникновение ряда обратных мутаций, откатывающих эволюцию «след в след» по уже пройденному пути, это основа необратимости. Почему же шкала времени появилась впервые в биологии? Очевидно, потому, что биология исследует столь сложные системы, каковыми являются все живые системы на всех уровнях своей организации, что физика, химия, математика, другие точные науки лишь только в наше время делают попытки исследовать их с тем уровнем достоверности, который в этих науках принят, пока дойдя до описания «сферического коня в вакууме». По мнению Резерфорда: «Есть только одна наука – математика, остальные – собирание марок». Действительно, математика – основа современного научного миропознания, язык логики, познающий точные причинно-следственные взаимосвязи объективного мира. Но сложность живых систем не позволяет описать или смоделировать их на языке математики с точностью, принятой в физике, оперировавшей всегда моделями гораздо более простых систем. Физик, пытающийся построить модель даже сравнительно простого элемента живой системы, всегда становится перед выбором: либо создать сравнительно точную, по физическим меркам, модель, но такая модель будет иметь мало общего с реально существующей системой, ибо будет исключать великое множество нюансов реального функционирования системы и её взаимодействия с окружающей средой, т.е. это будет моделирование частного, узкого аспекта поведения системы; либо физик может построить общую модель функционирования системы, но она будет иметь такие широкие допуски, что с точки зрения физика будет практически недостоверна. Даже для моделирования отдельных биомолекул и их комплексов сегодня используются мощности только появляющихся суперкомпьютеров, а ведь биомолекулы – это ещё даже не элементарный уровень живого, отдельные биомолекулы не обладают свойством жизни, лишь клетка в целом является элементарной единицей живого. Такая сложность объектов биологических исследований держала биологию на стадии описательной науки до конца XX века. Но эта же сложность позволила разглядеть шкалу времени именно в поведении биосистем, причём как в эволюции, так и в индивидуальном развитии.

Сегодня же эволюционная парадигма распространилась на общее представление об истории мироздания, биологическая эволюция представляется лишь частным этапом эволюции Вселенной, ей предшествовала эволюция физическая (началась с момента большого взрыва, время формирования элементарных частиц, первых атомов), эволюция астрономическая (появление звёзд, планет, галактик), эволюция химическая (возникновение сложных, в том числе органических, молекул на поверхности Земли, сложивших субстрат для зарождения жизни), далее следует эволюция биологическая, которая на сегодняшнем этапе породила эволюцию культурную, реализующуюся в человеческом обществе. Предшествующие этапы эволюции всё ещё продолжаются, они не окончились и, видимо, никогда не окончатся, но каждый последующий этап эволюции возникает на фундаменте предыдущего как надстройка, имеющая качественно новые свойства, и в процессе каждого последующего этапа возникают структуры, многократно превосходящие по своей сложности все структуры предыдущего этапа эволюции. Структуры предыдущих этапов эволюции служат базисом для последующих. Так, живые системы состоят из элементарных частиц (физический этап), объединённых в молекулы (химический этап), их существование напрямую зависит от таких физических условий созданных на планете Земля, как температура, гравитация, минеральный состав среды (астрономический этап). Но жизнь создаёт свою структурную сложность, не являясь «суммой сложностей» составляющих её компонентов, поэтому и законы, управляющие жизнью, не редуцируемы до физико-химического уровня. Справедливости ради надо сказать, что материалистические идеи физической и астрономической эволюции мироздания предшествовали появлению теории биологической эволюции, в качестве примера можно привести «Всеобщую естественную историю и теорию неба» Имануила Канта, вышедшую в 1755 году, но подобные работы не раскрывали всеобщих фундаментальных законов эволюции того уровня организации материи, который рассматривали, это были философские трактаты, каковые можно встретить во многих культурах многих эпох.

Хотя эволюционную парадигму окончательно привнесла в научное мировоззрение биология, шкала времени изначально появилась в одном разделе классической физики: в термодинамике. Согласно второму закону термодинамики, энтропия мира стремится к максимуму. Это значит, что энергия рассеивается, сложное распадается до простого, хаос

неизбежно овладевает миром. Остывший чайник не станет горячим самопроизвольно, капля чернил, растворённая в банке с водой, не соберётся назад в каплю. Но направленность процессов, изучаемых термодинамикой, должна приводить к результатам отличным от тех, которые мы наблюдаем в окружающем нас мире. В процессе эволюции, наоборот, появляются всё более сложные, совершенные и высокоупорядоченные системы. Творения природы и человека поражают своей сложностью и совершенством. Это кажущееся противоречие реальности эволюционирующей вселенной и второго начала термодинамики и должна разрешить синергетика.

Кроме того, эволюционные теории чаще всего объясняют процесс эволюции уже существующих систем и ничего не говорят об их возникновении. А классические теории самозарождения сложных систем, особенно если это касается таких сверхсложных систем, как живые системы, плохо объясняют реальный процесс возникновения системы, теоретически описывая некоторые гипотетические аспекты этого процесса. Пользуясь этими теориями, нельзя реально запустить процесс зарождения, скажем, живой клетки, или точно смоделировать его на компьютере. Действительно работающая теория процессов самозарождения, самоорганизации, и методология, пытающаяся управлять этими процессами, появились лишь в синергетике. Сегодня вопросы самозарождения, самоорганизации, поддержания структурной сложности интересуют не только биологов. Новые вещества, обладающие невиданными ранее физическими и химическими свойствами, состоящие из сложнейших молекулярных структур будет выгодно синтезировать, только если найти методы их самосборки. Самосборка революционно упростит и удешевит процесс создания большого количества технических устройств, состоящих из однотипных деталей молекулярных размеров: микропроцессоры, нанороботы. Вопросы воспроизводства машинами самих себя, самообучения, самоорганизации нейронных сетей - всё это требует также синергетического подхода. В политике государственным устройством, отражающим старое научное мировоззрение, могла бы быть, пожалуй, диктатура, с её попыткой максимального контроля над каждым элементом системы, управление такой системой должно отбирать львиную долю её ресурсов, кроме того, такая система всегда будет искусственной. Демократическое устройство общества гораздо более органично с точки зрения синергетики, поскольку опирается на естественную самоорганизацию социума с учётом природы, потребностей и стереотипов поведения большинства. Синергетический подход предполагает умение находить критические точки в организации социума, приложение к которым небольшого по энергозатратам направленного воздействия будет поддерживать или перестраивать всю организацию социума в целом. К диссидентам, личностям, отрицающим существующую организацию общества или исповедующим взгляды и принципы, отличные от взглядов и принципов большинства, в развитых демократических странах подход чисто статистический. Небольшой процент альтернативной информации или взглядов не в состоянии изменить систему в целом, поэтому на противодействие бывает не целесообразно тратить ресурсы. Кроме того, статистический разброс мнений и моделей поведения, как и разнообразие признаков в популяции, делает систему более устойчивой к внешним и внутренним потрясениям, более лабильной в плане эволюционных изменений. Диктатуры стремятся к тотальному искоренению инакомыслия, что приводит к неоправданным энергозатратам. При приближении к 100% результату затраты усилий на его достижение увеличиваются в логарифмической прогрессии до бесконечности (рис. 1). Чем бы мы не занимались, изучали иностранный язык или истребляли инакомыслящих, на достижение 80% результата у нас уйдёт, допустим, 2 года. Далее, на достижения 90% результата (т.е. чтоб продвинуться вперёд всего на 10%) будет необходимо ещё 2 года, затем у нас уйдёт ещё 2 года, чтоб продвинуться вперёд на следующие 5% и т.д. 100% результат же недостижим никогда, поэтому всегда приходится искать компромисс между качеством и энергозатратами.

Правда, своя логика в страхе инакомыслия тут есть. Диктатура, как искусственная система организации социума, всегда неустойчива, и неустойчивость эта, вызванная накоплением ошибок внутри не самоорганизующейся, жёсткой, ригидной, механической системы постоянно нарастает, так что вскоре становится достаточно небольшого толчка для разрушения, перестройки всей системы.

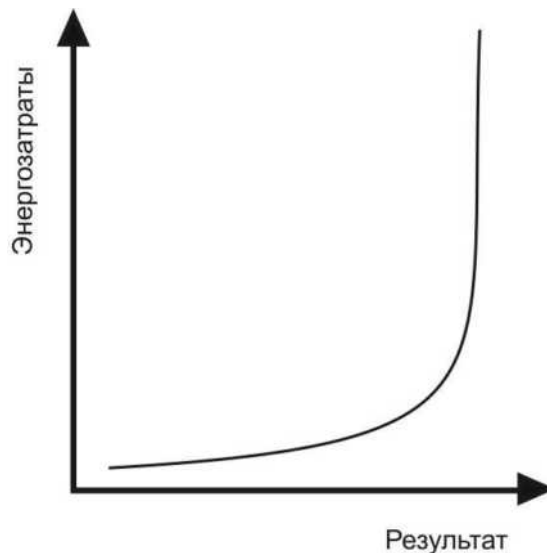


Рис. 1. Кривая зависимости результата от энергозатрат.

Чем отличаются устройства, созданные человеком, от живых структур? Во-первых, конечно, уровнем сложности. Но смогут ли существовать рукотворные творения, сделанные по таким же технологиям, как те, которые используются в современных машинах или компьютерах, имея они уровень сложности живых существ, а тем более, смогут ли они существовать в меняющейся, наполненной хаотичными дестабилизирующими влияниями внешней среде? Очевидно, нет. Перед проблемой сложности уже встали программисты. Когда программный код операционной системы составляет более 5 миллионов строк, а хороший программист делает 1 ошибку, которая остаётся незамеченной, на 100 строк кода, в программе должны накапливаться десятки тысяч неисправленных ошибок, которые делают программу нестабильной или вообще не функциональной. То же относится к современным техническим устройствам. Видимо, принцип организации живых существ принципиально иной: сталкиваясь с разрушающими воздействиями внешней среды, случайными ошибками внутри собственного механизма, они могут компенсировать и исправлять их, не только оставаясь жизнеспособными, но ещё и приспособляясь, совершенствуясь, усложняясь в процессе эволюции. Разгадка жизнеспособности природных биосистем заключается в том, что эти системы – самоорганизующиеся.

Пригодна ли методология традиционной науки для исследования принципов строения самоорганизующихся систем, таких, как живые системы? Традиционная наука оперировала преимущественно аналитическими методами. Организм разрезается на ультратонкие срезы, раскладывается на отдельные биомолекулы, при этом редуцируется до пребиологического уровня. Но, даже если мы детально изучим свойства всех элементов самоорганизующейся системы, этого будет недостаточно для выяснения законов их взаимодействия, организации в целом, для понимания природы возникновения, существования и эволюции целого. Целое больше суммы составляющих его частей, диалектический закон Гегеля о переходе количества в качество ярко проявляет себя в возникновении самоорганизующихся систем. Поэтому понимание природы таких систем требует иной методологии, во-первых, по преимуществу синтетической, объединяющей, а не аналитической, расчленяющей, а во-вторых, способной исследовать их в динамике, поскольку расчленение такой системы на временные элементы разрушает её, замороженная жизнь перестаёт быть жизнью; жизнь, самоорганизация, это процесс, а не форма. Если вы введёте в поисковой строке *Google* словосочетание «моделирование в биологии», то увидите, что 95 % ссылок ведут на сайты, посвящённые синергетическому моделированию. Понимание процессов самоорганизации имеет ключевое значение для создания реальной искусственной жизни или точных компьютерных моделей, достоверно воспроизводящих жизнь в виртуальном пространстве.

Термин «**синергетика**» (от греч. – «согласованное действие») был введён немецким исследователем *Германом Хакеном* в 60-х годах 20 века. *Синергетику можно рассматривать, как науку о коллективном поведении, организованном и самоорганизованном.* Отдельные элементы системы организуются, словно управляемые невидимой рукой, с другой стороны, элементы системы, взаимодействуя друг с другом, сами же создают эту невидимую руку.

Получается круг причинных связей, называющийся **циклической причинностью: параметр порядка** – та сила, которая упорядочивает поведение элементов в системе, организуя систему как целое, создаётся взаимодействием самих же элементов друг с другом.

Иначе, синергетика – наука о самоорганизации, т.е. самопроизвольном возникновении пространственной и временной упорядоченности в открытых, нелинейных системах.

Открытые системы: системы обменивающиеся энергией, веществом и информацией с окружающей средой.

Нелинейное поведение: поведение, определяющееся нелинейной зависимостью от переменных, математически описываемое нелинейными уравнениями. При изменении значения одной из переменных значения других переменных, характеризующих систему, могут меняться не пропорционально изменению первой, часто бывает трудно предсказать, как поведёт себя нелинейная система при изменении, добавлении или изъятии одного из составляющих: это может привести к коллапсу или полному изменению всей системы, а может не оказать на систему практически никакого эффекта. Вообще, идея нелинейности включает в себя многовариантность, альтернативность выбора путей эволюции и её необратимость. (Линейная динамическая система, в отличие от нелинейной, функционирует вблизи одного стационарного состояния, не зависящего от времени – как, например, свободное колебание маятника). Подсистемы линейной системы слабо взаимодействуют между собой и практически независимо входят в систему. Изменение ответа линейной системы на внешнее воздействие почти пропорционально этому воздействию. Линейные системы обладают свойством аддитивности, при котором целая система сводима к сумме составляющих её частей.

= = = = =

|| **J** ||

|| **Нелинейный эффект:** ||

|| Девушка собирает в лесу за час 2 ||

|| килограмма ягод, парень – 3 ||

|| килограмма. Но не факт, что ||

|| вместе они соберут 5 килограмм. ||

= = = = =

Системы, исследуемые нелинейной наукой, также называются сложными, или **эмерджентными** (*emerge* – возникать), их свойства не сводимы к свойствам компонентов, они проявляют, при своём возникновении, вновь возникающие или эмерджентные черты, новые свойства, которые практически не проявляются у компонентов системы, исследуемых в отдельности.

В дальнейшем мы увидим, что закономерности возникновения порядка из хаоса ничуть не зависят от материального субстрата, ставшего сценой для наблюдаемых событий. В этом смысле лазер ведёт себя так же, как и группа клеток или конвекционные потоки жидкости. Очевидно, мы здесь имеем дело с проявлением одного и того же феномена. Мы обнаруживаем, что коллективное поведение отдельных индивидуумов (будь это атомы, молекулы, клетки, животные или люди) определяется ими же самими в ходе их взаимодействия друг с другом: через конкуренцию, с одной стороны, и кооперацию, с другой. Все жизненные процессы, начиная с внутриклеточных и заканчивая теми, что происходят в человеческом обществе, неизменно связаны и переплетены друг с другом, причём все участвующие в этих процессах элементы прямо или опосредованно взаимодействуют между собой. Таким образом, мы постоянно имеем дело с чрезвычайно сложными, комплексными системами. Однако синергетические модели, описывающие процессы самоорганизации, часто оказывается много проще классических физических моделей, т.к. нам не нужны исчерпывающие сведения обо всех нюансах строения и поведения элементов системы, мы редуцируем степень сложности системы, исследуя только параметры порядка. В этом нам помогает то обстоятельство, что параметры порядка проявляются при макроскопических изменениях в поведении системы и представляют собой величины долгоживущие.

Общность принципов самоорганизации делает синергетику междисциплинарной областью исследований, синергетический подход используется во всех естественных, гуманитарных, точных науках, изучающих процессы, протекающие в сложных системах. Но изначально синергетика, которую иначе ещё называют “*nonlinear science*”, или наука, исследующая нелинейные явления, появилась как область физико-математических исследований, поэтому теоретический фундамент синергетики включает в себя такие направления, как нелинейная термодинамика, теория катастроф, теория динамического хаоса, фрактальная геометрия. Сегодня исследователь в области естественных наук может рассматривать синергетику как комплекс методологий, позволяющих исследовать сложные структуры и процессы, и эти методологии доступны для понимания и использования и биологу, и химику, и

гуманитарно, не имеющих фундаментального физического образования. Конечно, использование этих методологий предполагает освоение общих принципов синергетики.

Сегодня, если поискать в базах данных научных публикаций, можно найти тысячи статей синергетического направления, появляющиеся ежемесячно, постоянно растёт ряд периодических изданий, самые старые и известные из которых: *Nonlinear World*; *Nonlinearity*; *Journal of Nonlinear Science*; *Physica D. Nonlinear Phenomena*; *Chaos*; *Chaos, Solitons and Fractals*; *Fractals*; *International Journal of Bifurcation and Chaos*. Синергетику начинают преподавать в школах, в том числе российских (московская школа №363; <http://sins.xaos.ru>), выпущено пособие для учителей: «*Fractals for classroom*» (Peitgen et al., 1992). В России преподавание курсов нелинейной динамики, синергетики, динамического хаоса, фрактальной геометрии проводится в Московском Физтехе, Московском, Санкт-Петербургском, Дальневосточном, Саратовском, Нижегородском государственных университетах. Введя в поисковой строке *Google* слова и словосочетания: фрактал (fractal), хаос (chaos), биологические модели (biological models), генетические алгоритмы (genetic algorithms), нейронные сети (neuron nets), искусственный разум (AI, artificial intelligence), клеточные автоматы (CA, cellular automata) будем находить тысячи и тысячи ссылок на сайты синергетической направленности, как научно-популярные, так и чисто научные, отдельных исследователей и целых институтов, пестрящие фантастическими образами фрактальной геометрии, наполненные эволюционирующими существами, живущими в виртуальных мирах и моделями самоорганизации. Весь материал по теме данного курса: сами пособия, основная литература, программы, галереи изображений, презентации можно получить на CD или DVD у лектора.

Вопросы для самопроверки.

1. В чём заключается и какие предпосылки имеет смена научной парадигмы, приведшая к появлению синергетики? (Какие цели ставили перед собой учёные разных эпох, каковы практические приложения старой и новой науки. Анализ и синтез в науке. Рождение эволюционного принципа в науке.)
2. Мир Лапласа и мир Пуанкаре: в чём различие между ними?
3. Дайте определение «синергетики».
4. Что такое циклическая причинность и параметр порядка? (Почему поведение элемента системы отлично внутри системы и вне её, почему система не равна лишь сумме составляющих её элементов)
5. Какие системы называют открытыми, какое поведение нелинейным?
6. Что такое эмерджентные системы?
7. Почему познание биологической жизни невозможно без синергетического подхода, а возможно лишь изучение отдельных её элементов?
8. Что включает в себя нелинейная наука?
9. Почему синергетика это столь междисциплинарное направление исследований?
10. Какая традиционная область физики изучала процессы, имеющие шкалу времени, необратимые, и как её постулаты расходились с эволюционными представлениями?

Лекция 2. Самоорганизация в неживых системах

«Вот видишь, все куда-то движется и во что-то превращается, чем же ты недовольна?»
Л. Кэрролл «Алиса в стране чудес»

Как было сказано в предыдущей главе, в традиционной науке долгое время отсутствовала шкала времени, практически вся классическая физика занималась обратимыми процессами. Исключение составляла термодинамика. Сложное разрушалось до простого, газ рассеивался, жидкости диффундировали и смешивались, энергия переходила в тепло и необратимо рассеивалась в пространстве, нагретые предметы остывали.

К концу XIX века гениальному австрийскому физiku Людвигу Больцману (1844-1906) удалось найти ответ на вопрос, почему процессы в природе протекают в определённом направлении. Ответ этот гласил: *все процессы в природе движутся в сторону увеличения неупорядоченности.*

Понятия беспорядка и упорядоченности в физике сходно с таковым в обыденном сознании. Под хаосом, беспорядком подразумевается, что каждый из предметов может находиться в различных, непредсказуемых местах, в результате найти что-либо в такой системе и управлять ей становится не просто. Беспорядок связан с множеством возможностей взаиморасположений предметов, если характеризовать систему в целом, можно сказать, что система может находиться во множестве состояний беспорядка. «Порядок» же подразумевает единственное, заданное заранее расположение или поведение предметов, элементов внутри системы; возможно лишь одно состояние порядка. Иначе говоря, система в состоянии хаоса имеет множество степеней свободы, увеличение степеней свободы в системе подразумевает увеличение хаоса в ней. Хотя абсолютный хаос есть абсолютная симметрия, уровень информации в системе – нулевой. Условно, на двумерной плоскости бумаги его можно отобразить так, как на рисунке 2. Если представить себе наблюдателя, путешествующего через эту систему, то такой наблюдатель не сможет определить, какое расстояние и в каком направлении он прошёл, не сможет вернуться назад и узнать точку, из которой вышел: система полностью симметрична и однородна (точки на рисунке лишь символизируют абсолютную симметрию и однородность, но, конечно, не представляют её в точности).

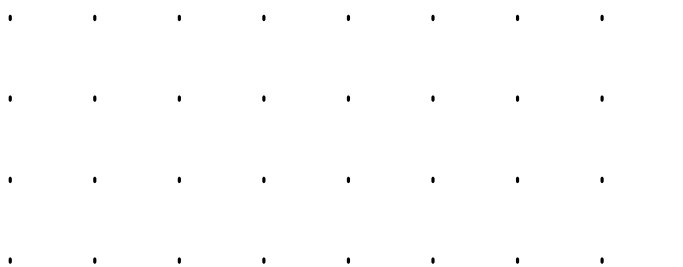


Рис. 2. Двумерный прообраз абсолютного хаоса – абсолютной симметрии.

Реализацией абсолютно хаотичного поведения в природе нам представляется броуновское, тепловое движение частицы (рис. 3). Но каков будет общий вектор движения такой частицы через достаточно большой, в идеале бесконечно большой промежуток времени, в каком направлении она сместится относительно своего начального положения, постоянно беспорядочно перепрыгивая то в одну, то в другую сторону, удаляясь, возвращаясь назад? Нетрудно догадаться, что общий вектор смещения броуновски движущейся частицы будет нулевым, она равновероятно будет смещаться во всех направлениях, векторы, направленные в противоположные стороны, складываясь, будут взаимоуничтожать друг друга, статистически такая частица будет неподвижна, и систему таких частиц в замкнутом пространстве можно отобразить тем же рисунком 2. В открытой системе различная плотность частиц внутри системы и вне нее уже

является общей асимметрией для системы, граничные частицы находятся в других условиях по сравнению с частицами, располагающимися во внутренних областях системы, различие вероятности соударений с другими частицами направляет вектор движения частиц за пределы системы, в пространство с их меньшей концентрацией.

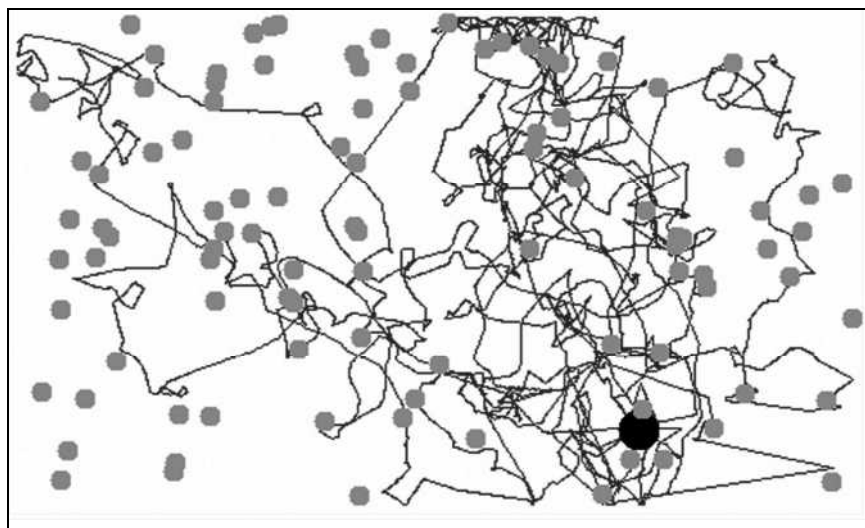
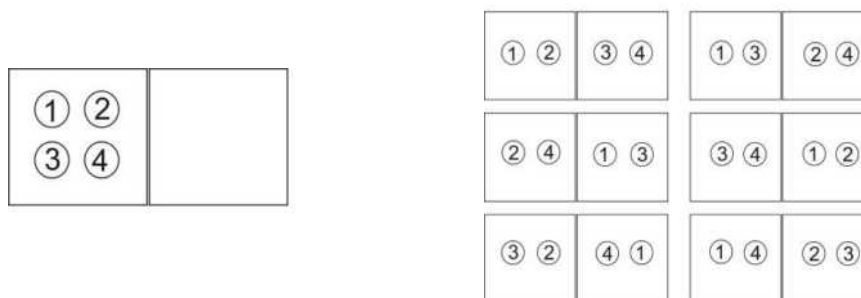


Рис. 3. Движение броуновской частицы (показан путь чёрной частицы).

Наглядно продемонстрировать, как множество возможностей или степеней свободы определяет меру неупорядоченности в физике, можно на простом примере. Рассмотрим модель газа, состоящую всего из 4 молекул, которые мы обозначим цифрами от 1 до 4. Допустим, мы должны распределить этот газ по двум камерам. Существует всего *одна* возможность поместить все молекулы в одну камеру (на рис. 4а) и целых *шесть* различных вариантов того, как это можно сделать, распределив молекулы попарно по двум камерам (рис. 4б). На макроскопическом уровне мы имеем, собственно, всего два варианта: в одном случае все молекулы находятся в одной камере, а во втором – поделены пополам и находятся в разных камерах. *Принцип Больцмана гласит, что природа стремится к таким состояниям, при которых имеется наибольшее количество осуществимых вариантов.* Используемое физиками понятие «*энтропия*» определяется, по Больцману, количеством таких возможностей, а точнее, логарифмом этого числа. Итак, *природа стремится к состоянию максимальной энтропии.* Мы знаем, что по законам диффузии броуновски движущиеся частицы стремятся распределиться статистически равномерно между всеми сообщающимися камерами.



а.

б.

Рис. 4. Демонстрация принципа вычисления наибольшей энтропии по Больцману.

Другой пример увеличения степеней свободы в системе – резкое торможение автомобиля с нагревом тормозных колодок и покрышек. Во время направленного движения автомобиля все его части, в том числе атомы и молекулы, из которых состоят покрышки, имеют один общий вектор движения, хотя и продолжают совершать хаотичные тепловые движения, тем не менее, наличие одного общего вектора движения, одной степени свободы характеризует эту систему как низкоэнтропийную. При резком торможении от трения нагреваются покрышки, энергия однонаправленного движения автомобиля переходит в тепловую энергию хаотичного,

беспорядочного движения атомов покрышек. Мириады атомов движутся в различных направлениях, совершая тепловые колебания. Получается, что система, имеющая одну степень свободы, стала системой, имеющей огромное число степеней свободы. Согласно принципу Больцмана, это наиболее вероятное состояние системы. Автомобиль может затормозить, нагревая при этом свои покрышки, но вероятность того, что все атомы покрышек вдруг, хаотично двигаясь, перейдут к однонаправленному движению, и их тепловая энергия, таким образом, станет энергией направленного вращения колёс, хоть и отлична от нуля, но практически неосуществима. Именно из-за высокой энтропии, хаотичности тепловой энергии её считают мёртвой энергией, это неиспользуемая, неуловимая энергия, рассеиваемая в пространство при любых энергетически зависимых процессах. КПД лампочки, двигателя внутреннего сгорания, гидротурбины далеки от 100% именно потому, что не вся энергия, перерабатываемая ими, идёт на совершение полезной работы, большинство энергии уходит в пространство в виде тепла. Большинство энергозависимых процессов прекращаются вследствие теплового рассеяния содержащейся в системе и требуемой для совершения работы энергии.

Из принципа Больцмана легко выводится **второй закон термодинамики**, в формулировке Клаузиуса звучащий так: «*Энтропия мира стремится к максимуму*». Второй закон термодинамики рождает идею «тепловой смерти» Вселенной. Мир, подчинённый второму началу термодинамики – это мир разрушающийся, все его сложные системы деградируют, распадаются до простых, энергия равномерно рассеивается в пространстве и становится мёртвой, не способной на совершение какой-либо работы, количество информации, содержащейся в системе, уменьшается до нуля, мир остывает и становится абсолютно хаотичным. Но, хотя повседневный опыт и любые физические эксперименты подтверждают непреложность второго начала термодинамики, которому подчинено всё во Вселенной, как же объяснить тот факт, что вокруг нас столько бесконечно сложно организованных, низкоэнтропийных структур, в том числе мы сами и наш разум способный написать и понять эти строки – структуры, появившиеся в ходе эволюции мироздания, почему-то не распадающегося, а непрерывно усложняющегося.

Синергетика – наука о самоорганизации. Можно предположить, что всё во Вселенной создано предельно низкоэнтропийным источником организации материи – богом, который сам существовал вечно, и поэтому вопрос о возникновении этого источника низкой энтропии даже не стоит перед научным мировоззрением. Но если мы отвергаем эту теорию, значит, нам придётся предположить, что помимо законов рассеяния и разрушения, материи присущи законы самоорганизации, формирования этих структур без «помощи» из-за пределов Вселенной. Простейшие примеры такой самоорганизации – фазовые переходы.

Самый известный фазовый переход – изменение конформационного состояния вещества, переход из твёрдого в жидкое и из жидкого в газообразное состояние при изменении температуры. **Фазовый переход** – *скачкообразное изменение физических свойств системы при непрерывном изменении внешних условий*. Во время фазового перехода изменяются лишь взаимодействия атомов вещества, то есть изменяется взаимодействие элементов системы между собой, но это ведёт к кардинальной перестройке всей системы в целом, изменению физических свойств вещества.

Другой пример фазового перехода – появление у ряда веществ свойства сверхпроводимости при охлаждении до определённой температуры. Например, ртуть становится сверхпроводником при охлаждении до $4,2^{\circ}\text{K}$. Ток, пущенный по такой сверхохлаждённой ртути, сохраняется в ней бесконечно долго, т.к. не встречает сопротивления. Фазовый переход, приводящий к появлению сверхпроводимости, происходит скачкообразно при понижении температуры до $4,2^{\circ}\text{K}$, выше этой температуры ртуть имеет своё естественное сопротивление, в точке $4,2^{\circ}\text{K}$ сопротивление падает до нуля. Ртуть может находиться либо в одном, либо в другом фазовом состоянии, переходное состояние неустойчиво, и не существует сколь либо продолжительное время (рис. 5).

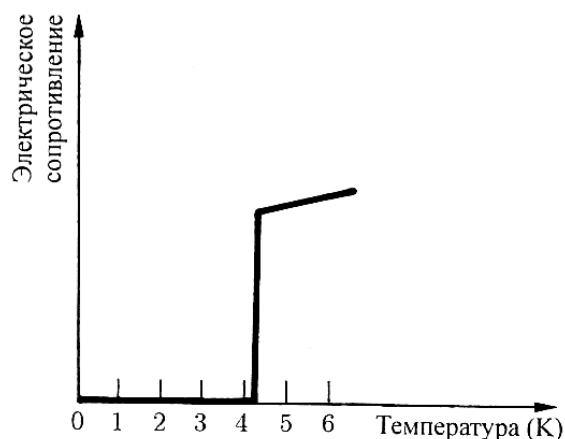


Рис. 5. График зависимости электрического сопротивления ртути от температуры. При температуре ниже критической (здесь это $4,2^{\circ}$ выше абсолютного нуля) электрическое сопротивление полностью отсутствует; выше же этой отметки сопротивление принимает некоторое конечное значение.

Третий пример изменения фазового состояния, который мы рассмотрим – исчезновение намагниченности ферромагнетика при нагревании до $+774^{\circ}\text{C}$. В этом примере изменение макроскопических свойств также объясняется процессами, протекающими на микроскопическом уровне. Исследуя структуру магнитов, физики обнаружили, что они состоят из элементарных «магнитиков», которыми оказались сами атомы железа, (точнее, их электроны). Элементарные магниты связаны между собой определёнными силами. Однако, если одноимённые полюса обычных, макроскопических, магнитов отталкиваются друг от друга, то элементарные магниты обладают как раз противоположным свойством, и их одноимённые полюса притягиваются. Иначе говоря, элементарные магниты выстраиваются в определённом порядке, сохраняя одинаковую ориентацию. Объяснить такое необычное поведение можно лишь с привлечением работ *Гейзенберга* в области квантовой теории. При повышении температуры до $+774^{\circ}\text{C}$ и выше, тепловое движение атомов расстраивает симметричную ориентацию элементарных магнитов и общая намагниченность исчезает. Фазовое состояние вещества меняется. При охлаждении ниже критической температуры силы, упорядочивающие ориентацию элементарных магнитов, начинают преобладать над силами теплового движения, и фазовое состояние скачкообразно возвращается в прежнее состояние.

Теоретически, можно плавно приближаться к точке фазового перехода с бесконечно высокой точностью, уточняя параметры среды, при которых он совершается, при очень точном приближении достаточно будет поднять или опустить температуру, скажем, на миллионную долю градуса, чтобы фазовый переход совершился. Правда, иногда температура, при которой фазовое состояние изменяется в одну сторону, может, как ни странно, отличаться от температуры, при которой в оно изменяется в другую. Это связано с энергетической устойчивостью стабильных фазовых состояний, так что для разрушения существующего состояния нужно приложить дополнительную энергию, превышающую порог энергии, при котором вещество может находиться в новом состоянии, когда это состояние будет достигнуто. Пример: сохранение жидкого состояния переохлаждённой жидкости в отсутствии кристаллической «затравки», начального центра кристаллизации. Если бросить в такую жидкость кристаллик, вокруг мгновенно начнётся процесс кристаллизации и вся жидкость кристаллизуется.

Выяснено, что фазовые переходы, несмотря на различие в характере субстанций и феноменов, всё же подчиняются одинаковым закономерностям и сопровождаются одними и теми же основными проявлениями – такими, например, как *критические флуктуации* (несмотря на видимую мгновенность фазовых переходов, в точке перехода, когда, при изменении условий, состояние системы становится неустойчивым, система «тестирует» иные устойчивые состояния, например в жидкости при охлаждении могут формироваться молекулярные комплексы, которые станут центрами кристаллизации, но какой комплекс не разрушится, а сформирует кристалл, ставший центром кристаллизации всей жидкости, предсказать невозможно) или *нарушение симметрии* (кристаллическое состояние вещества кажется более симметричным и более упорядоченным одновременно, почему же упорядочение связывают с нарушением симметрии? В газообразном состоянии частицы вещества совершают броуновские движения, общий вектор которых, как было сказано выше, равен нулю, это состояние абсолютно симметрично во всех