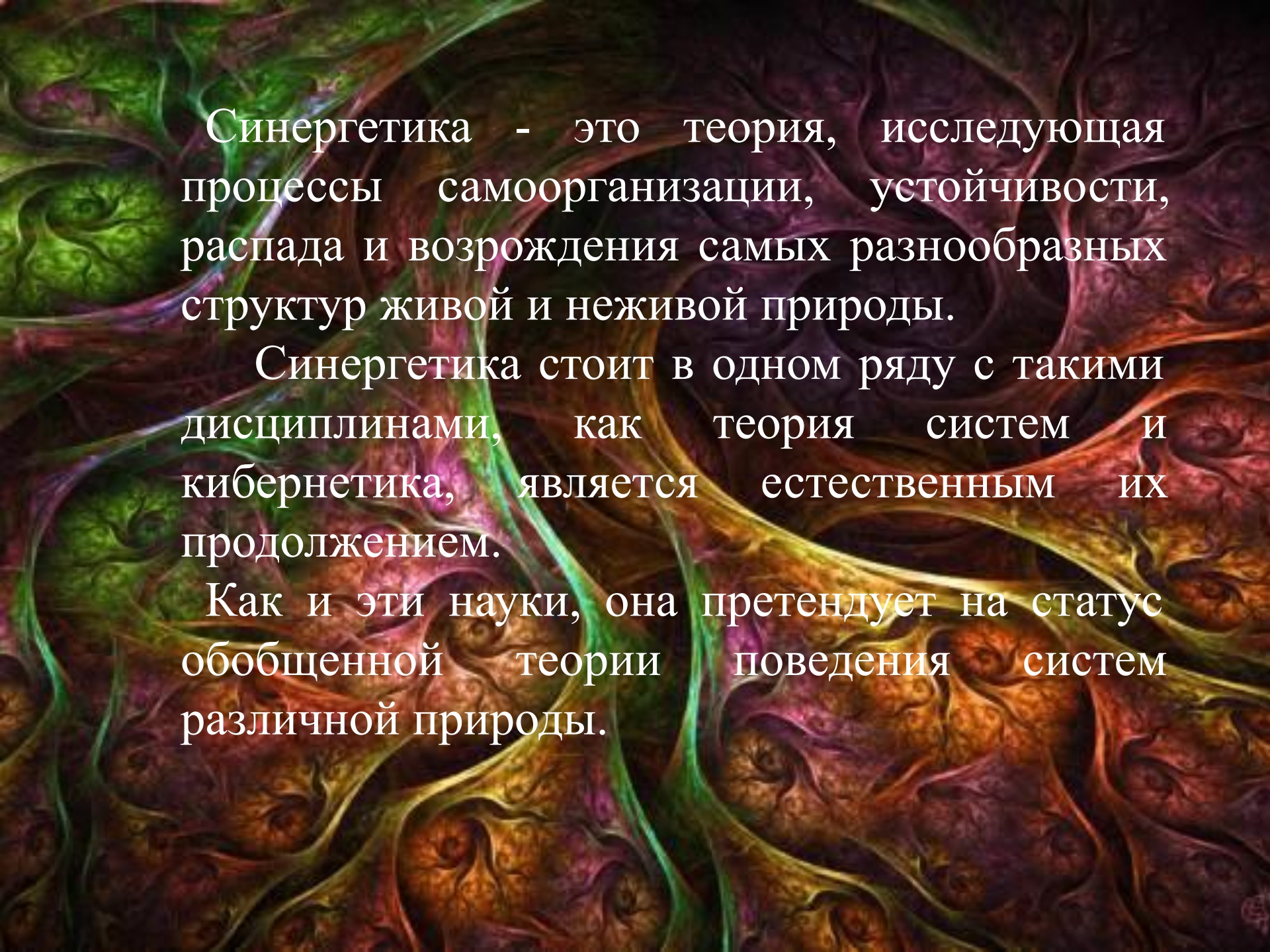




СИНЕРГЕТИКА

Синергетика (от др.-греч. (от др.-греч. συν- - приставка со значением совместности и ἔργον — «деятельность») - междисциплинарное (от др.-греч. συν- - приставка со значением совместности и ἔργον — «деятельность») - междисциплинарное направление научных исследований, задачей которого является изучение природных явлений и процессов на основе принципов самоорганизации (от др.-греч. συν- - приставка со значением совместности и ἔργον — «деятельность») - междисциплинарное направление научных исследований, задачей которого является изучение природных явлений и процессов на основе принципов самоорганизации систем (состоящих из *подсистем*).

«...Наука, занимающаяся изучением процессов



Синергетика - это теория, исследующая процессы самоорганизации, устойчивости, распада и возрождения самых разнообразных структур живой и неживой природы.

Синергетика стоит в одном ряду с такими дисциплинами, как теория систем и кибернетика, является естественным их продолжением.

Как и эти науки, она претендует на статус обобщенной теории поведения систем различной природы.

Предмет, методы и школы синергетики

Область исследований синергетики чётко не определена и не ограничена, её интересы распространяются на все отрасли естествознания. Общим признаком является рассмотрение динамики любых необратимых процессов и возникновения принципиальных новаций. Математический аппарат синергетики скомбинирован из разных отраслей теоретической физики: нелинейной неравновесной термодинамики, теории катастроф, теории групп, тензорного анализа, дифференциальной топологии, неравновесной статистической физики. Существуют несколько школ, в рамках которых развивается синергетический подход:

Школа нелинейной оптики, квантовой механики и статистической физики Германа Хакена, с 1960 года профессора Института теоретической физики в Штутгарте. В 1973 году он объединил большую группу учёных вокруг шпрингеровской серии книг по синергетике, в рамках которой к настоящему времени увидели свет 69 томов с широким спектром теоретических, прикладных и научно-популярных работ, основанных на методологии синергетики: от физики твёрдого тела и лазерной техники и до биофизики и проблем искусственного интеллекта.

Физико-химическая и математико-физическая Брюссельская школа Ильи Пригожина - формулировались первые теоремы (1947 г), разрабатывалась математическая теория поведения диссипативных структур (термин Пригожина), раскрывались исторические предпосылки и провозглашались мировоззренческие основания теории самоорганизации, как парадигмы универсального эволюционизма. Эта школа, основные представители которой работают теперь в США, не пользуется термином «синергетика», а предпочитает называть разработанную ими методологию «теорией диссипативных структур» или просто «неравновесной термодинамикой», подчёркивая преемственность своей школы пионерским работам Ларса Онзагера в области необратимых химических реакций (1931 г).

Синергетика (это понятие означает кооперативность, сотрудничество, взаимодействие различных элементов системы)

по определению ее создателя Г. Хакена - занимается изучением систем, состоящих из многих подсистем самой различной природы, таких как электроны, атомы, молекулы, клетки, нейтроны, механические элементы, фотоны, органы животных и даже люди...

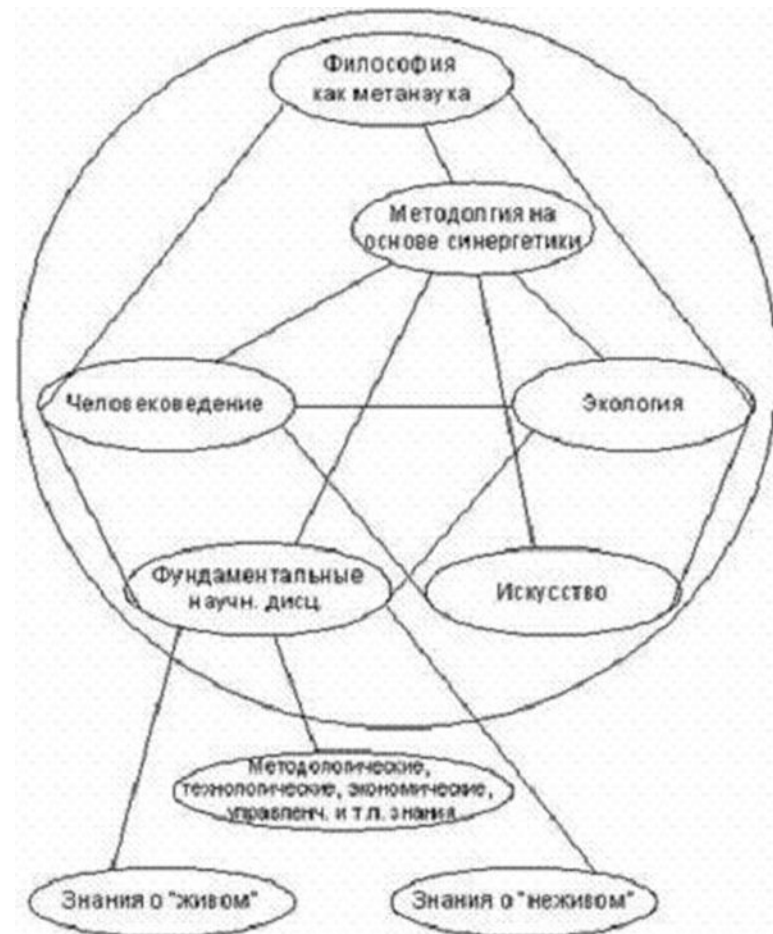
Это наука о самоорганизации простых систем, о превращении хаоса в порядок.

В синергетике возникновение упорядоченных сложных систем обусловлено рождением коллективных типов поведения под воздействием флуктуаций, их конкуренцией и отбором того типа поведения, который оказывается способным выжить в условиях конкуренции.

Хакен: «... это приводит нас в определенном смысле к своего рода обобщенному дарвинизму, действие которого распространяется не только на органический, но и на неорганический мир.»

Объект изучения синергетики, независимо от его природы, обязан удовлетворять следующим требованиям:

- 1) открытость - обязательный обмен энергией и (или) веществом с окружающей средой;
- 2) существенная неравновесность - достигается при определенных состояниях и при определенных значениях параметров, характеризующих систему, которые переводят ее в критическое состояние, сопровождаемое потерей устойчивости;
- 3) выход из критического состояния скачком, в процессе типа фазового перехода, в качественно новое состояние с более высоким уровнем упорядоченности.



Примеры синергетических систем

Скачок - это крайне нелинейный процесс, при котором малые изменения параметров системы (обычно они называются управляющими параметрами) вызывают очень сильные изменения состояния системы, ее переход в новое качество.

При снижении температуры воды до определенного значения она скачком превращается в лед. Около критической точки перехода достаточно изменить температуру воды (управляющий параметр) на доли градуса, чтобы вызвать ее практически мгновенное превращение в твердое тело.

Первоначально сферой приложения синергетики была квантовая электроника и радиофизика. Примером самоорганизации может служить система, изучаемая в разделах квантовой электроники,- лазер - создает высокоорганизованное оптическое излучение.

(Традиционные источники света - лампы накаливания, газоразрядные лампы - создают оптические излучения за счет процессов, подчиняющихся статистическим законам. Так, в нагретой до высокой температуры среде возбужденные атомы и ионы спонтанно излучают кванты света с различными длинами волн во всех направлениях. Только малую часть из них мы воспринимаем как видимый свет. Уровень организации подобной среды крайне низок, упорядоченность мала).

Для лазерной активной среды, которая должна находиться в сильно неравновесном состоянии, характерна высокая упорядоченность атомных, ионных или молекулярных избирательно возбуждаемых состояний, что достигается направленным введением в среду организованного потока энергии (накачка). При выполнении определенного условия в среде лавинообразно нарастает вынужденное излучение почти монохроматических квантов света, движущихся в одном направлении. Лазерная генерация возникает скачком после того, как плотность вводимой в среду энергии накачки превысит пороговое значение, зависящее от свойств активной среды, характера накачки и параметров оптического резонатора, в который помещают активную среду для усиления эффекта. Излучение выходит в виде узконаправленного луча.

Подобные же процессы есть в химии - смешивание жидкостей разных цветов, когда попеременно получается жидкость то красного, то синего цвета; в биологии - мышечные сокращения, электрические колебания в коре головного мозга, явление морфогенеза (отдельные клетки бывают только недифференцированными, специализация развивается в соответствующем окружении других клеток), динамика популяций (временные колебания численности видов) и т.д.

Специфика самоорганизующихся систем

Самоорганизующиеся системы обретают присущие им структуры или функции без какого бы то ни было вмешательства извне.

Обычно эти системы состоят из большого числа подсистем.

При изменении определенных условий, которые называются управляющими параметрами, в системе образуются качественно новые структуры.

Эти системы обладают способностью переходить из однородного, недифференцированного состояния покоя в неоднородное, но хорошо упорядоченное состояние или в одно из нескольких возможных состояний.

Этими системами можно управлять, изменяя действующие на них внешние факторы.

Поток энергии или вещества уводит физическую, химическую, биологическую или социальную систему далеко от состояния термодинамического равновесия.

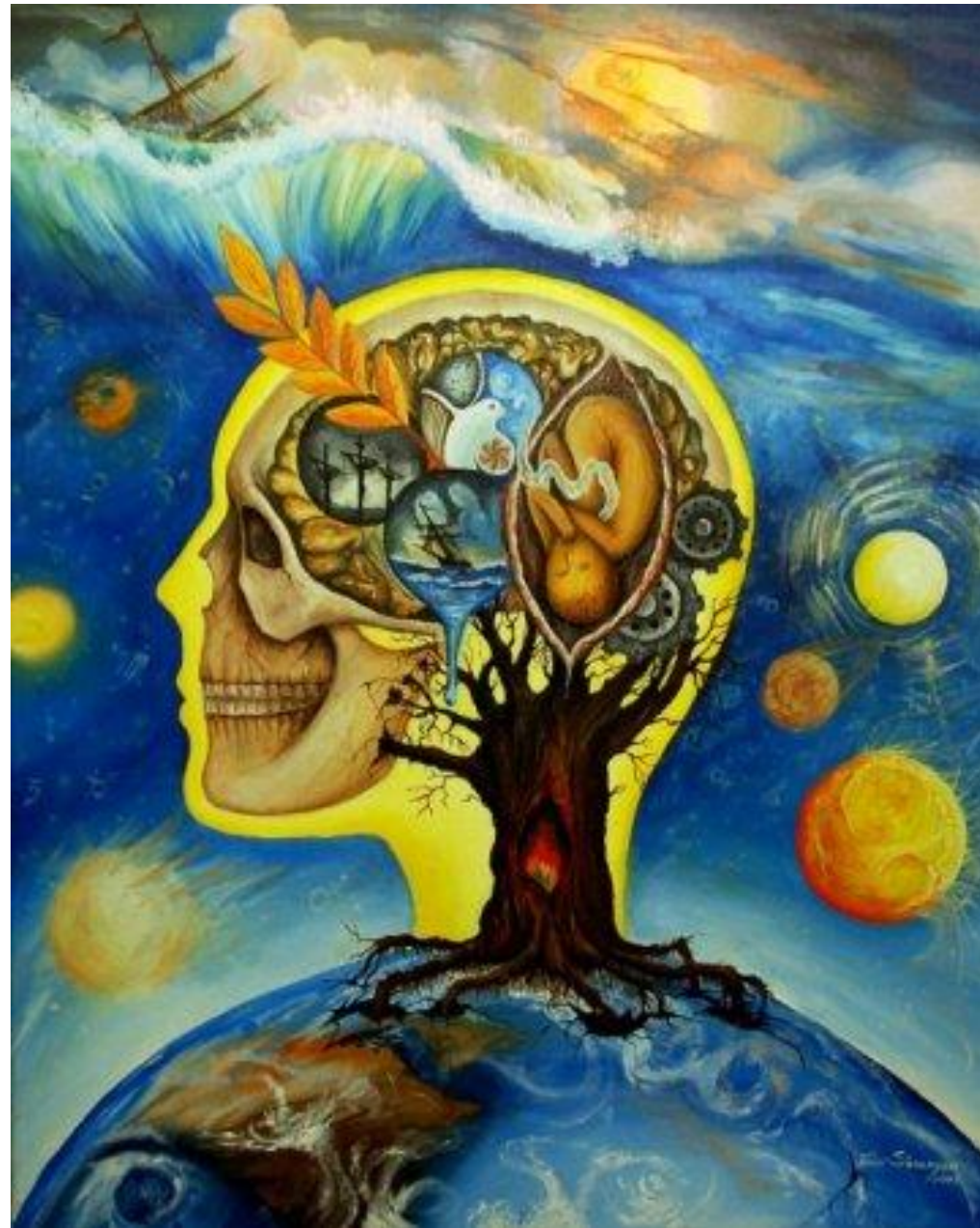
Изменяя температуру, уровень радиации, давление и т.д., мы можем управлять системами извне.

Самоорганизующиеся системы способны сохранять внутреннюю устойчивость при воздействии внешней среды, они находят способы самосохранения, чтобы не разрушаться и даже улучшать свою структуру.

Чтобы система могла не только поддерживать, но и создавать упорядоченность из хаоса, она непременно должна быть открытой и иметь приток энергии и вещества извне.

Такие системы названы Пригожиным диссипативными.

Весь доступный нашему познанию мир состоит именно из таких систем, и в этом мире повсюду обнаруживается эволюция, разнообразие форм и неустойчивость.



В ходе эволюционного этапа развития диссипативная система достигает в силу самого характера развития состояния сильной неравновесности и теряет устойчивость. Это происходит при критических значениях управляющих параметров, и дальнейшая зависимость происходящих процессов от действующих сил приобретает крайне нелинейный характер.

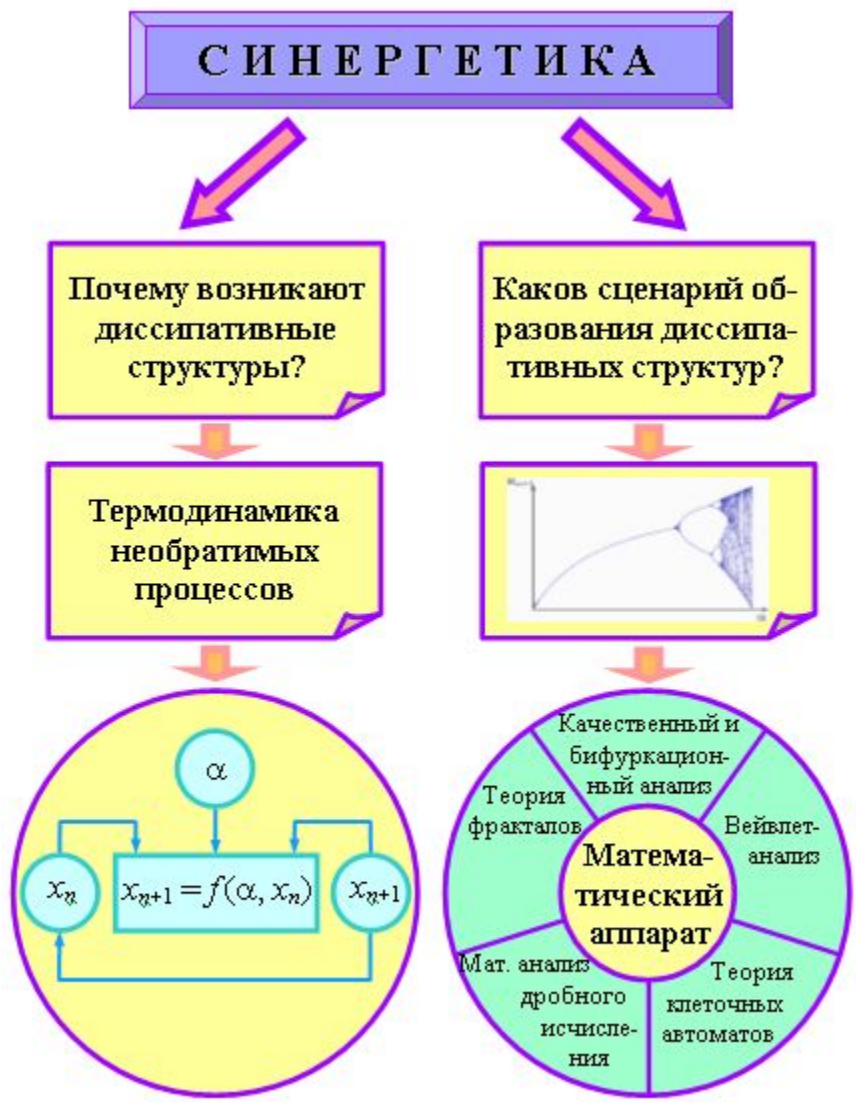
Разрешением возникшей кризисной ситуации служит быстрый переход диссипативной системы в одно из возможных устойчивых состояний, качественно отличающихся от исходного. Пригожин трактует такой переход как приспособление диссипативной системы к внешним условиям, чем обеспечивается ее выживание. Это и есть акт самоорганизации системы.

Самоорганизация проявляется в форме гигантской коллективной флуктуации, которая не имеет ничего общего со статистическими законами физики. В состоянии перехода элементы системы ведут себя коррелированно, хотя до этого они пребывали в хаотическом движении.

Неравновесные фазовые переходы синергетических систем, включающие в себя колебания, пространственно-временные структуры и хаос, отличаются несравненно большим разнообразием, чем фазовые переходы систем, находящихся в состоянии теплового равновесия.

В отличие от кибернетики, занимающейся разработкой алгоритмов и методов, позволяющих управлять системой так, чтобы та функционировала заданным образом, синергетика изучает самоорганизацию системы при произвольном изменении управляющих параметров.

В отличие от теории динамических систем, которая игнорирует флуктуации в точках бифуркации, синергетика занимается изучением стохастической динамики во всей ее полноте в подпространстве зависящих от времени управляющих параметров.



В замкнутых, изолированных и близких к равновесию системах протекающие процессы, согласно второму началу термодинамики, стремятся к *тепловому хаосу*, т.е. к *состоянию с наибольшей энтропией*.

В открытых системах, находящихся далеко от состояний термодинамического равновесия, могут возникать упорядоченные пространственно-временные структуры, т.е. протекают *процессы самоорганизации*.

Структуры-аттракторы показывают, куда эволюционируют процессы в открытых и **нелинейных** системах.

Для всякой сложной системы, как правило, существует определенный набор возможных форм организации, дискретный спектр структур-аттракторов эволюции.

Критический момент неустойчивости, когда сложная система осуществляет выбор дальнейшего пути эволюции, называют точкой бифуркации.

Вблизи этой точки резко возрастает роль **незначительных** случайных возмущений, или флуктуаций, которые могут приводить к возникновению новой макроскопической структуры.

Структуры самоорганизации, обладающие свойством самоподобия, или масштабной инвариантности, *называют фрактальными структурами*.



В процессе временной эволюции синергетическая система, находящаяся в одном состоянии, переходит в новое состояние (старое состояние утрачивает устойчивость).

При описании перехода из одного состояния в другое не все параметры состояния имеют одинаковое значение, и одни параметры состояния (быстрые переменные) можно выразить через другие (медленные переменные), которые называются параметрами порядка, в результате чего количество независимых переменных уменьшается.

Возможность представления быстрых переменных в виде функций параметров порядка составляет содержание синергетического принципа подчинения.

Основное понятие синергетики - определение структуры как состояния, возникающего в результате многовариантного и неоднозначного поведения таких многоэлементных структур или многофакторных сред, которые не деградируют к стандартному для замкнутых систем усреднению термодинамического типа, а развиваются вследствие открытости, притока энергии извне, нелинейности внутренних процессов, появления особых режимов с обострением и наличия более одного устойчивого состояния.

В обозначенных системах неприменимы ни второе начало термодинамики, ни теорема Пригожина о минимуме скорости производства энтропии, что может привести к образованию новых структур и систем, в том числе и более сложных, чем исходные.

Этот феномен трактуется синергетикой как всеобщий механизм повсеместно наблюдаемого в природе направления эволюции: от элементарного и примитивного - к сложносоставному и более совершенному.

Задача синергетики - выявление и познание общих закономерностей, управляющих процессами самоорганизации в системах различной природы (электронов, атомов, молекул, клеток, нейронов, механических элементов, органов животных, людей, транспортных средств и пр.).

Задача синергетики - выяснение законов построения организации, возникновения упорядоченности (принципы построения организации, ее возникновения, развития и самоусложнения).

В нее входят такие области как нелинейная динамика, хаос, фракталы, катастрофы, бифуркации, волны, солитоны, полевые эффекты и т.д.

Предмет синергетики - анализ, вскрывающий причину неожиданного явления.

Метод (или математический аппарат), который используется в синергетике - теория динамических систем.

Причина, обусловившая создание синергетики - необходимость при решении ряда задач науки и техники анализировать сложные процессы различной природы, используя при этом новые математические методы.

Важная *особенность* синергетических систем - ими можно управлять извне, изменяя действующие на системы факторы.

Временная эволюция синергетических систем зависит от причин, которые не могут быть предсказаны с абсолютной точностью.

Даже небольшое различие в начальных условиях в корне изменяет последующую эволюцию системы (*«эффект бабочки»*, от известного рассказа Р. Брэбэри).

Непредсказуемость эволюции синергетических систем получила название *стохастичности*.

По классификации РФФИ синергетика, в настоящее время, относится к разряду философских наук.

Синергетика — это научная дисциплина, которая рассматривает закономерности процессов системной интеграции и самоорганизации в различных системах.

В отличие от системного подхода, где основное внимание акцентируется на связях частей в целом, синергетика исследует причины свойств системы. В системном подходе анализ ведется, как правило, на качественном уровне.

Синергетика:

- изучает *количественные отношения и параметры.*
- исследует *системы, состоящих из большого (очень большого, огромного) числа частей, компонент или подсистем, другими словами, деталей, сложным образом взаимодействующих между собой.*
- изучают *общие закономерности процессов перехода от хаоса к порядку и обратно (процессов самоорганизации и самопроизвольной дезорганизации) в открытых нелинейных системах физической, химической, биологической, экологической, социальной и др. природы.*

Синергетика - не единственное научное направление, которое занимается изучением сложных систем. Но используемые в синергетике понятия делают синергетический подход уникальным, причем не только в концептуальном, но и в операциональном плане.

В отличие от других научных направлений, обычно возникавших на стыке двух наук, когда одна наука давала новому направлению предмет, а другая - метод исследования, синергетика опирается на сходство математических моделей, игнорируя различную природу описываемых ими систем

Одним из разделов синергетики является физика автоматизированных сред и протекающих в них автоволновых процессов. Эти процессы происходят в любых открытых системах (биологических, физических, социальных и т.п.), то есть системах, далеких от термодинамического равновесия, в которых приток энергии осуществляется извне.

Термин «Синергетика» был введен в 1969 Г. Хакеном.

Как научное направление близка:

- нелинейная динамика,
- теория сложных адаптивных систем,
- теория диссипативных структур (И. Пригожин),
- теория детерминированного хаоса, или фрактальная геометрия (Б. Мандельброт),
- теория автопоэзиса (Х. Матурана и Ф. Варела), теория самоорганизованной критичности (П. Бак),
- теория нестационарных структур в режимах с обострением (А.А. Самарский, С.П. Курдюмов).
- современный этап развития идей кибернетики (Н. Винер, У.Р. Эшби) и системного анализа, в т.ч.

Термин «Синергетика» иногда используется как обобщенное название научных направлений, в рамках которых исследуются процессы самоорганизации и эволюции, упорядоченного поведения сложных нелинейных систем. построения общей теории систем (Л. фон Берталанфи).

Проблема	Научное решение	Методология	Авторы	Время
Детерминистический подход не объясняет функционирования сложных целостностей	Системная методология	Тектология	А.А. Богданов	Начало XX в.
		Теория систем	Л. фон Берталанфи	40–50-е гг. XX в.
		Кибернетика	Н. Винер	40–50-е гг. XX в.
Проблема порядка-хаоса	Методология открытости, самоорганизации	Теория диссипативных систем	Брюссельская школа (И. Пригожин и др.)	60–70-е гг. XX в.
		Синергетика	Г. Хакен	70-е гг. XX в.

В России

Концептуальный вклад в развитие синергетики - академик [Н. Н. Моисеев](#) - идеи универсального эволюционизма и [коэволюции](#) человека и природы.

Математический аппарат [теории катастроф](#), пригодный для описания многих процессов [самоорганизации](#), разработан российским математиком [В. И. Арнольдом](#) и французским математиком [Рене Томом](#).

В рамках школы академика [А. А. Самарского](#) и члена-корреспондента РАН [С. П. Курдюмова](#) разработана теория самоорганизации на базе математических моделей и вычислительного эксперимента (включая теорию развития в [режиме с обострением](#)).

Синергетический подход в [биофизике](#) развивается в трудах членов-корреспондентов РАН [М. В. Волькенштейна](#) и [Д. С. Чернавского](#).

Синергетический подход в теоретической истории развивается в работах Д. С. Чернавского, [Г. Г. Малинецкого](#), [Л. И. Бородкина](#), [С. П. Капицы](#), [А. В. Коротаева](#), С. Ю. Малкова, [П. В. Турчина](#), [А. П. Назаретяна](#) и др.

Приложения синергетики распределились между различными направлениями:

-теория [динамического хаоса](#) исследует сверхсложную упорядоченность, напр. явление [турбулентности](#);

-теория [детерминированного хаоса](#) исследует хаотические явления, возникающие в результате детерминированных процессов (в отсутствие случайных шумов);

-теория [фракталов](#) занимается изучением сложных самоподобных структур, часто возникающих в результате самоорганизации. Сам процесс самоорганизации также может быть фрактальным;

-теория [катастроф](#) исследует поведение самоорганизующихся систем в терминах [бифуркация](#), [аттрактор](#), [неустойчивость](#);

-лингвистическая синергетика и прогностика.

Синергетический подход в естествознании

Основные принципы

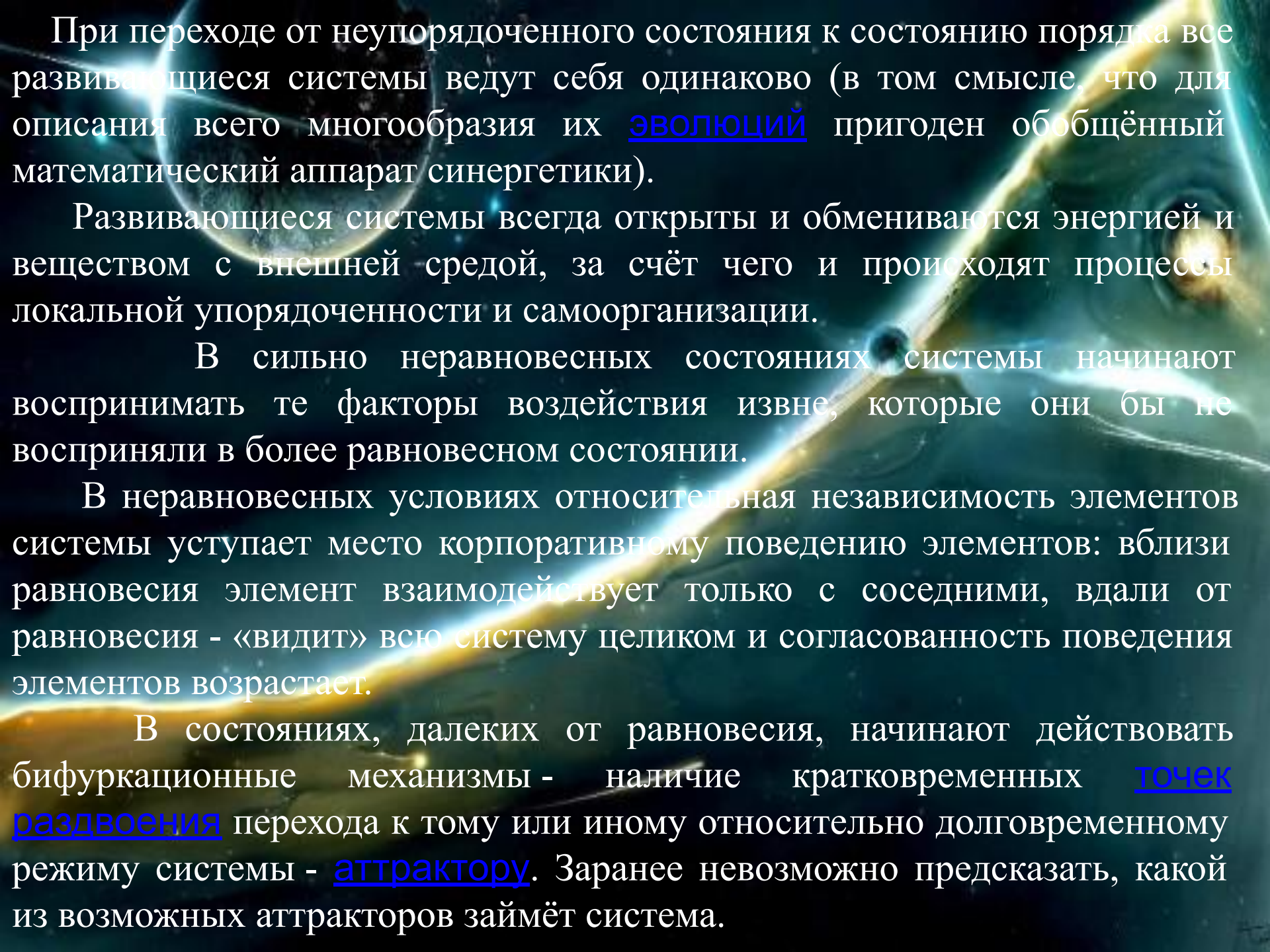
Природа иерархически структурирована в несколько видов открытых нелинейных систем разных уровней организации: в динамически стабильные, в адаптивные, и наиболее сложные - эволюционирующие системы.

Связь между ними осуществляется через хаотическое, неравновесное состояние систем соседствующих уровней.

Общее для всех эволюционирующих систем: неравновесность, спонтанное образование новых микроскопических (локальных) образований, изменения на макроскопическом (системном) уровне, возникновение новых свойств системы, этапы самоорганизации и фиксации новых качеств системы.

Неравновесность является необходимым условием появления новой организации, нового порядка, новых систем, т.е - **развития**.

Когда нелинейные динамические системы объединяются, новое образование не равно сумме частей, а образует систему другой организации или систему иного уровня.




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).

Развивающиеся системы всегда открыты и обмениваются энергией и веществом с внешней средой, за счёт чего и происходят процессы локальной упорядоченности и самоорганизации.

В сильно неравновесных состояниях системы начинают воспринимать те факторы воздействия извне, которые они бы не восприняли в более равновесном состоянии.

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.

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.



Работы представителей брюссельской школы и Г. Хакена послужили основой нового направления в исследовании систем как систем, существующих за счет постоянного обмена со средой, как неустойчивых (диссипативных) самоорганизующихся комплексов.

Неустойчивые системы в процессе взаимообмена со средой не находятся в состоянии равновесия. Напротив, такая система упорядочена и хаотична одновременно.

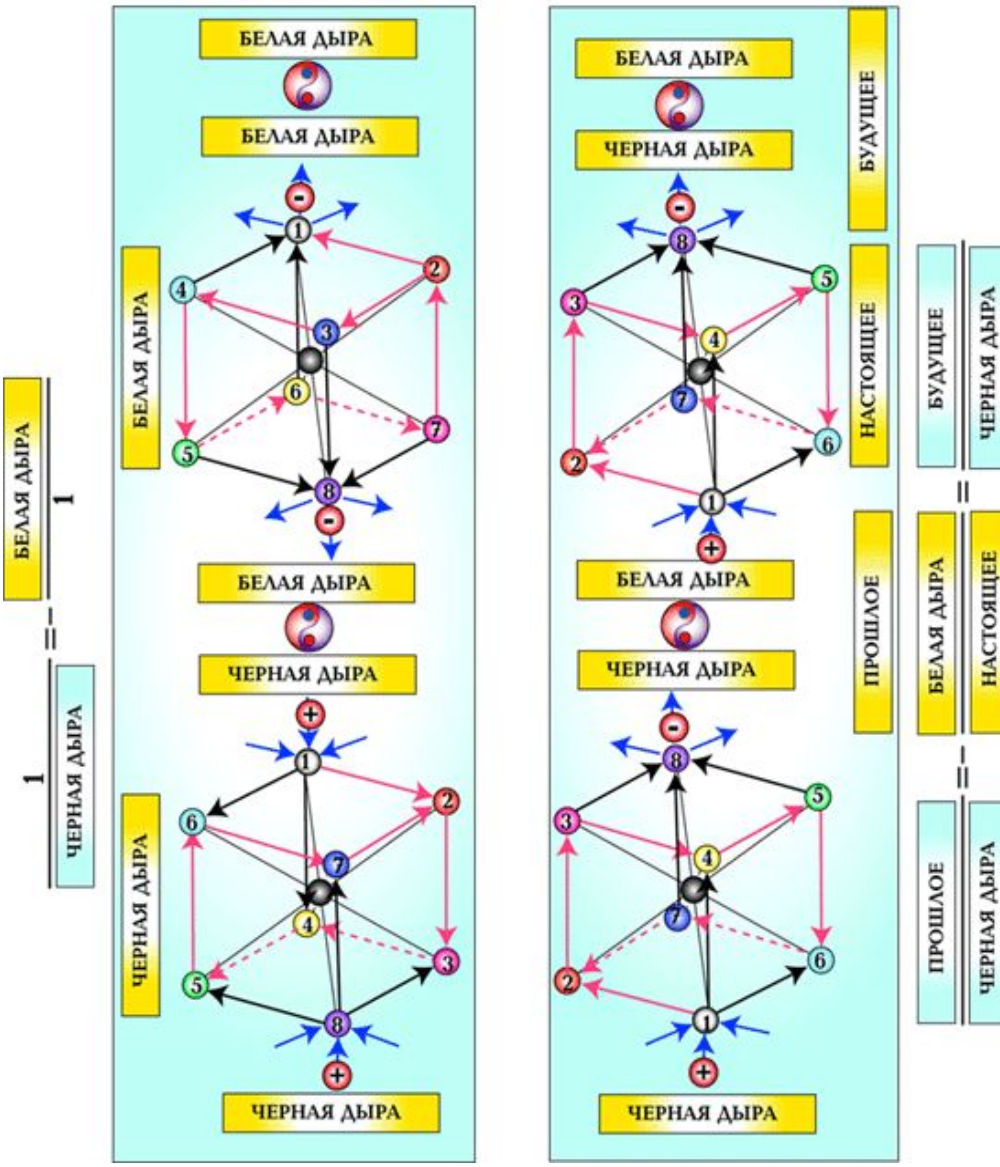
Хаос обеспечивает накопление мутационных изменений, которые представляют собой набор возможностей. Достигнув предела накопления возможностей (который задан организационными характеристиками), система оказывается в состоянии бифуркации.

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ПОТОКИ ВСЕЛЕННОЙ

В *открытых системах*, т. е. системах, в которых возможен обмен веществом и энергией с окружающей средой, в ходе непрерывного процесса из пространственно-однородного состояния может самопроизвольно сформироваться более сложная пространственная или временная структура (например, колебания концентраций реагентов во времени или неравномерное пространственное распределение концентраций реагентов по длине реактора).

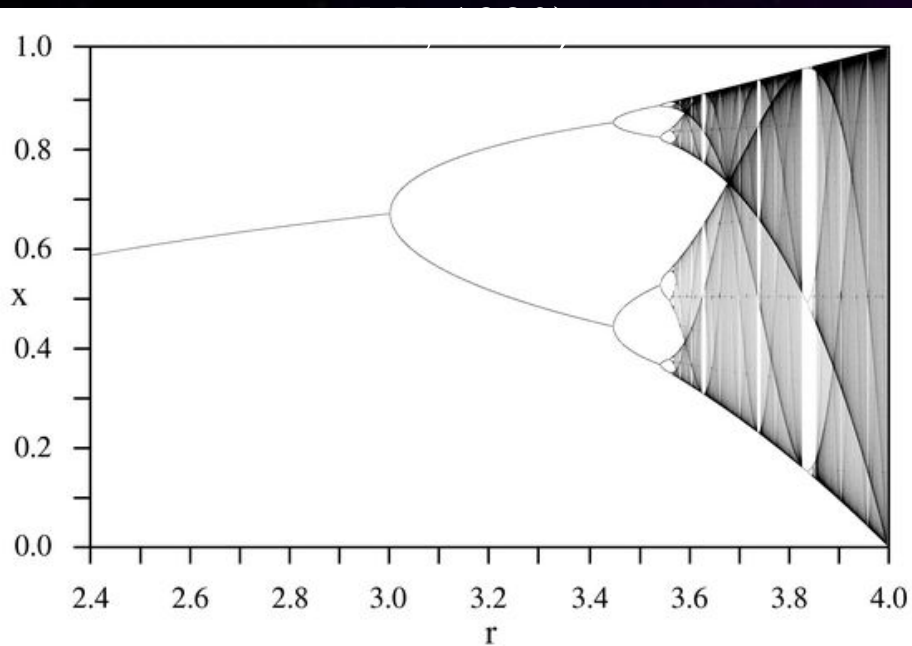
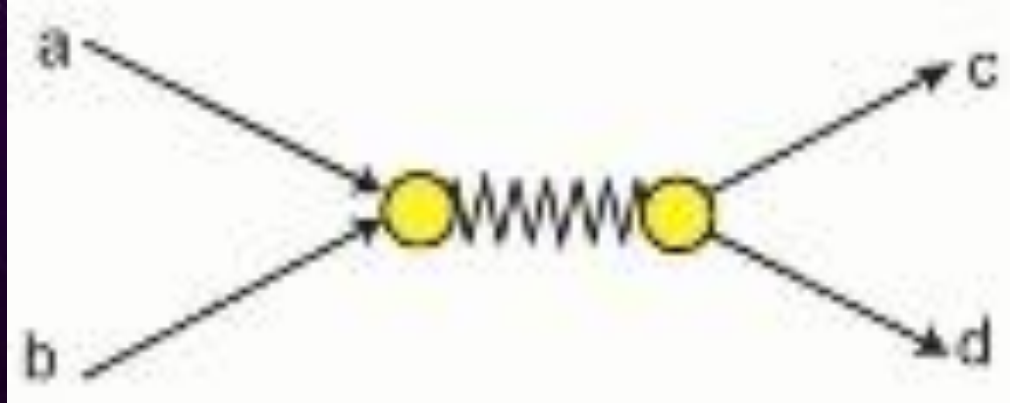
Процесс самопроизвольного формирования структуры более сложной, чем первоначальная, называют *самоорганизацией*.

Структуры, образующиеся в процессе самоорганизации, называются *диссипативными структурами*.



Бифуркация (от англ. *fork* - вилка) - неустойчивая система, которая имеет свои пороговые величины, характеризующие ее фундаментальные свойства.

При количественном достижении критического (порогового) значения происходит качественный скачок - точка разветвления эволюционной линии - **бифуркация** (Николис Г., Пригожин И. Познание



Развитие синергетики как междисциплинарного направления исследований влечет за собой глубокие мировоззренческие следствия.

- Возникает качественно иная, отличная от классической науки картина мира.
- Формируется новая парадигма, изменяется вся концептуальная сетка мышления.
- Происходит переход от категорий бытия к событию, от существования к становлению, сосуществованию в сложных эволюционирующих структурах старого и нового; от представлений о стабильности и устойчивом развитии к представлениям о нестабильности и метастабильности, оберегаемом и самоподдерживаемом развитии (sustainable development); от образов порядка к образам хаоса, генерирующего новые упорядоченные структуры; от самоподдерживающихся систем к быстрой эволюции через нелинейную положительную обратную связь; от эволюции к коэволюции, взаимосвязанной эволюции сложных систем; от независимости и обособленности к связности, когерентности автономного; от размерности к соразмерности, фрактальному самоподобию образований и структур мира.
- В новой синергетической картине мира акцент падает на становление, коэволюцию, когерентность, кооперативность элементов мира, нелинейность и открытость (различные варианты будущего), возрастающую сложность формообразований и их объединений в эволюционирующие целостности.
- Синергетика придает новый импульс обсуждению традиционных философских проблем случайности и детерминизма, хаоса и порядка, открытости и цели эволюции, потенциального (непроявленного) и актуального (проявленного), части и целого.