

# Самоорганизация сложных природных систем

# Иерархия структурных форм материи

## Формы неживой материи:

- вакуум,
- поля,
- элементарные частицы,
- ядра атомов,
- атомы,
- молекулы,
- макротела,
- планеты и планет-ные системы,
- звезды,
- галактики,
- Вселенная.

# Иерархия структурных форм материи

**Признак иерархической системы:**

- Каждая последующая структурная форма является более сложной, т.к. включает в качестве составной части предыдущую, более простую форму,
- при переходе от менее сложных к более сложным формам появляются качественно новые свойства.

# Эволюционная парадигма

- Структурное разнообразие в природе можно рассматривать как результат последовательно происходящих в ней качественных изменений. Описание процессов возникновения качественно новых структур связано с переходом к **эволюционной парадигме**.

Существенной особенностью **эволюционного естествознания** является:

- Рассмотрение **многообразия и иерархичности материальных структур** как закономерного результата всеобъемлющего эволюционного процесса;
- Поиск закономерностей, единых для всех разнообразных процессов развития – **фундаментальных законов эволюции**.

# Неравновесные термодинамические системы

- **Неравновесная термодинамика** исследует необратимые процессы в **неравновесных открытых системах**. Это такие системы, в которых **неравновесное состояние поддерживается стационарно притоками энергии и вещества извне**.
- В неравновесной термодинамике определяются условия, при которых **энтропия открытых систем может убывать**, что означает **возрастание упорядоченности в таких системах, формирование в них новых структур**.

# Неравновесная термодинамика

- Идеи неравновесной термодинамики, выдвинутые бельгийским физиком российского происхождения Ильей Романовичем Пригожиным (1917-2003) (Нобелевская премия 1977 г.), послужили основой принципиально нового подхода в объяснении возникновения упорядоченных структур как в физике и химии, так и в биологии.
- **Эволюция сложных природных неравновесных систем рассматривается как процесс самоорганизации в них.** Самоорганизация означает образование в системе определенной упорядоченной структуры без внешнего организующего воздействия.

# Неравновесная термодинамика

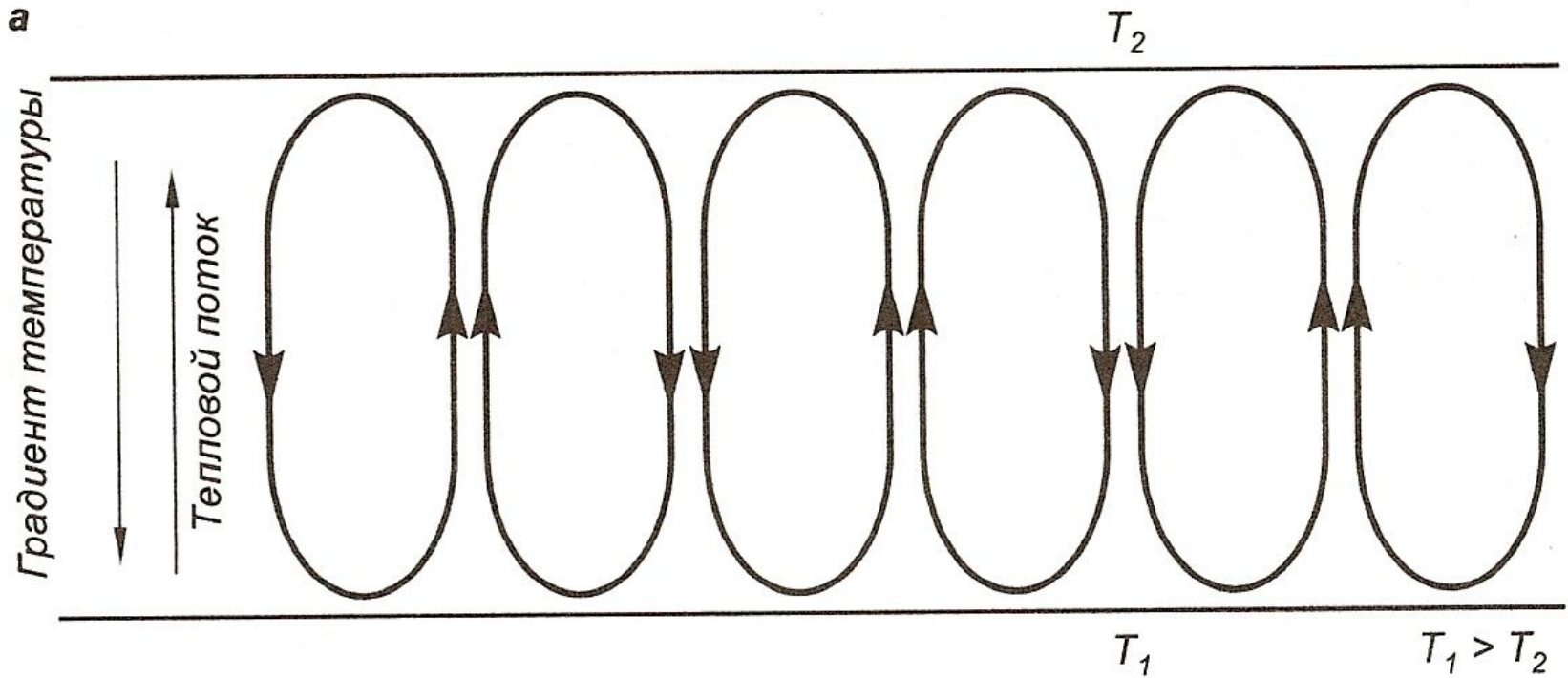
- **Сильнонеравновесные системы** описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, имеющими, вообще говоря, не единственное решение.
- Каждое решение соответствует определенному типу поведения системы. **При возрастании т.н. термодинамических сил**, характеризующих неравновесность системы (например, градиенты температуры), **состояние неравновесной системы теряет устойчивость.**
- Малые вариации условий могут повлечь за собой резкое изменение состояния системы. При этом **возрастает роль флуктуаций**, возникающих благодаря неконтролируемому воздействию извне. В равновесных системах флуктуации релаксируют и исчезают, в **неравновесных системах флуктуации могут разрастаться, создавая новый тип поведения.**

# Неравновесная термодинамика

- Наблюдается когерентное (согласованное) поведение различных элементов системы, приводящее к созданию новой стационарной структуры, существующей лишь в неравновесных условиях.
- Пример – *ячейки Бенара*, упорядоченные конвективные структуры в слое жидкости, перпендикулярно которому направлен достаточно мощный и однородный тепловой поток. При этом флуктуация разрастается на всю систему, в ней устанавливается определенный порядок, в когерентное движение вовлекается больше 1000 частиц.



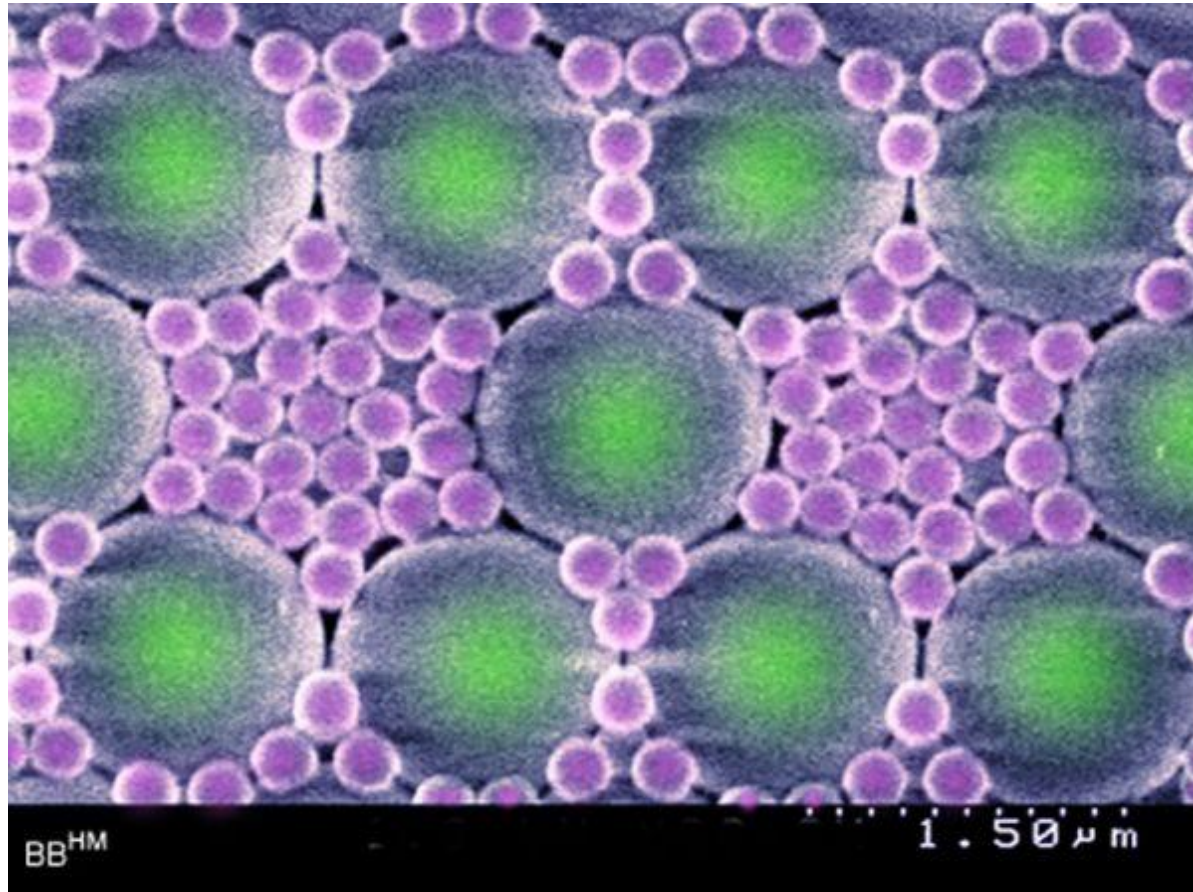
# Ячейки Бенара





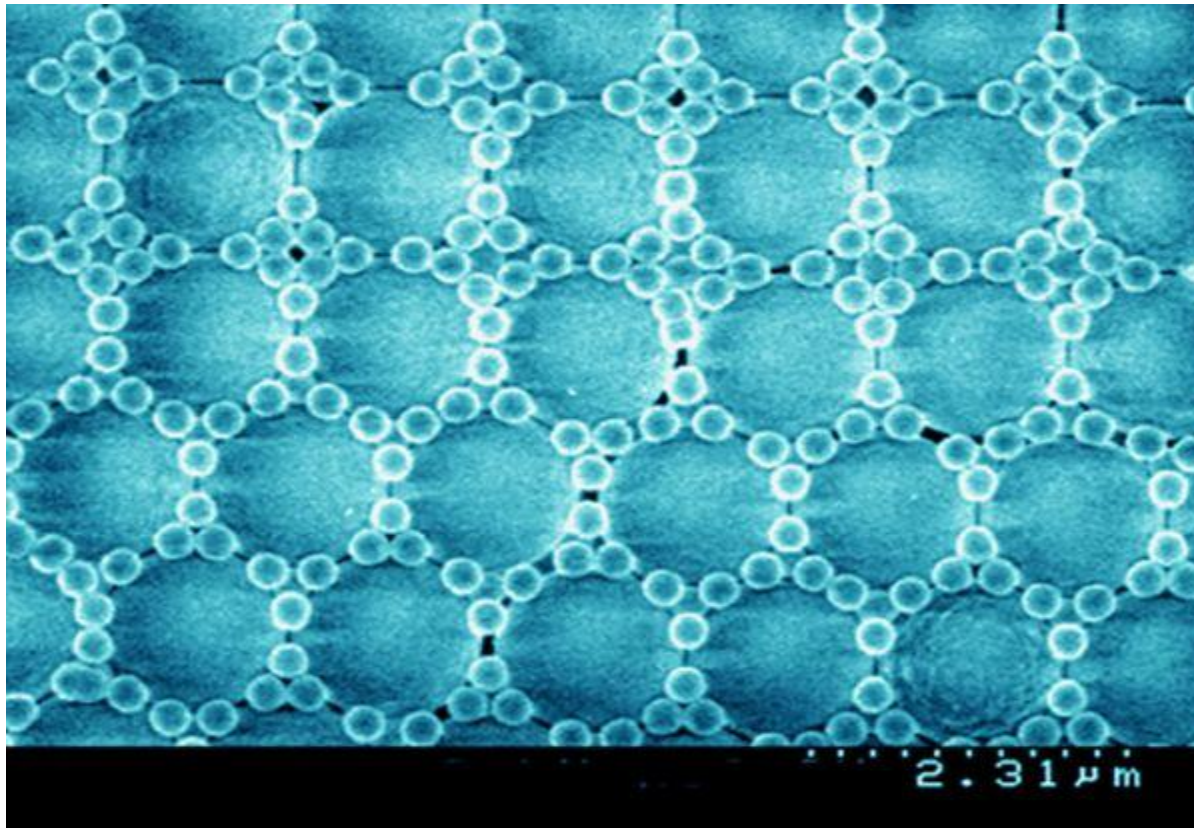
## Самоорганизация в природе:

Бинарные коллоидные самоорганизованные системы: вид поверхности. Большие частицы - полистирол, маленькие - диоксид кремния. Маленькие частицы аккуратно заполняют вакансии в плотнейшей упаковке больших частиц.



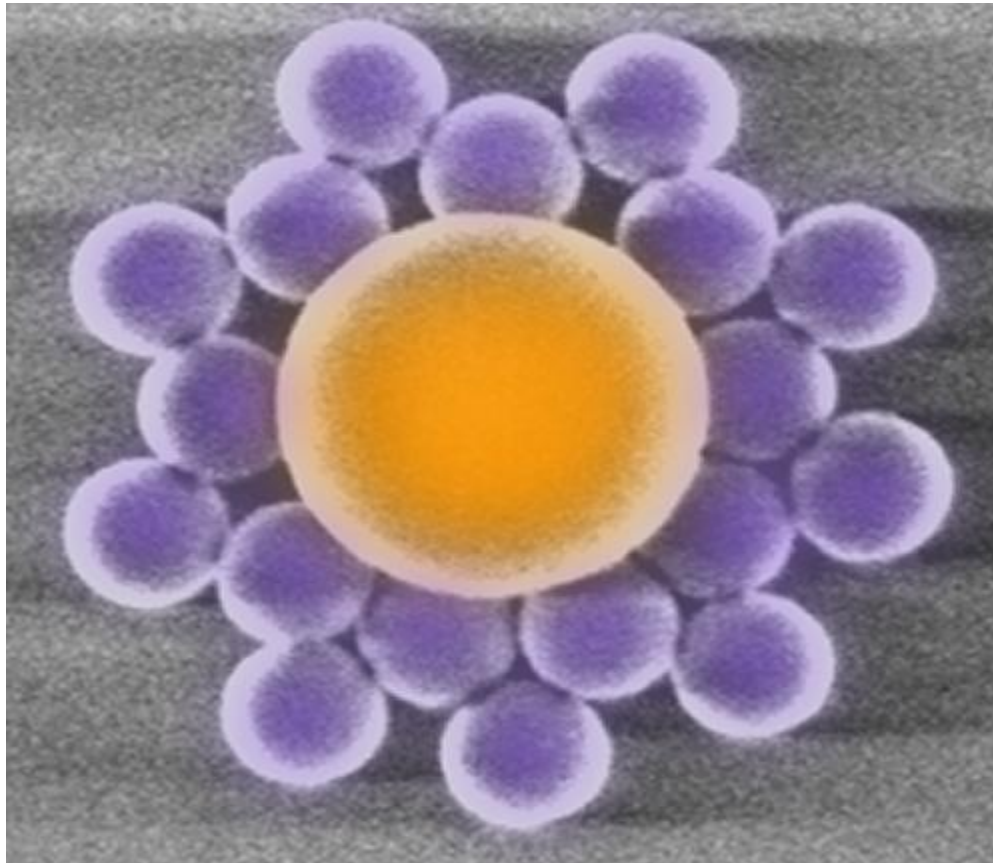
## Самоорганизация в природе:

Бинарные коллоидные самоорганизованные системы: вид поверхности. Большие частицы - полистирол, маленькие - диоксид кремния. Показан любопытный переход из гексагональной упаковки в квадратную.



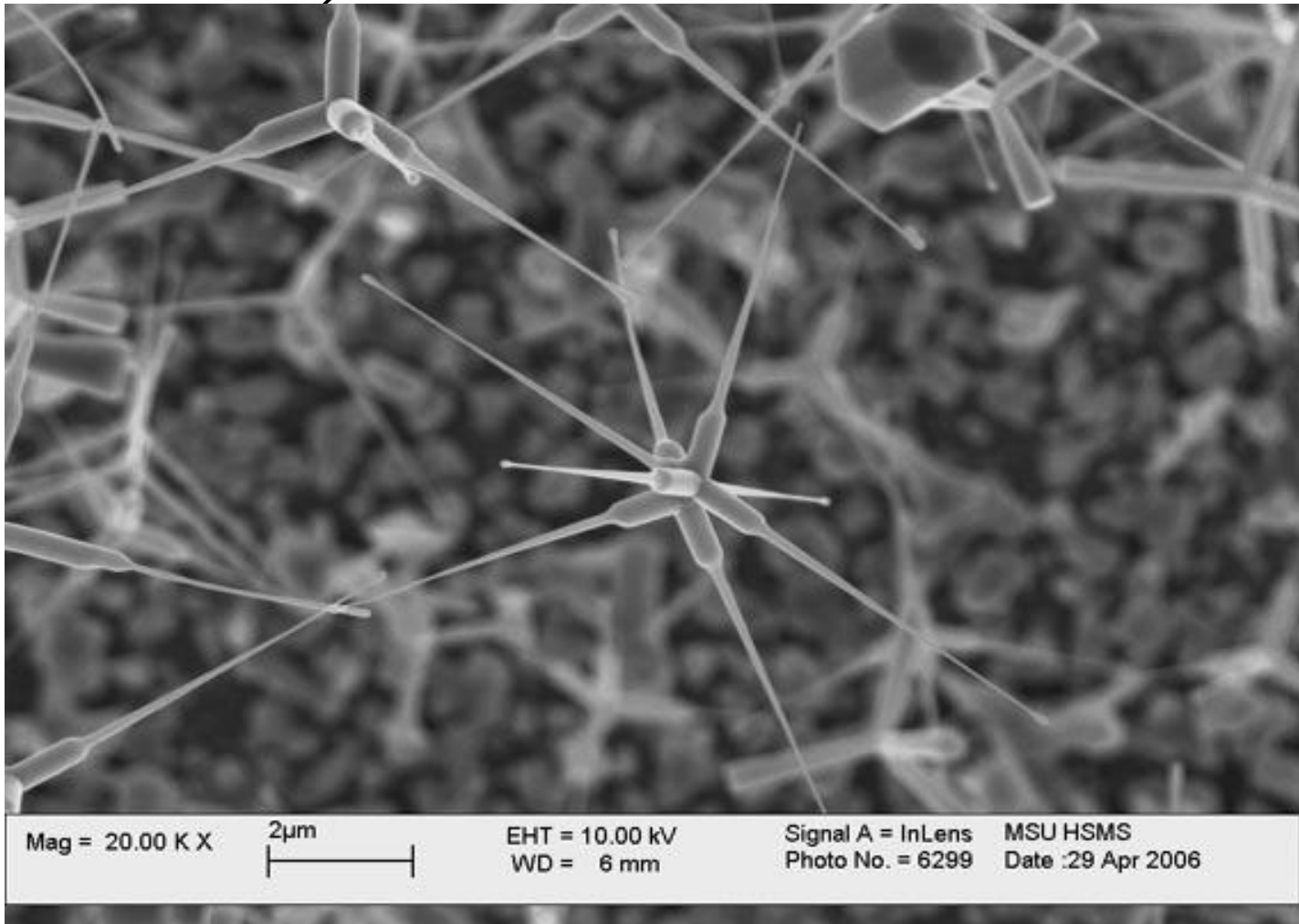
## **Самоорганизация в природе:**

**Бинарная коллоидная система, полученная при самоорганизации монодисперсных бинарных дисперсий, подвергнутых усушке на плоской поверхности. Все коллоидные частицы - диоксид кремния: большая - 750 нм, маленькая – 280 нм. По сути артефакт - хотя соотношение размера и числа частиц и варьировалось в целенаправленно, эта симметричная структура - практически уникальна.**



## Самоорганизация в природе:

Тетраподы ZnO, полученные в горизонтальной трубчатой печи из газовой фазы путем испарения порошка металлического Zn и последующего окисления его в потоке  $Ar/O_2$ .

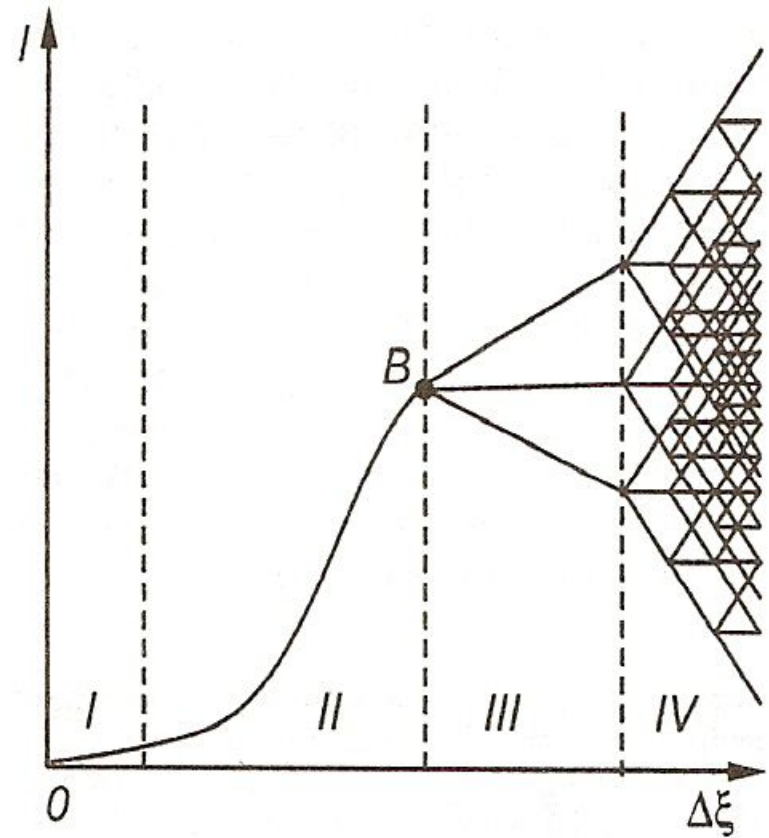


# Неравновесная термодинамика

- Неравновесные стационарные структуры (НСС) принципиально отличаются от равновесных упорядоченных структур (например, кристаллов).
- Структуры, возникающие как результат самоорганизации в сильнонеравновесных системах, называются **ДИССИПАТИВНЫМИ**, поскольку они существуют лишь за счет достаточно больших потоков энергии извне и способствуют эффективному рассеянию (диссипации) энергии.
- НСС образуются в короткий промежуток времени в результате быстрой качественной перестройки системы, напоминающей фазовый переход (смену агрегатного состояния).

# Неравновесная термодинамика

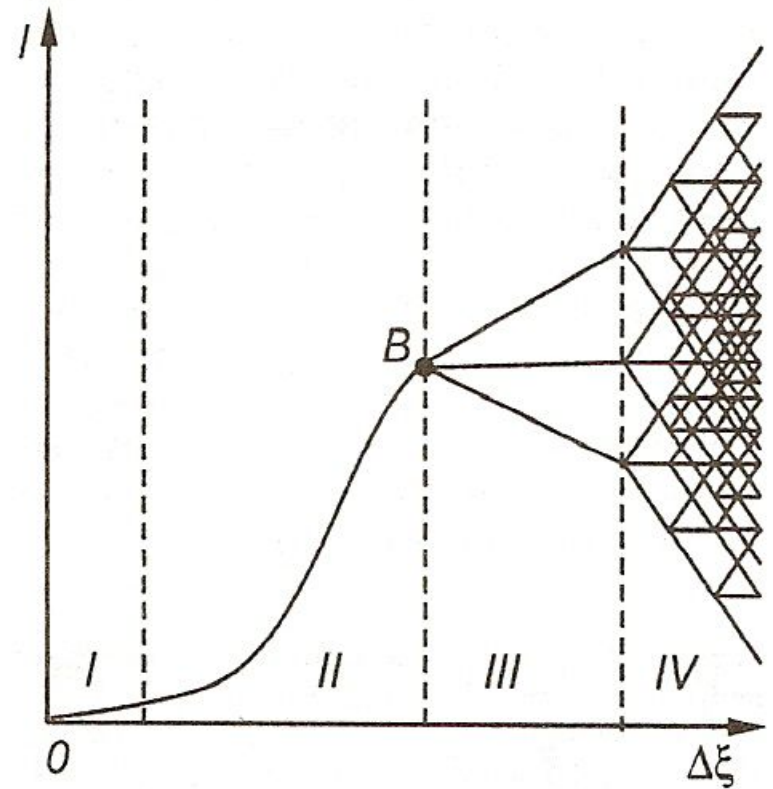
- Диаграмма, отражающая смену термодинамической ситуации в неравновесной системе. Линии на диаграмме символизируют различные типы поведения системы. Точка В – одна из точек бифуркации.





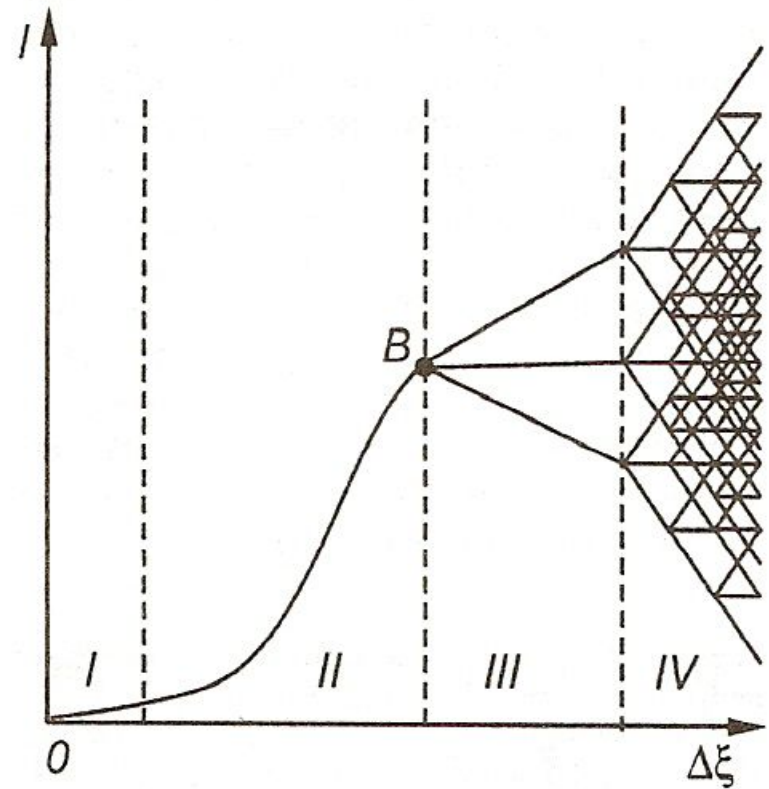
# Неравновесная термодинамика

- В нулевой точке система находится в равновесном состоянии. При появлении движущей силы и возрастании потока система становится неравновесной. Вблизи нуля (**область 1**) **система слабо-неравновесна, линейна и детерминирована.** Возникающие в ней флуктуации затухают.



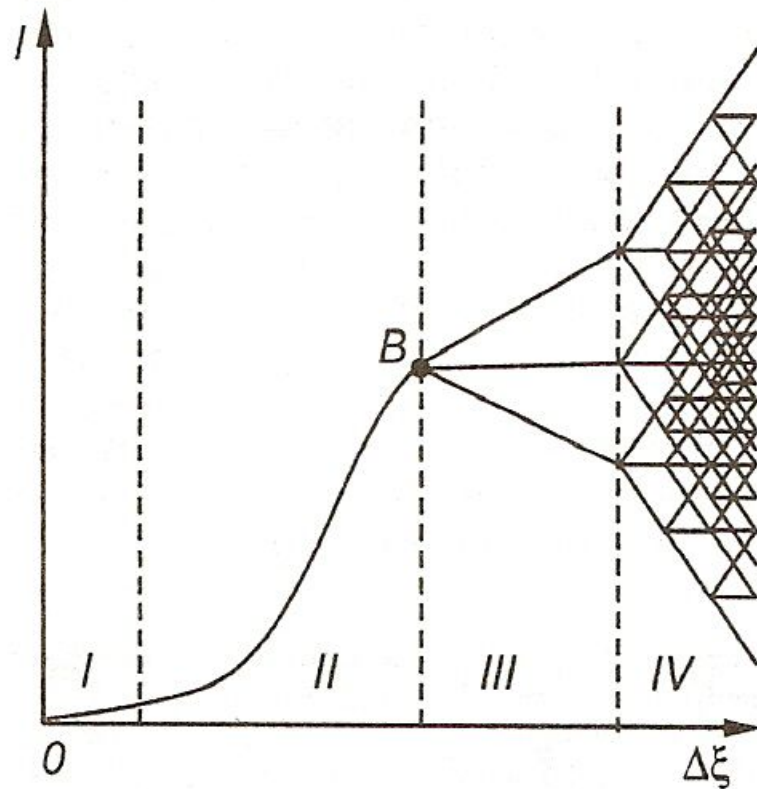
# Неравновесная термодинамика

- При достижении движущей силой достаточно большого значения система меняет свое поведение, становится **нелинейной (область 2)**, все более заметную роль начинают играть флуктуации.



# Неравновесная термодинамика

**В области 3 система становится неустойчивой.** Флуктуации не гасятся, а усиливаются за счет обратных связей в системе и захватывают всю систему. Вместо одного варианта развития возможно несколько новых. Поскольку флуктуации возникают случайно, то и выбор системой одного из новых вариантов своего поведения непредсказуем

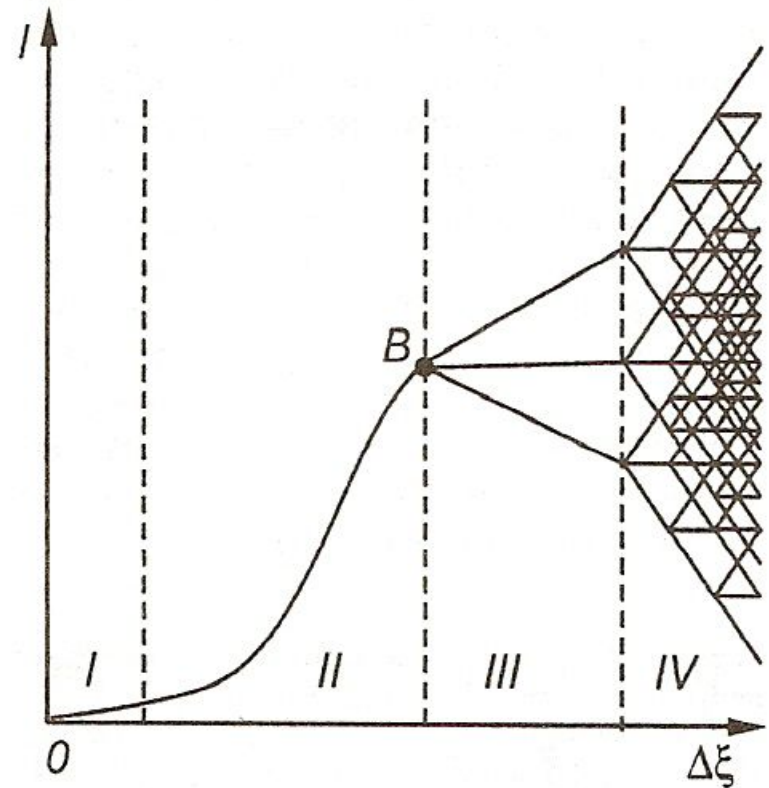


# Неравновесная термодинамика

- **Состояние, при котором в сильнонеравновесной и неустойчивой системе происходит переход к новому типу поведения, называется точкой бифуркации.**
- Выбор нового варианта поведения носит вероятностный характер, что делает процесс эволюции системы принципиально необратимым.
- После осуществления выбора поведение системы на некотором отрезке (область 3) становится прогнозируемым. Таким образом, в поведении открытой сильнонеравновесной системы **сочетаются случайность и детерминированность.**

# Неравновесная термодинамика

- При дальнейшем увеличении движущих сил возникают новые бифуркации и ветвления (область 4). Системы, в которых бифуркации множественны, в ходе эволюции достигают такой степени запутанности поведения, что сложность становится беспорядком.



# Процессы упорядочения и закон возрастания энтропии

- Когда система находится в неравновесном состоянии, и нет внешнего воздействия, то возникающие процессы переноса приводят систему в состояние ТД равновесия в соответствии с законом возрастания энтропии.
- Если состояние неравновесно, и процессы переноса достаточно интенсивны, то на фоне общего стремления к равновесию могут возникать **подсистемы, в которых энтропия локально убывает, а упорядоченность возрастает.**
- В изолированной системе локальное уменьшение энтропии является временным, в открытой системе возможно возникновение стабильных диссипативных упорядоченных структур.

# Процессы упорядочения и закон возрастания энтропии

- Локальное понижение энтропии, соответствующее локальной упорядоченности, обычно ничтожно мало по сравнению с суммарным увеличением энтропии системы в целом.
- Рождение локальных упорядоченных структур приводит к ускорению общего увеличения энтропии.
- Процесс образования упорядоченных структур в сильнонеравновесных системах неизбежен, он отражает стремление системы перейти к равновесному состоянию.
- **Упорядоченные структуры реагируют на изменение внешних условий более чутко и разнообразно, могут легко разрушаться или превращаться в новые структуры.**

# Процессы упорядочения и закон возрастания энтропии

- Нередко образование новой структуры невозможно без наличия предыдущей. В этом случае изменение состояний системы при изменении условий ее существования представляет собой однонаправленный процесс смены в ней одного порядка на другой, т.е. **ЭВОЛЮЦИЮ** .
- В результате эволюции возникают новые упорядоченные системы, которые заменяют собой старые, когда происходит изменение внешних условий.
- Изменения могут быть вызваны, в том числе, и существованием данной упорядоченной подсистемы. В этом случае появляется основа для **развития иерархических упорядоченных структур**.



# Неравновесная термодинамика

Явления эволюции и самоорганизации могут наблюдаться в любых сильнонеравновесных системах:

- в масштабе Вселенной самоорганизация проявилась в эволюции космологических систем;
- при формировании геологического облика Земли – в геологической эволюции;
- эволюция живых организмов, биологических видов и популяций.
- к процессам самоорганизации относятся корпоративное поведение насекомых, регенерация живых тканей, **вся жизнь на Земле, а также ее возникновение.**

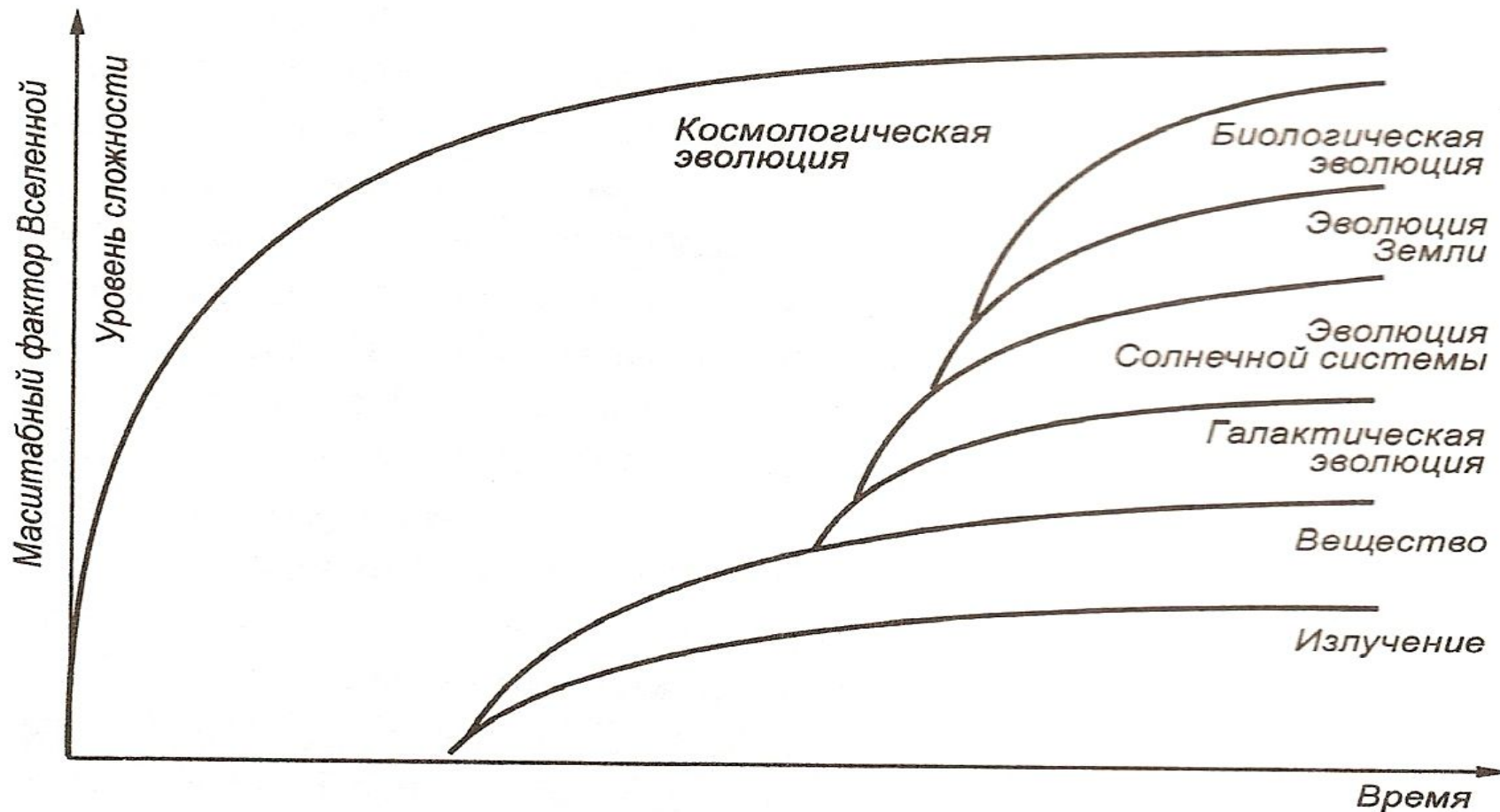
# Эволюция и стрелы времени

- С понятием эволюции тесно связано понятие **времени как возраста** природных систем.
- В рамках эволюционной концепции для любого объекта необходимо рассматривать **рождение** (самоорганизацию), **развитие** (смену упорядоченных форм) и **распад** (переход к неупорядоченному равновесному состоянию). Последовательность этих стадий задает **стрелу времени**.
- Различным иерархическим уровням организации материи соответствует различный масштаб шкалы времени. Направленность же стрелы времени едина и определяется сутью процессов эволюции. Эволюционные процессы необратимы, необратимо и время.

# Эволюция и стрелы времени

- В различных науках о природе эволюционные представления о природе формировались достаточно независимо, поэтому выделяют
- **биологическую** стрелу времени (развитие живых организмов),
- **геологическую** стрелу времени (формирование Земли),
- **гелиологическую** стрелу времени (возникновение и эволюция Солнечной системы),
- и наконец **космологическую** стрелу времени (эволюция Вселенной).
- Эволюционные процессы всех подсистем Вселенной можно рассматривать как составляющие единого эволюционного процесса.

# Эволюция и стрелы времени



# Эволюция и стрелы времени

- По мере расширения и остывания Вселенной происходит **последовательный рост разнообразия и сложности форм материи.**
- Приведенная схема является, по сути, **бифуркационной структурой.**
- **В точках бифуркации возникают новые материальные структуры, имеющие свою стрелу времени.**
- Такое представление демонстрирует **единство всего материального мира, а также увеличение разнообразия и сложности создаваемых Природой материальных объектов.**