

Концепции современного  
естествознания.  
Вечернее отделение

Лекция 11.11.2016

# Фундаментальные неклассические модели

|                                  |  |   |
|----------------------------------|--|---|
| Состояние                        | Квантовое  | Тепловое равновесие   |
| Объект                           | Микрочастица,<br>несколько<br>микрочастиц                              | Система огромного числа<br>частиц, сравнимого с числом<br>Авогадро ( $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup> )                            |
| Окружение                        | Поле (в т.ч.,<br>источником поля<br>могут быть другие<br>микрочастицы) | Система огромного числа<br>частиц много большая, чем<br>объект  |
| Характерис-<br>тики<br>состояния | Импульс,<br>координата,<br>энергия, спин и т.д.                        | Микро-: средняя квадратичная<br>скорость частиц, средняя<br>кинетическая энергия частиц<br>Макро-: Температура,<br>внутренняя энергия, энтропия |
| Температура                      | $T = 0$ К  | $T \gg 0$ К   |

Замкнутая система - совокупность физических тел, у которых взаимодействия с внешними телами отсутствуют или скомпенсированы

# Характеристики состояния могут флуктуировать

## Флуктуация

(лат. *fluctuatio* - *беспокойное движение*) – случайное отклонение значения физической величины от ее среднего значения

**Дисперсия (= неопределенность)** – численная мера флуктуаций

$$A = \langle A \rangle \pm \Delta A$$


С точки зрения неклассической стратегии изучения природы среди многих характеристик состояния объекта может оказаться

пара различных величин  $A$  и  $B$ ,

**дисперсии (неопределенности)** которых обнаруживают согласованное поведение, т.е.

**коррелированы между собой,**

**Одно состояние – две характеристики.**

*Идея целостности*

## Концепция корреляции ФЛУКТУАЦИЙ

- Взаимная обусловленность поведения (корреляция) имеет место не для одной, а для пары различных характеристик состояния, называемых сопряженными.
- В данном состоянии подстройка взаимного поведения происходит на уровне не самих средних значений характеристик, а их флуктуаций относительно средних значений.
- При этом произведение дисперсий (неопределенностей) обеих сопряженных характеристик ( $\Delta A \cdot \Delta B$ ) выступает как единая целостная величина, которая не может быть меньше некоторого значения  $R$ , характерного для данного состояния

# Соотношения неопределенностей

Квантовые состояния      Тепловое равновесие

Соотношение

неопределенностей (СН)

Гейзенберга

Соотношение

неопределенностей (СН)

Эйнштейна

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar$$

$$\Delta S \Delta T \geq k_B$$

СН в общем виде:

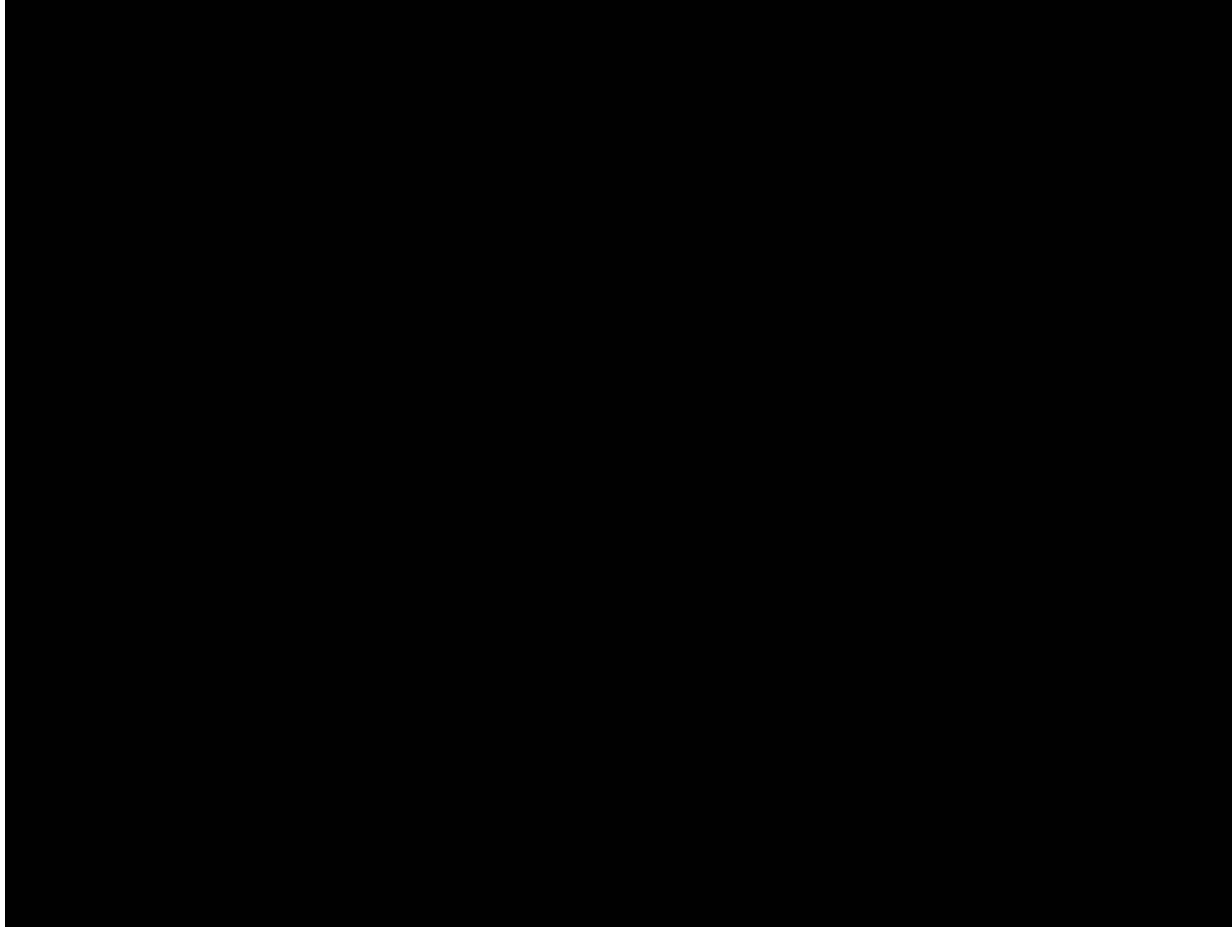
$$\Delta A \Delta B \geq R$$

**R** – мера корреляции между **неопределенностями** величин A и B, вызванной наличием неконтролируемого воздействия.

**R** всегда больше нуля!!!!

- **Анализ  $SH$**  => систему из равновесного состояния вывести довольно сложно. Большие флуктуации маловероятны.
- **2 начало термодинамики:** замкнутая система стремится к состоянию теплового равновесия.

# Необратимые процессы в природе:



***Всем знакомый пример:  
диффузия перманата калия в  
воде***



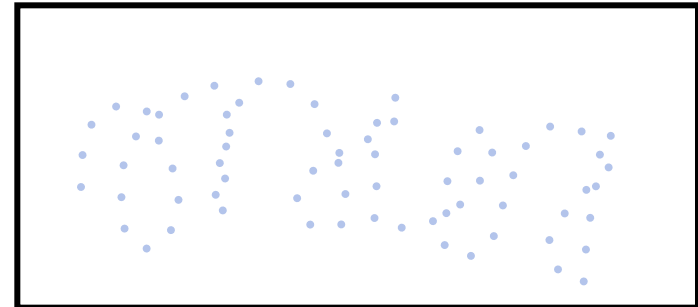
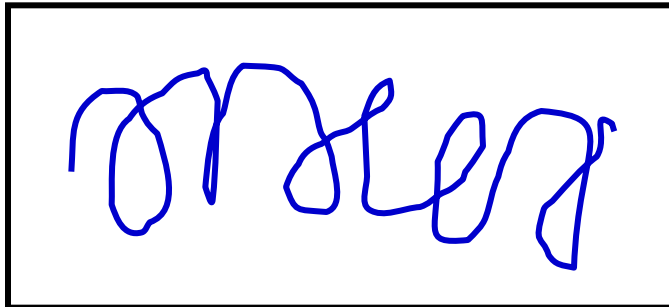
- В природе реализуются процессы, которые не могут протекать в обратном порядке.
- Эти процессы называются необратимыми
- Им соответствует **реальное время**, которое всегда устремлено от **прошлого к будущему – стрела времени.**
- ***Ход реального времени*** проявляется себя через ***необратимые изменения, происходящие в системе***

# Расширение газа необратимо

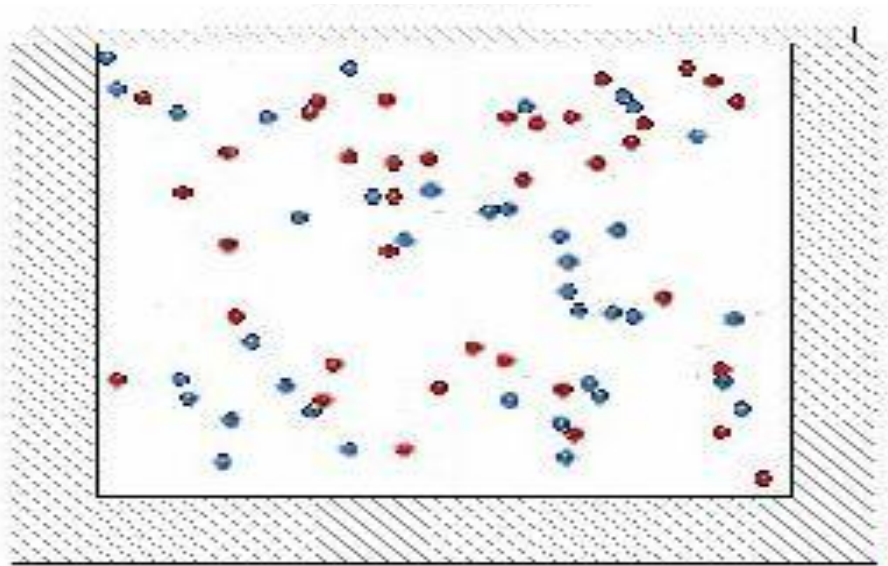


**После снятия перегородки молекулы не соберутся обратно в левой части сосуда!**

# Расплывание дымового облака необратимо



# Установление теплового равновесия – необратимый процесс



**В состоянии теплового равновесия свойства газа в баллоне нечувствительны к ходу времени.**

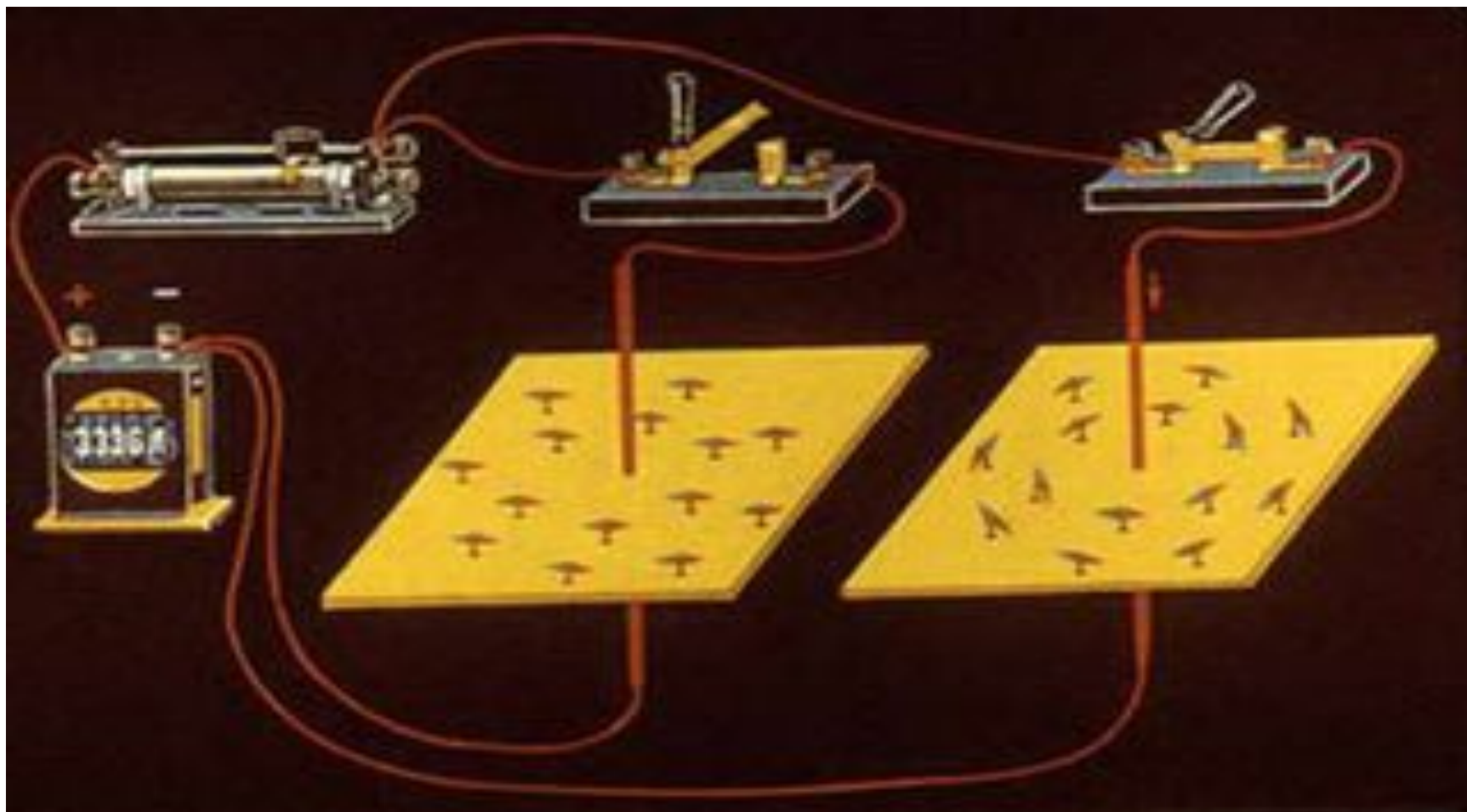
**Это состояние, эквивалентное смерти.**

# Необратимость тепловых явлений

- Реальные физические, химические и др. процессы сопровождаются либо трением, либо другими формами потери **(диссипации)** энергии
- В любом случае, часть энергии тела переходит в некачественную энергию необратимого стохастического движения частиц – теряется безвозвратно!

Возникновение упорядоченности (структуры) может быть связано с наличием внешнего регулярного воздействия.

# Упорядочение под действием магнитного поля (внешнее воздействие)



# Возникновение структуры в результате регулярного воздействия звуковых волн



*Под воздействием звука разной частоты в однородной среде (частички сахара одинакового размера) возникает структура – частички сахара концентрируются в узлах двумерной стоячей волны на поверхности динамика*



**Пример использования в  
искусстве структур, возникающих в  
результате регулярного  
воздействия  
СУМАТИС: Science Vs. Music - Nigel Stanford**

<https://vimeo.com/111593305>

# Парадокс

Неизбежным результатом любых процессов в замкнутой системе является сглаживание неоднородностей, разрушение упорядоченных структур, понижение сложности устройства системы и качества запасенной в ней энергии.

*2 начало  
термодинамики  
<=*

*Наблюдение  
окружающего  
мира =>*

**Живые организмы являются низко симметричными, сложно организованными, упорядоченными системами, способными воспроизводить себе подобных и развиваться.**

**Нужно ли для биологических объектов применять иные законы, чем для физических и химических?**

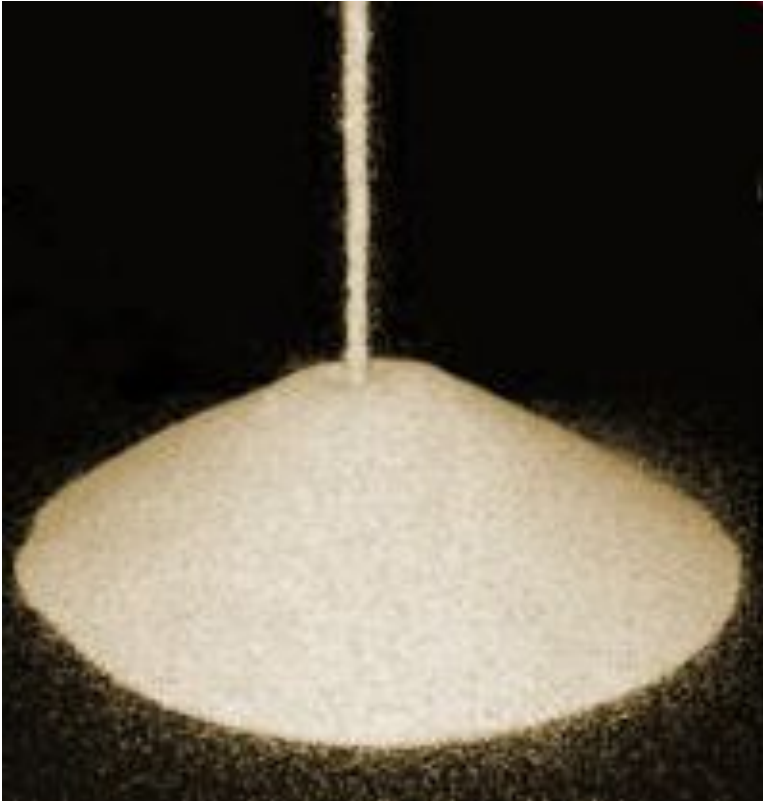
# **КОНЦЕПЦИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ**

**Примеры  
самопроизвольно  
возникающих структур в  
неживой природе**

# Мелкомасштабная структура упорядоченности на песке



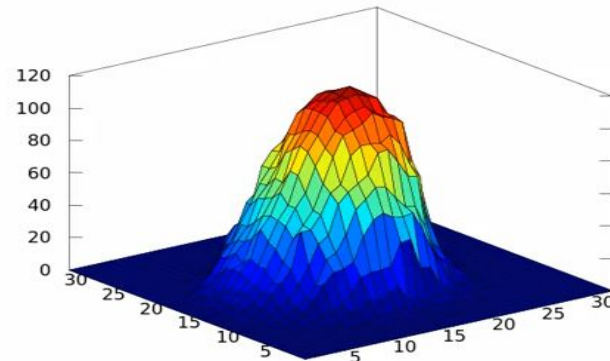
# Self-Organized Criticality, SOC



Если сыпать песчинки на ровную поверхность, то вначале будет равномерно расти песчаный конус, угол наклона его сторон будет увеличиваться.

Однако, при достижении определенного угла наклона по конусу начинают скатываться лавины песчинок - большие и маленькие,

[http://www.youtube.com/watch?v=94gG\\_ouNS6M&NR=1](http://www.youtube.com/watch?v=94gG_ouNS6M&NR=1)



# Моделирование снежной лавины и песчаного оползня



Simulation on Sand Avalanches.mp4





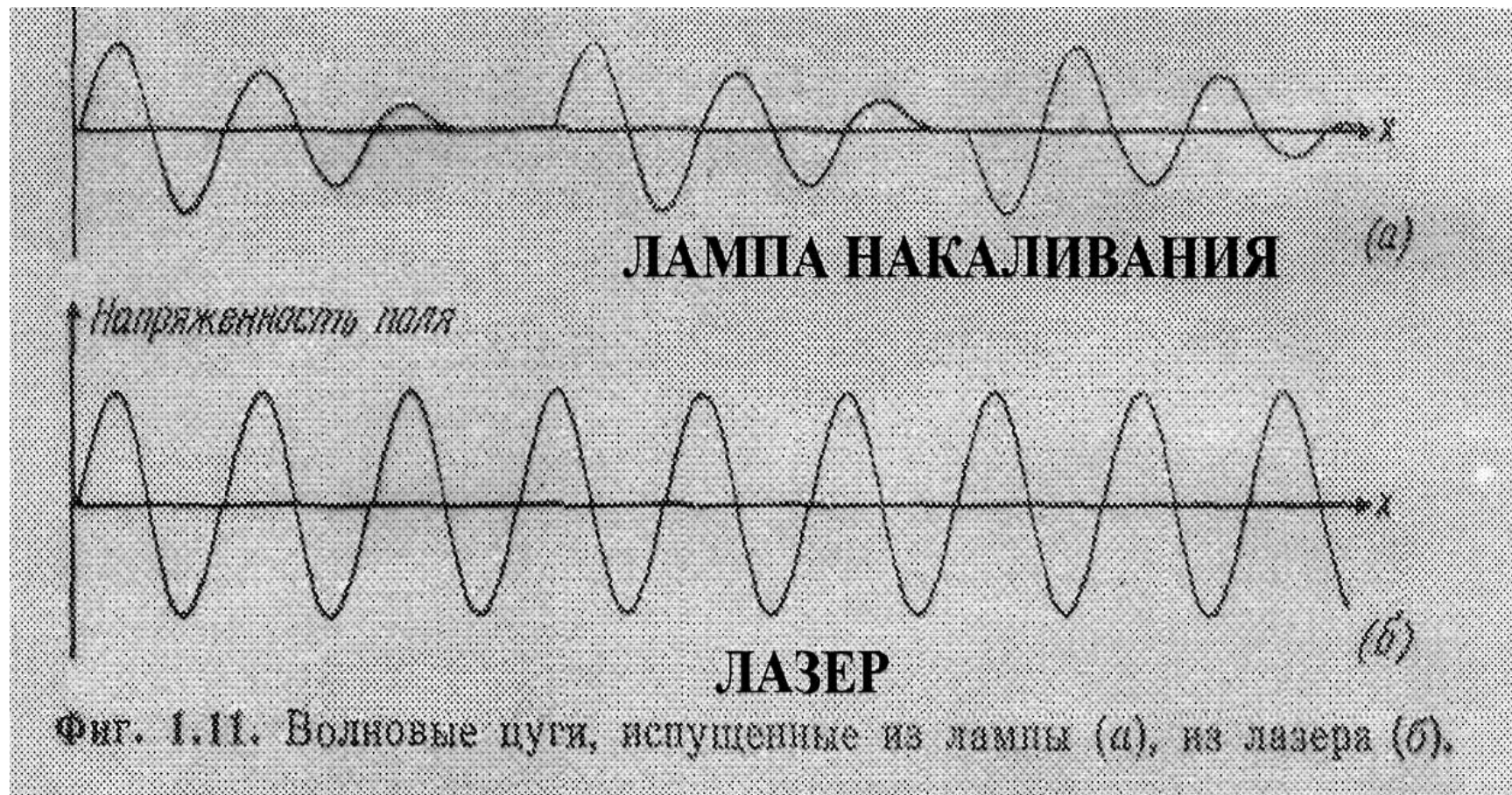
# В технологии – лазер



**Образование когерентных**  
электромагнитных волн, способных к  
интерференции – **самоорганизация**



# Волновые цуги, испущенные из лампы (а), из лазера (б).



Неупорядоченные и упорядоченные волновые цуги

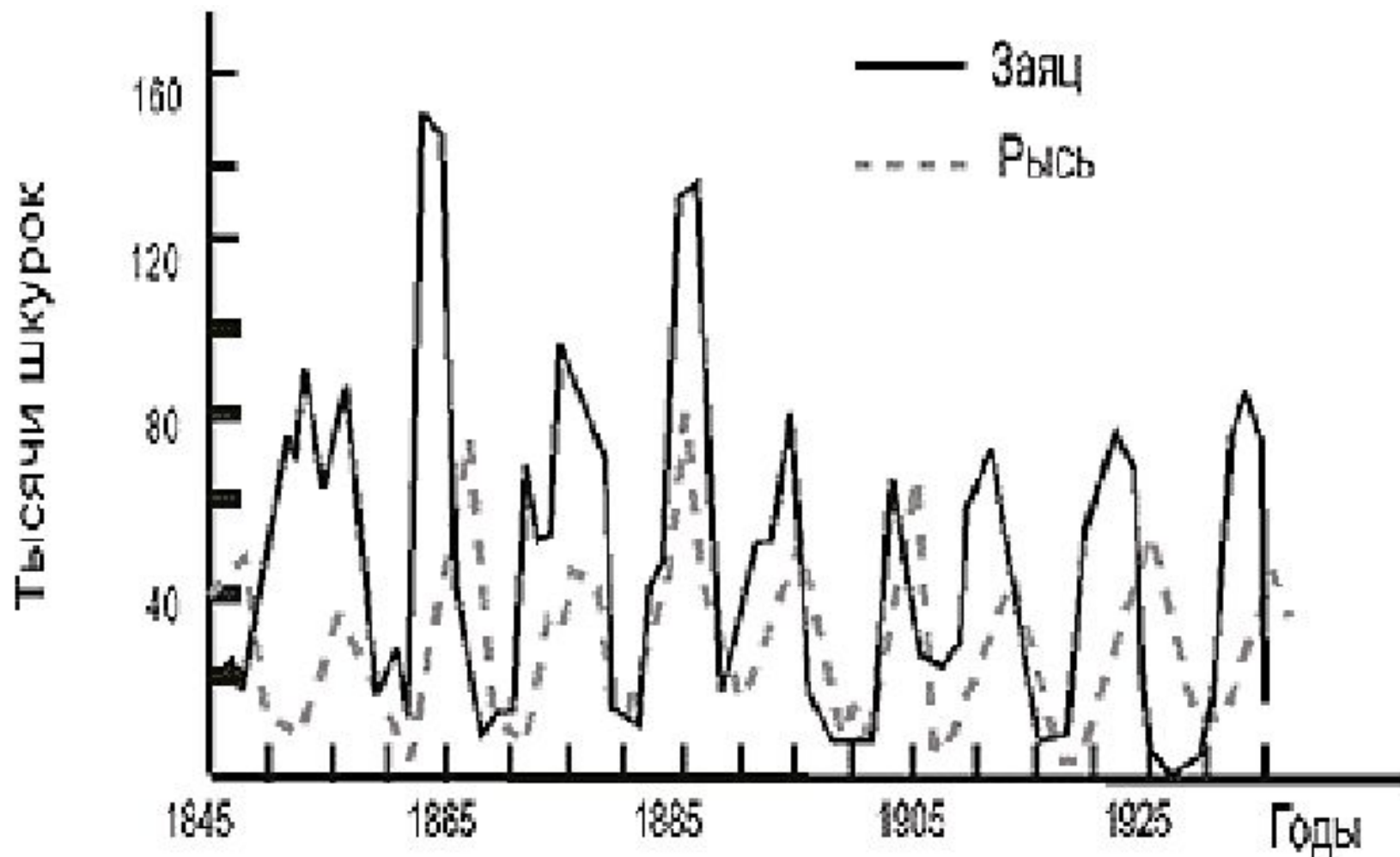
# Установление генерации в лазере



Спонтанное  
излучение –  
неупорядоченное

Лазерное излучение -  
упорядоченное

## Колебания численности хищников и жертв (рейдеры и предприниматели)



**Волнообразное протекание процесса упорядочивания**



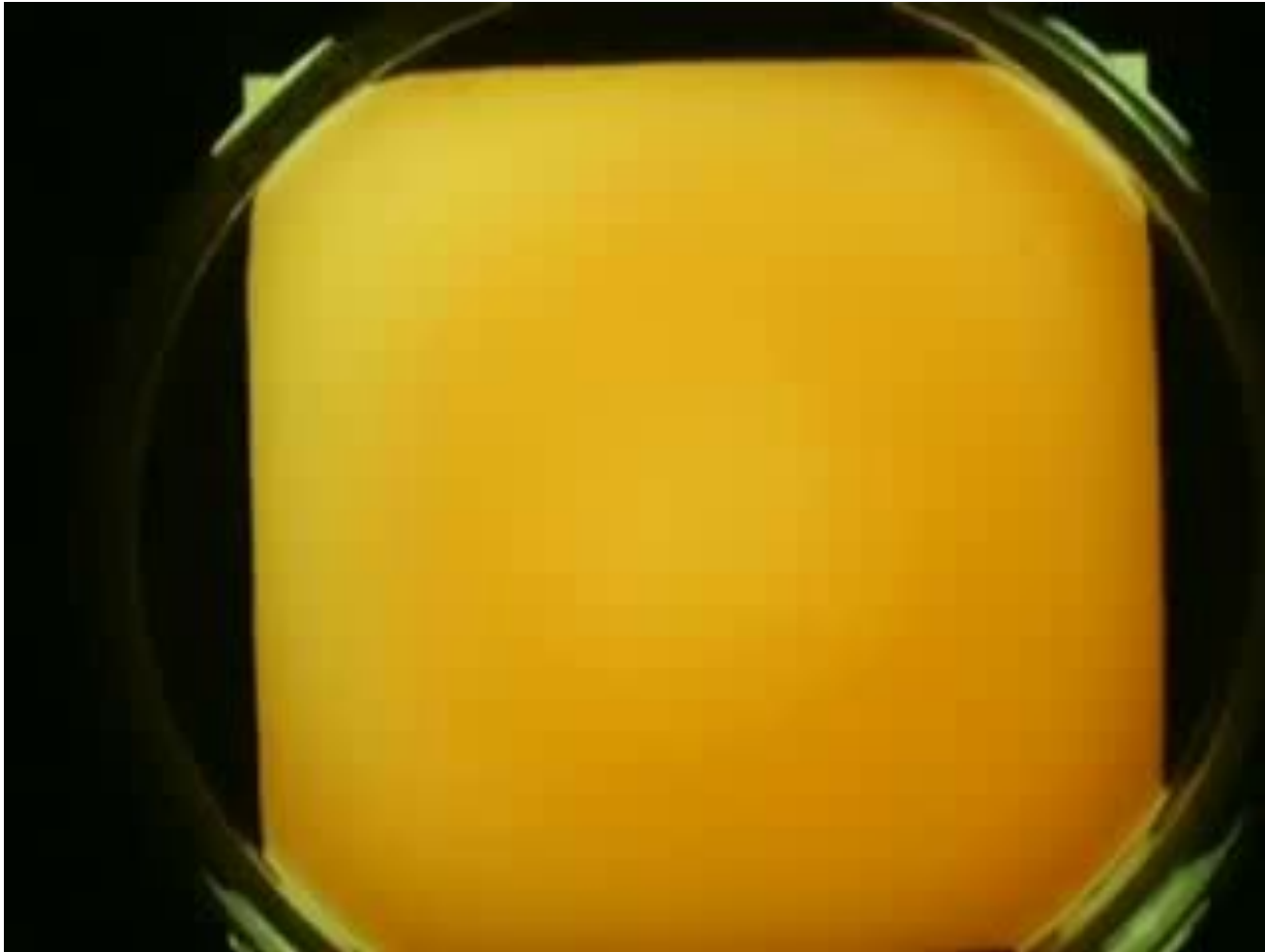
# Волны химической активности (реакция Белоусова- Жаботинского)

Réaction  
oscillante

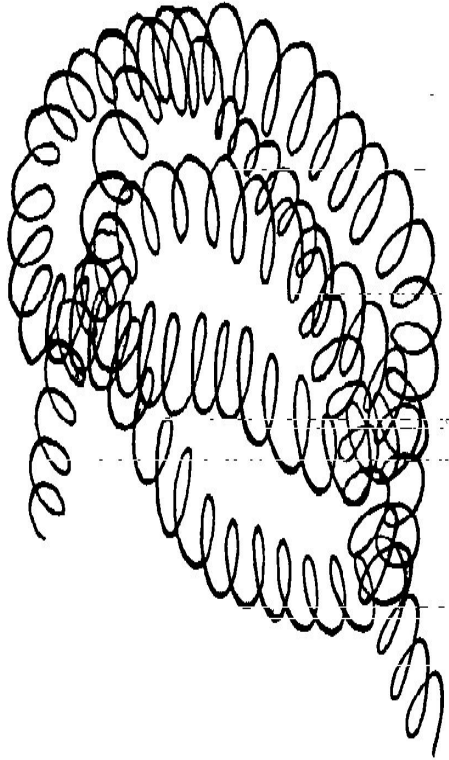
William Escudier

Периодическое изменение окраски содержимого колбы в результате циклического изменения химической активности реагентов

Образование структуры на поверхности смеси  
реагирующих веществ  
(реакция Белоусова-Жаботинского)



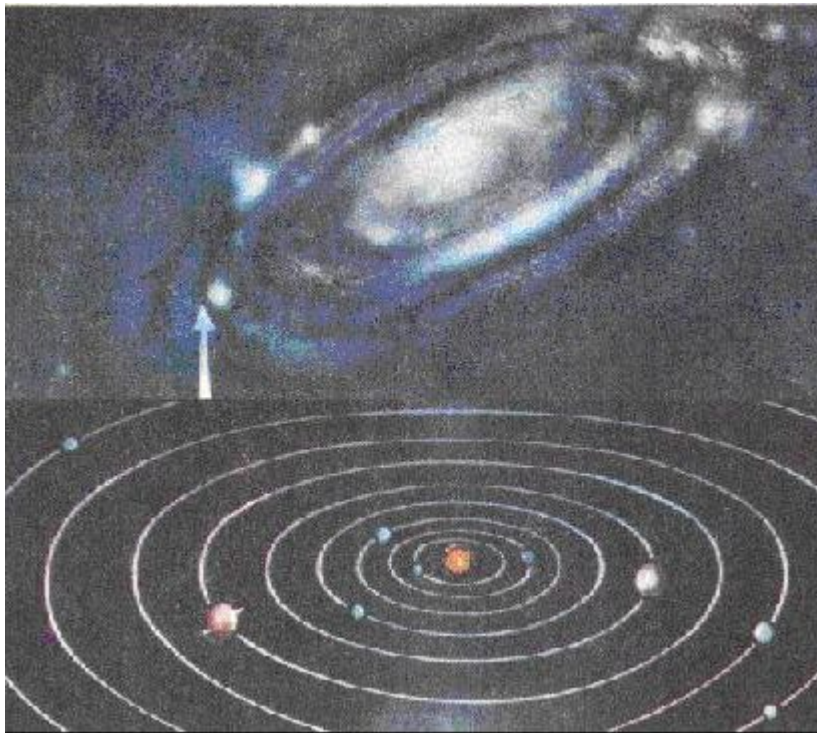
# Примеры спиральных структур в природе:

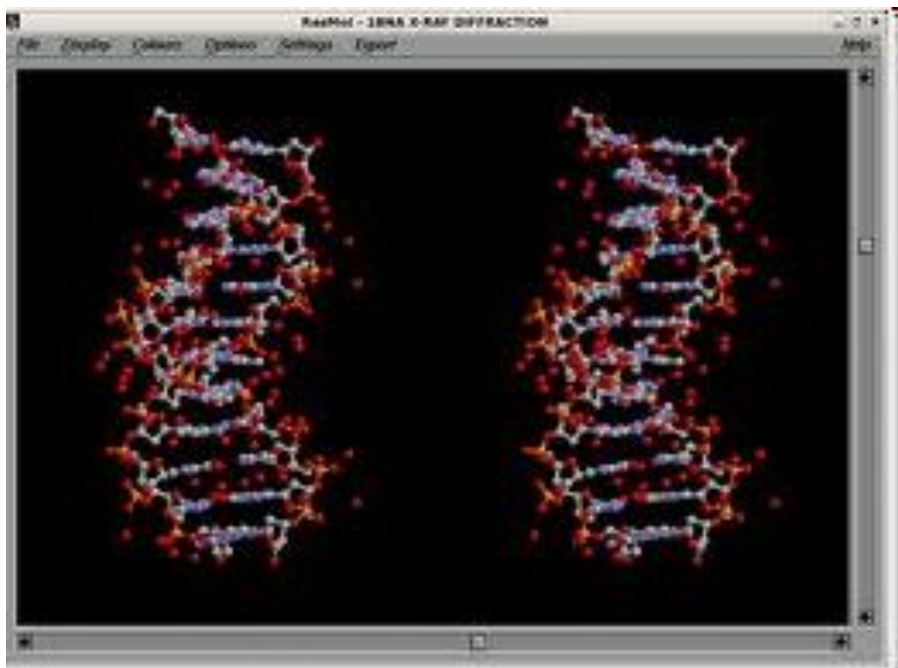


- колонии микроорганизмов;
- ритмичные сокращения сердечной мышцы вызываются спиральной волной возбуждений
- обратное явление – фибрилляция, беспорядочные сокращения, приводящие к гибели.



# Самоорганизация в космических масштабах – спиральные галактики





# Упорядоченность биологических макромолекул

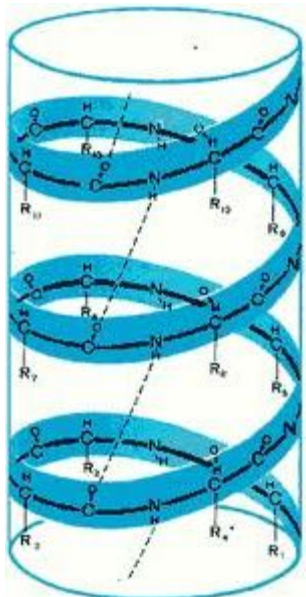


Рис.3.5. Вторичная структура белка



спирулина



Helicoplacus



fotobank.ru







**Колонии бактерий в питательной среде**



# Каким образом возникли высокоорганизованные сложные структуры нашего мира?

**УСТАНОВЛЕНИЕ ПОРЯДКА** сопровождается

1. Возникновением корреляции между элементами или характеристиками системы
2. Понижением однородности и симметрии системы
3. Обычно понижением энтропии.



**Всегда ли необходимо внешнее управляющее воздействие (взмах волшебной палочки), чтобы в системе установилась некая упорядоченность?**

# Концепция самоорганизации

- Во многих специальных условиях в открытой системе **спонтанно** возникает упорядоченность. Для этого не требуется никаких специальных внешних управляющих факторов.



# Самоорганизация – это спонтанное возникновение упорядоченности

- В природе есть ситуации, когда при сочетании определенных условий порядок самопроизвольно возникает из хаоса
- При этом индивидуальные свойства отдельных объектов подавляются в пользу коллективных



# Источник упорядоченности - спонтанное нарушение симметрии

- Стохастическое воздействие окружения во многих случаях приводит к **спонтанному** нарушению симметрии и возникновению **упорядоченности в достаточно больших масштабах**



Для самоорганизации  
необходимо **условие**  
сочетания **как минимум**

**«трех НЕ»**

**Н**Еравновесность

**Н**Езамкнутость

**Н**Елинейность

# Особенности самоорганизации:

- 1. Сильный рост флуктуаций – предвестник новой структуры**
- 2. Упорядоченная структура возникает внезапно (пороговый характер)**

- 3. Упорядоченность** возникает на больших расстояниях
- 4. Дальнодействующая корреляция** – согласованность поведения большого числа частиц.
- 5. Целостность.** Поведение системы нельзя вывести из свойств ее элементов – появляются новые эмерджентные свойства  
(от англ. *emergency* – внезапность)

# **Фейнманов подход в явлении самоорганизации:**

- Проявляется интенсивное взаимодействие объекта и окружения:
- -- Объект испытывает неконтролируемое стохастическое воздействие
- При этом объект обменивается с окружением веществом и энергией!

# При самоорганизации

- **Возникающая система поддерживается в упорядоченном состоянии за счет поддержания **неравновесного** состояния**

При самоорганизации возникают не только новые типы структур, но и новые режимы поведения

**Толпа – беспорядочное движение людей**



**Упорядоченная статическая структура**



# Упорядоченное движение – режим поведения



**В обычных изолированных системах с трением:**

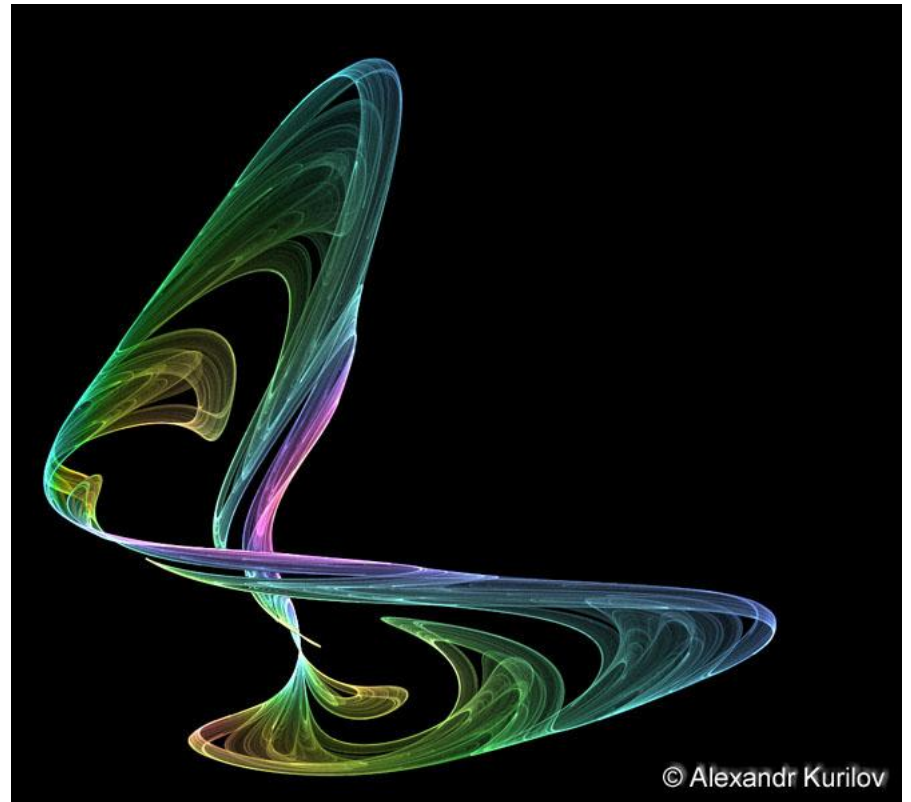
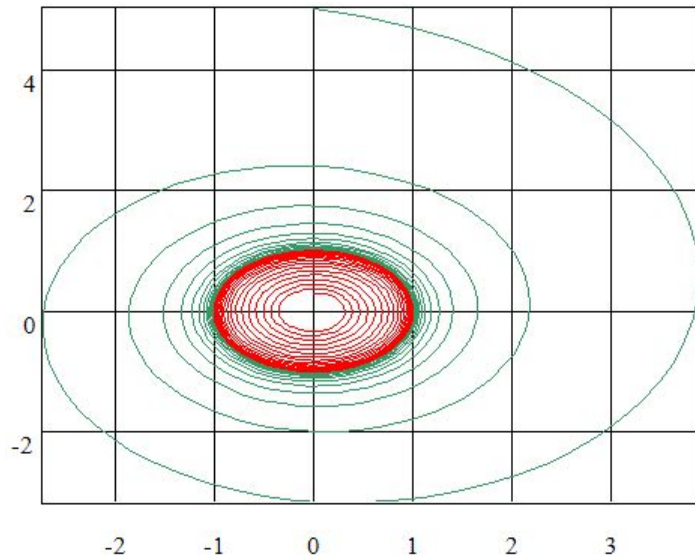
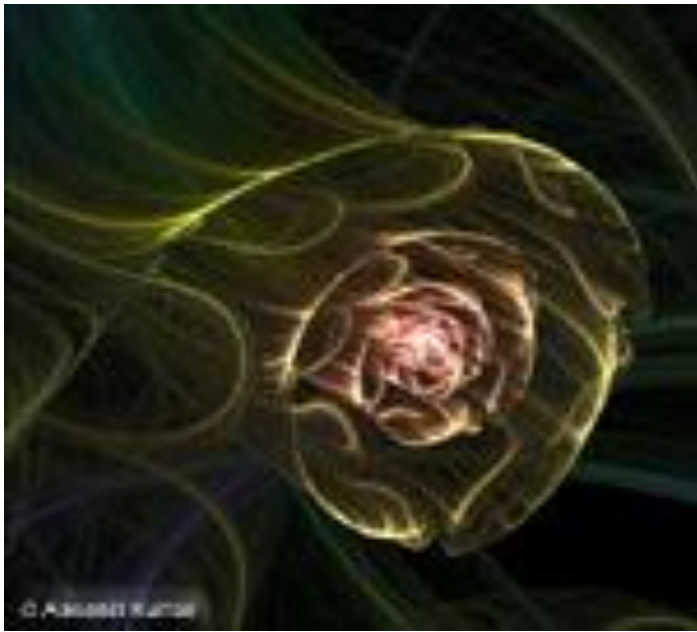
- колебания затухают,
- энергия расходуется на преодоление трения,
- происходит нагрев,
- возможно разрушение структуры,
- энтропия растет.



**Нелинейные открытые  
системы с трением со  
временем приходят в новое  
устойчивое упорядоченное  
состояние – аттрактор**  
**attraction** (англ. – *влечение, притяжение*)

# Аттрактор

(*attract* – притягивать англ.)



# В области нелинейности:

новая структура или *режим поведения* системы приобретает **устойчивость**.

**Флуктуации рождают порядок**

- **Диссипативные структуры** отличаются от других упорядоченных систем, например, **кристаллов**
- **Кристаллы**- это упорядоченные **равновесные** структуры. Они устойчивы безотносительно к диссипации энергии
- Устойчивость диссипативных структур обеспечивается благодаря поддержанию **неравновесных** условий

# Не всякое упорядочивание – самоорганизация!



- При замерзании воды образуется лед – более упорядоченная система

но кристаллизация - это **не самоорганизация**, а фазовый переход между двумя агрегатными состояниями - жидким и кристаллическим.

Процесс равновесный:  $T_{\text{льда}} = T_{\text{воды}}$   
в течение всего времени образования льда

**Самоорганизация - это принципиально неравновесный процесс.**

- Система функционирует как бы «вопреки» II началу термодинамики, т. е. происходит уменьшение ее энтропии
- Это возможно, т.к. система **не изолирована** от окружения, а получает от него энергию и теряет ее

# Развитие через бифуркации

В своем развитии диссипативная структура проходит через состояния, в которых **точный прогноз ее поведения на отдаленное будущее невозможен.**

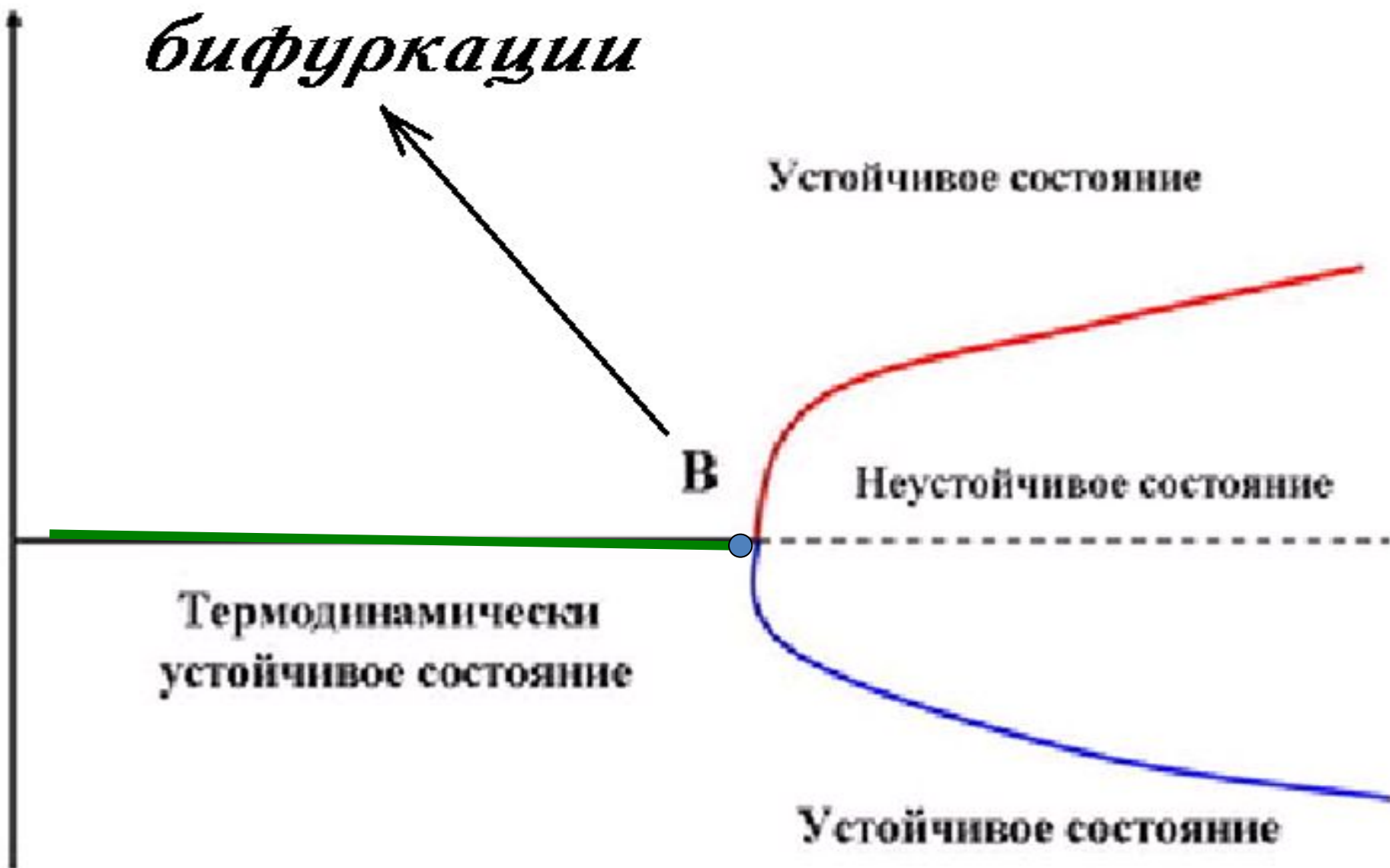
Эти состояния – точки **бифуркации**

**В. Васнецов. Витязь на распутье, 1882 г.** ([Холст](#),  
[Масло](#)) [Государственный Русский музей, Санкт-Петербург](#)

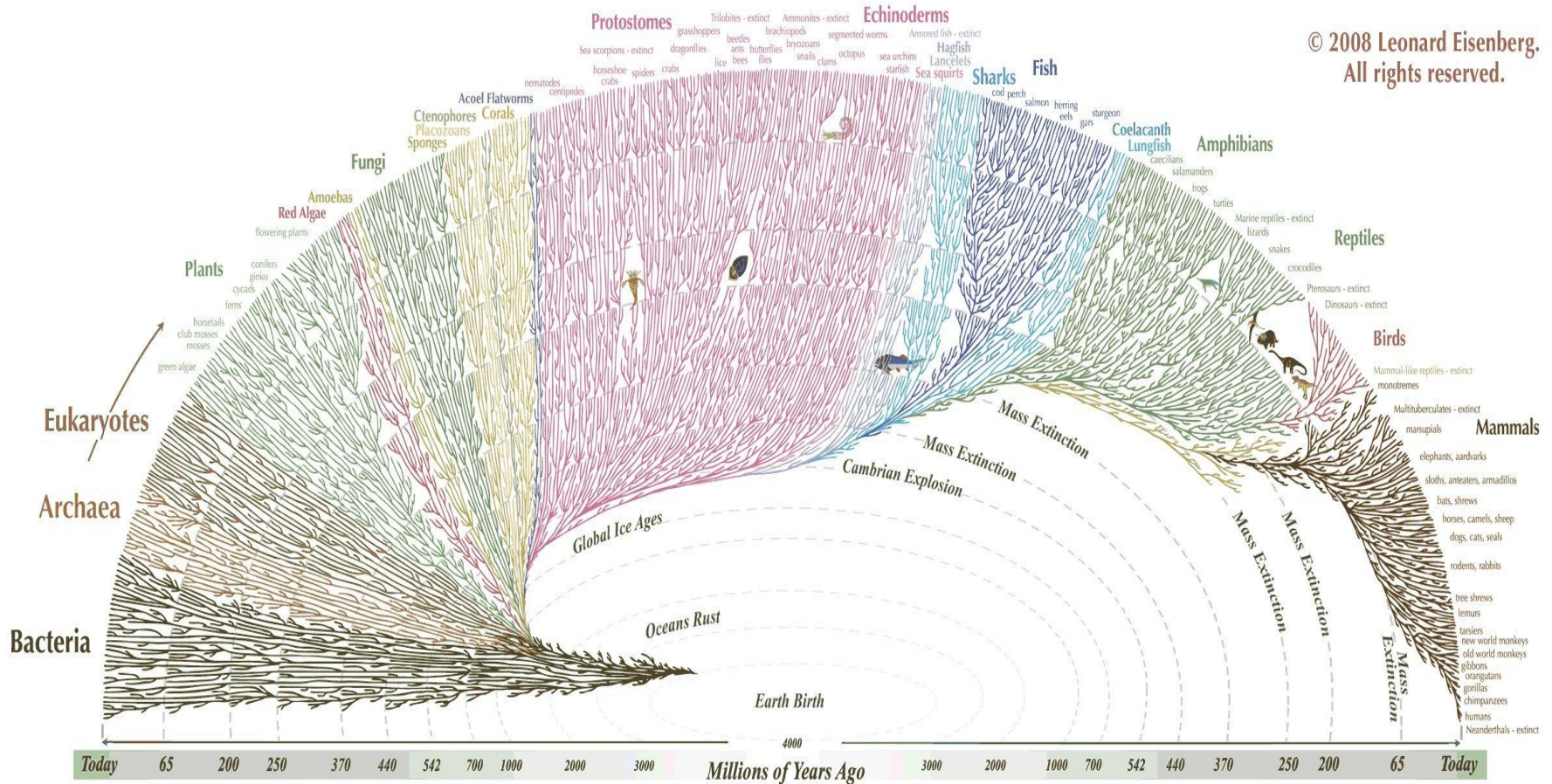




***$B$  - точка  
бифуркации***



# Пример бифуркаций – филогенетическое дерево



© 2008 Leonard Eisenberg,  
All rights reserved.

All the major and many of the minor living branches of life are shown on this diagram, but only a few of those that have gone extinct are shown. Example: Dinosaurs - extinct

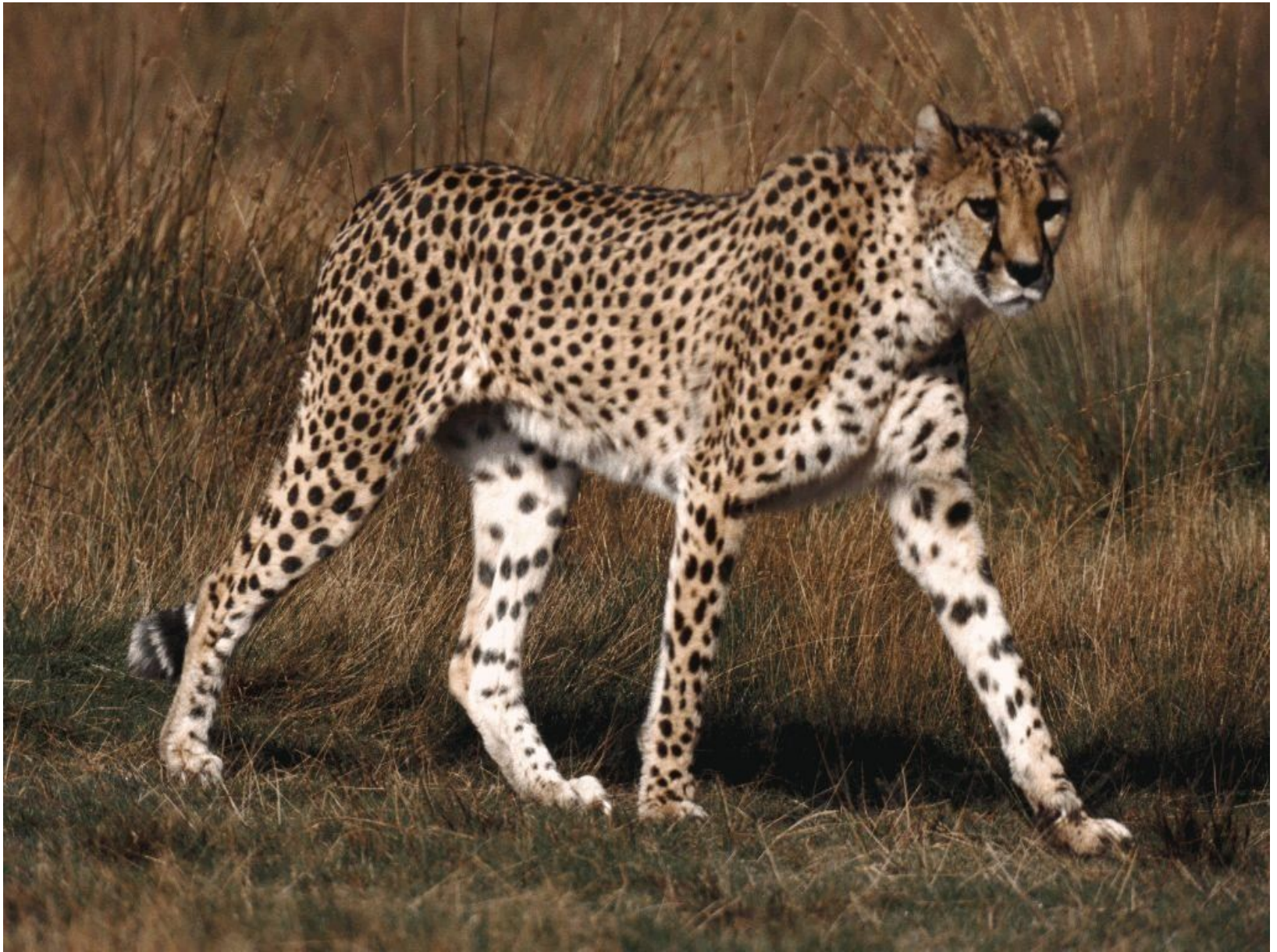


© 2008 Leonard Eisenberg. All rights reserved.  
evogeneo.com

# Самоорганизация в природе

- **Пространственное распределение особей в животном мире**
- **Структура колоний микроорганизмов**
- **Развитие живых организмов в ходе онтогенеза**
- **Узорчатая раскраска животных**











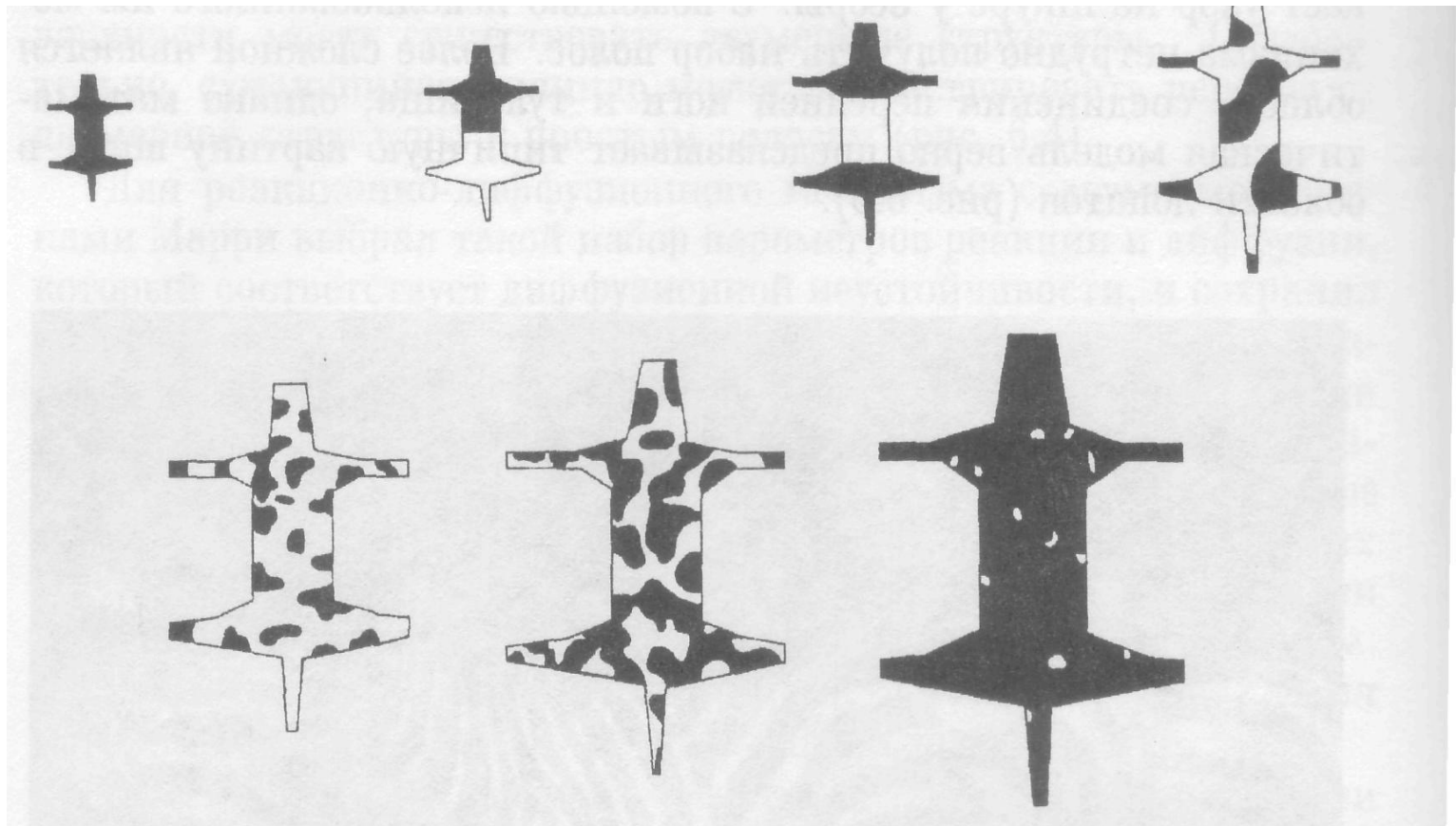








# Изменение структуры раскраски при изменении размеров ЖИВОТНОГО



# Самоорганизация в лабораторных условиях:

<https://youtu.be/FRFqoH1Tv-g>

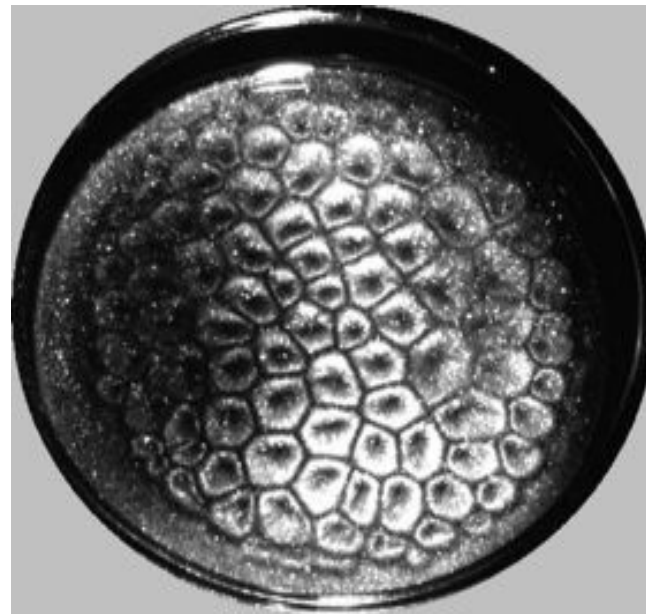
**Ячейки Бенара, возникающие в ранее однородной жидкости при критическом значении температурного градиента**

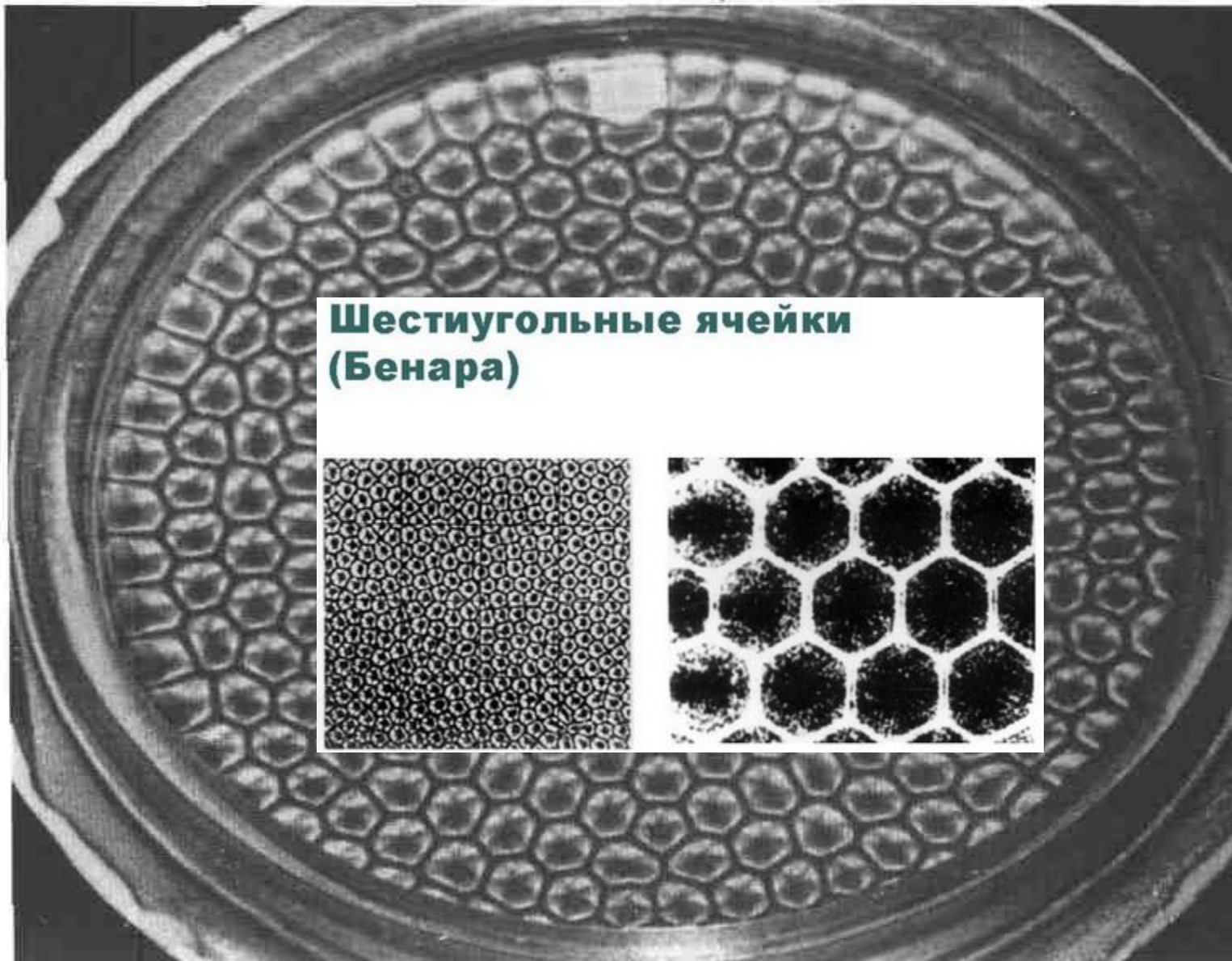
# Опыт Бенара

- Явление открыто в 1900 г.
- Подогревается слой силиконового масла

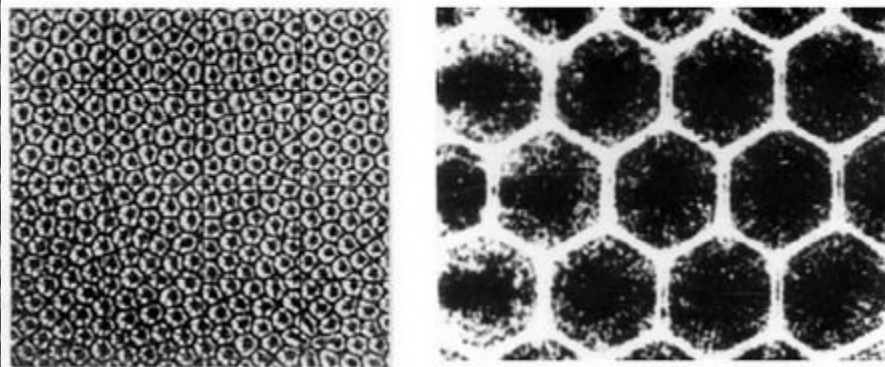


При **определенной температуре** (ключевое слово) по всей толщине слоя внезапно возникают **трубчатые ячейки**

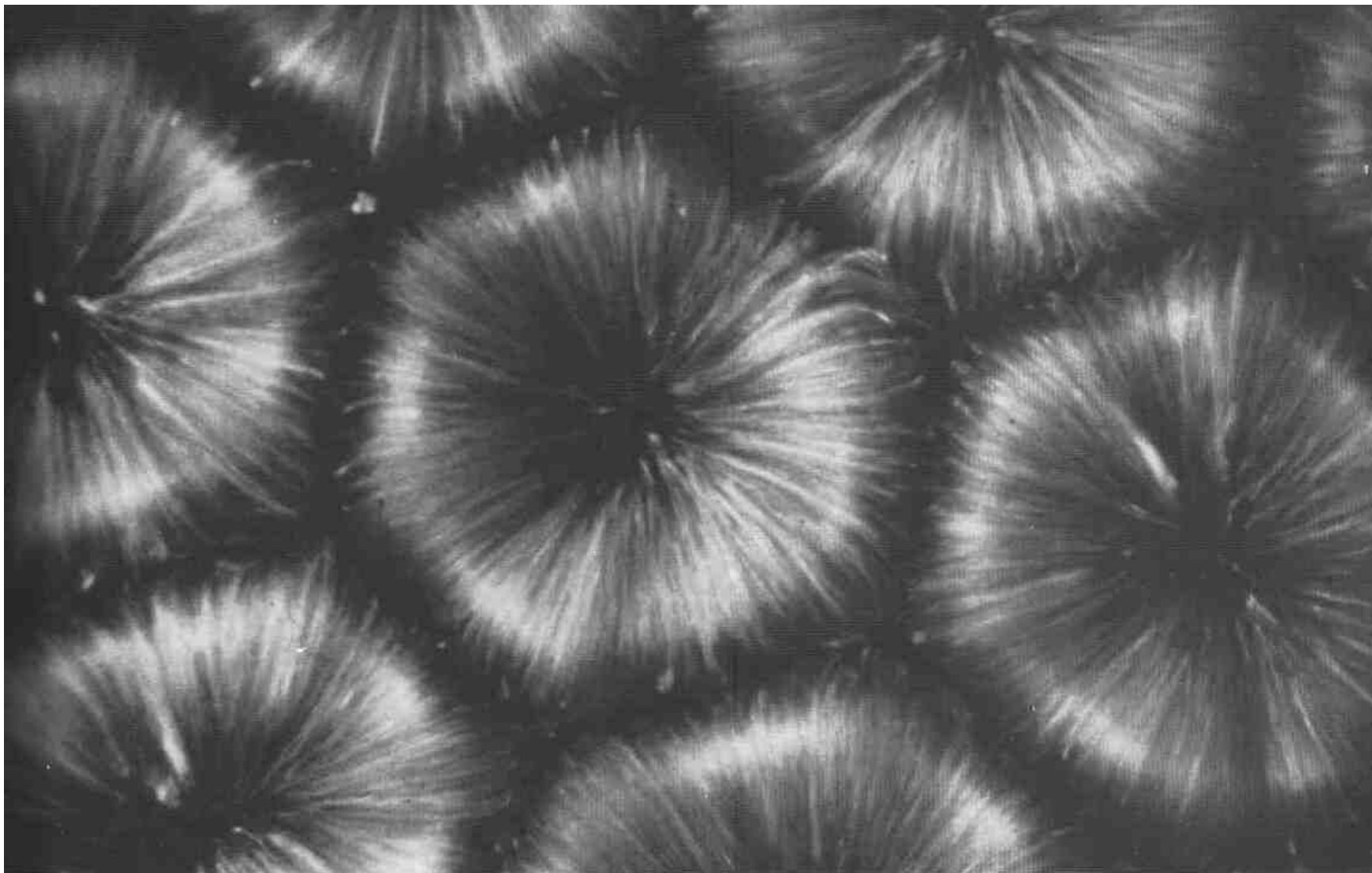




**Шестиугольные ячейки  
(Бенара)**



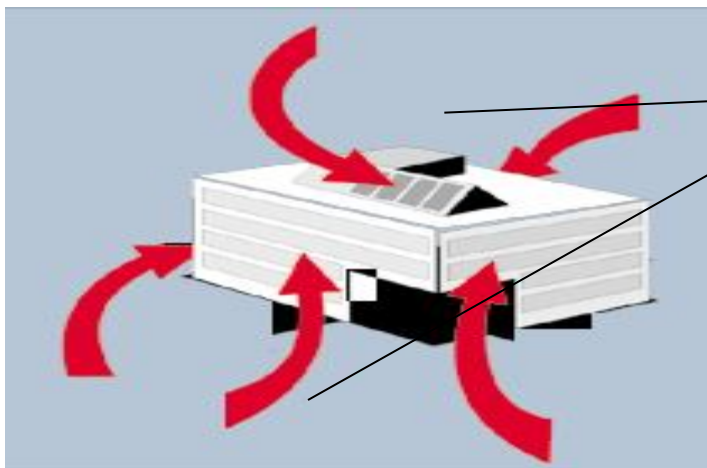
## Увеличенная в 25 раз картина неустойчивости Бенара в жидкости





# СПОСОБЫ передачи энергии в форме теплоты

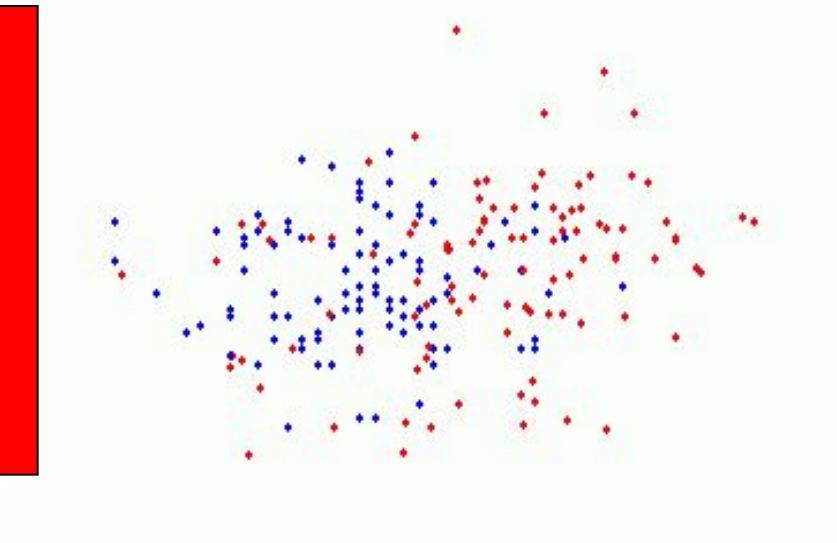
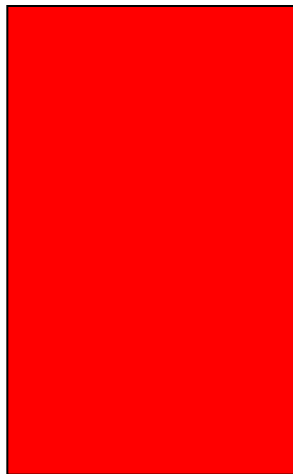
- **1. Теплопроводность** – при непосредственном контакте двух тел с разными температурами за счет потока энергии



Поток энергии из  
окружения

# СПОСОБЫ передачи энергии в форме теплоты

- **2.Диффузия** – без контакта тел, за счет **БЕСПОРЯДОЧНОГО** перемещения частиц промежуточной среды, переносящих энергию

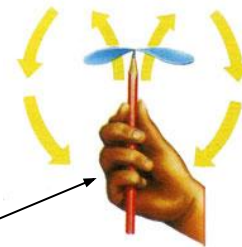
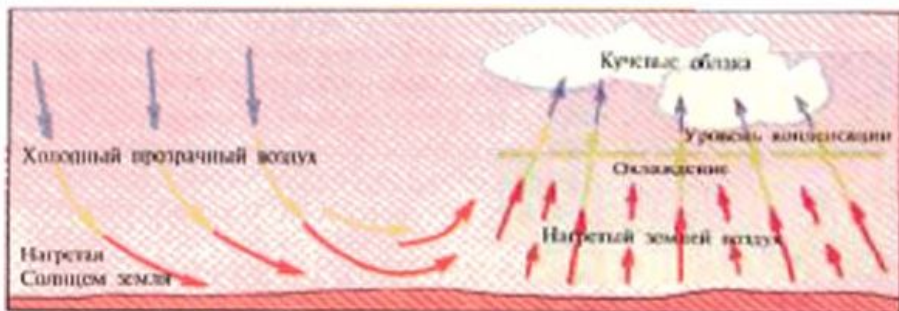




# СПОСОБЫ передачи энергии в форме теплоты

## 3. КОНВЕКЦИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ СЛОЕВ СРЕДЫ

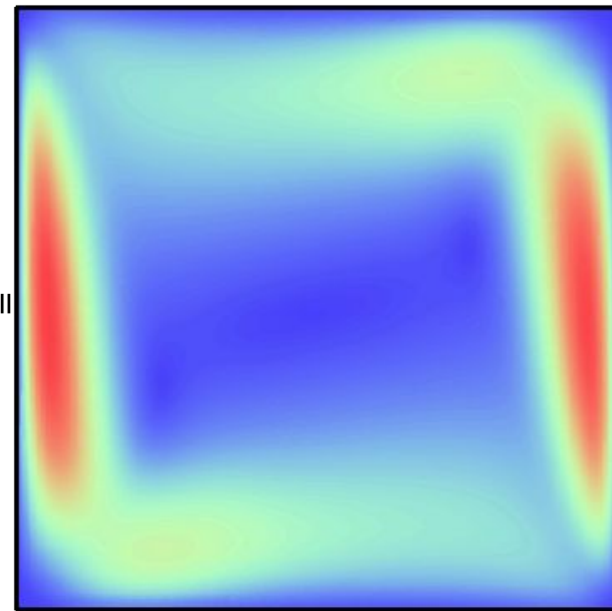
### ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ



МЕХАНИЧЕСКАЯ  
КОНВЕКЦИЯ

Cold wall

Hot wall



Механизм конвекции – **ПОТОКИ**  
**вещества** за счет разности  
температур:

**При нагревании – низшие слои  
жидкости горячее, их плотность  
меньше, чем более верхних, и  
они «всплывают».**

**Верхние слои – опускаются как  
более «тяжелые».**

# ИТАК, как протекает процесс образования ячеек Бенара?

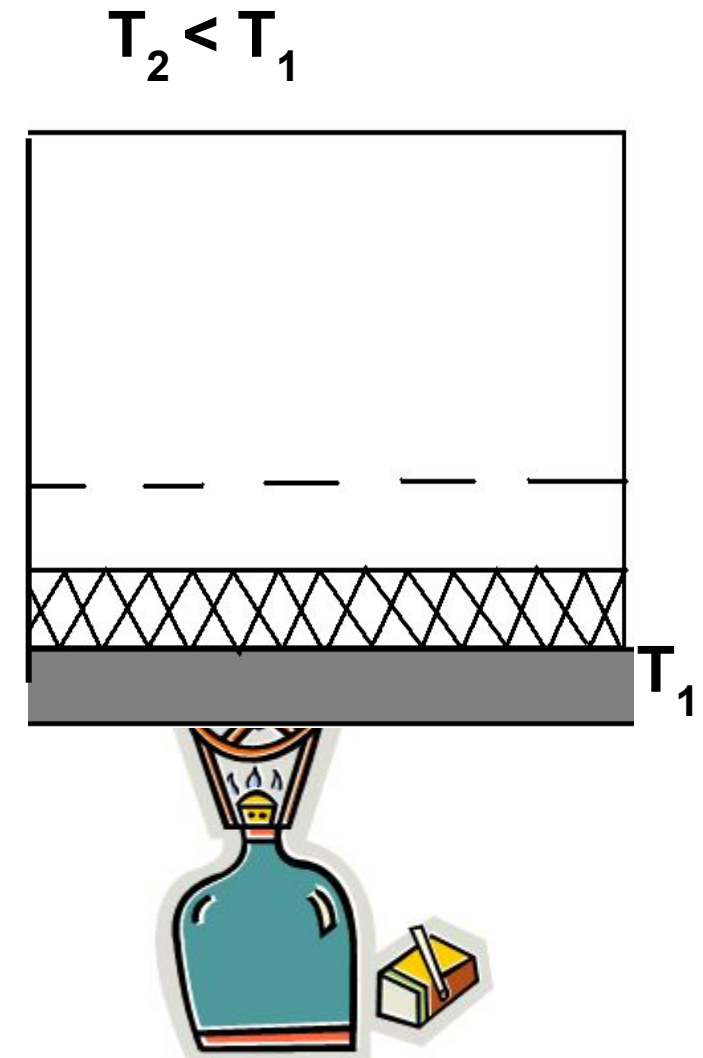
- Создается **перепад температур** между нижним и верхним слоями жидкости
- Сначала движению жидкости препятствует ее **вязкость**
- Позже возникают восходящие и нисходящие потоки жидкости – конвекция



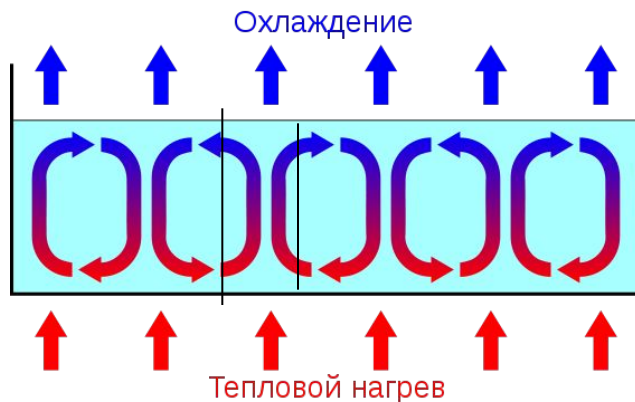
## Модель образования ячеек Бенара

Теплообмен между верхом и низом: сначала путем **теплопроводности** (поток энергии), а затем - начинается **конвекция** (поток частиц).

**ПРОИСХОДИТ СМЕНА РЕЖИМА ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ и резкий рост потока энергии за счет упорядоченного конвективного движения!**



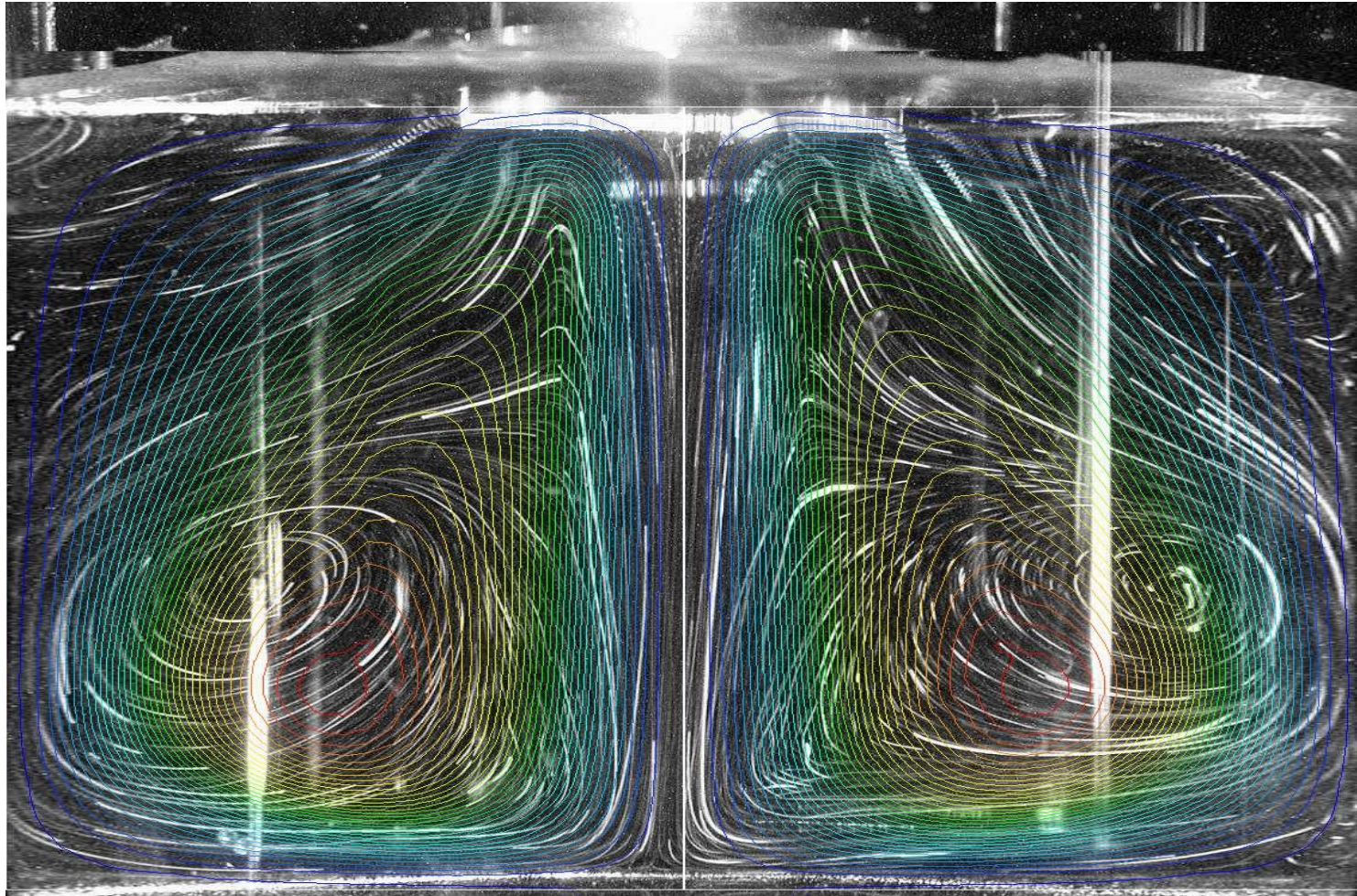
- Неупорядоченное тепловое движение сменяется **согласованным** упорядоченным движением «струй»
- Жидкость разбивается на шестиугольные **ячейки** (~ мм) - возникает структура
- При дальнейшем нагреве ячейки начинают **колебаться** с определенной частотой.
- Позже возникает целый **набор** возможных частот



**Огромное** число частиц находится в **согласованном** движении в пределах одной ячейки



# Конвективные потоки в жидкости



# Ключевые понятия самоорганизации на примере ячеек Бенара:

- Перепад температур
- Потоки энергии, частиц
- Особые свойства жидкости  
(специальный сорт масла)
- Вязкость жидкости
- Огромное число частиц

.....



# Начальная стадия процесса:

• **При малых  $\Delta T$**  (еще где-то вблизи от равновесия) теплообмен происходит за счет индивидуальных вкладов отдельных молекул, движущихся хаотически- теплопроводность.

Сама жидкость неподвижна

Случайно возникающие слабые потоки молекул рассасываются благодаря **вязкости**

Конвекции нет, т.к. вязкость стабилизирует жидкость.

Жидкость находится в **устойчивом** состоянии

# При больших $\Delta T$ – объект находится вдали от равновесия

- эффективность переноса энергии через теплопроводность падает;
- влияние вязкости ослабевает и случайные потоки частиц не рассасываются
- возникает конвекция – новый, более эффективный режим теплообмена за счет **коллективного** движения большого числа молекул

# Условие самоорганизации 1

**Перепад температур**

**Потоки энергии, частиц**

**Особые свойства**

**жидкости (сорт масла)**

**Вязкость**

**жидкости**

**Огромное число частиц**

Большой перепад температур означает, что наступает

**Сильно**

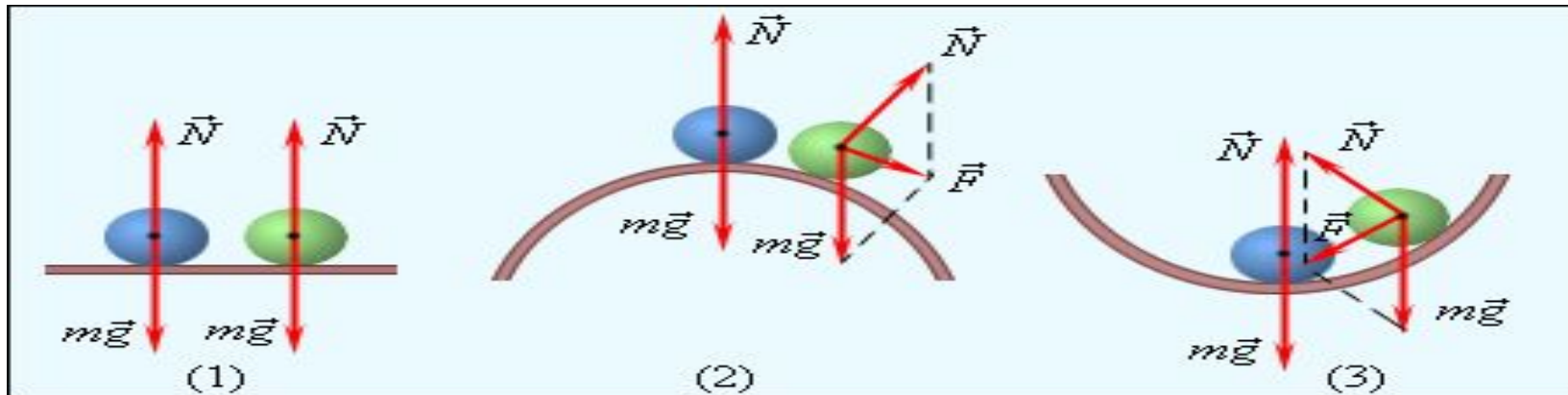
**неравновесное состояние:**

**большие флуктуации, система находится в неустойчивом состоянии**

# При пороговом значении $\Delta T$

- Стабилизирующее влияние вязкости становится недостаточным и состояние жидкости теряет устойчивость.

## Механическая аналогия



Безразличное  
состояние

Неустойчивое  
состояние

Устойчивое  
состояние 81

## Следующее условие:

- Верхняя поверхность жидкости **рассеивает** подводимую к ней энергию во внешнюю среду
- Вместе с ней в окружение уходит и энтропия, поддерживавшая «беспорядок».
- Возникает своеобразный «энтропийный насос», откачивающий энтропию во вне
- Понижение энтропии способствует возникновению особого порядка!

# Условие 2

Перепад температур

**Потоки энергии, частиц**

Особые свойства жидкости (сорт масла)

Вязкость жидкости

Огромное число частиц

**2. Незамкнутость системы обеспечивает потоки вещества, энергии и энтропии в окружение**

## Условие 3

Перепад

температур

Потоки энергии,

частиц

**Особые свойства  
жидкости (сорт  
масла)**

Вязкость жидкости

Огромное число

частиц

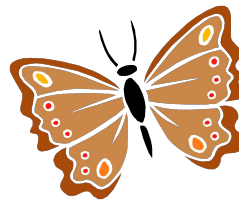
***нелинейность***  
возникают большие  
последствия от малых  
воздействий.

Метафора – «Эффект бабочки»

Пекин: → Нью-Йорк

Взмах  
крыльями

Буря





- Случайно (флуктуационно) возникшие конвекционные потоки усиливаются за счет ***особых свойств*** жидкости и принимают макроскопические размеры

**линейный отклик :**  $y \sim x$   
(адекватная реакция на воздействие)

Если отклик системы  $y$  возрастает непропорционально воздействию  $x$ ,  
напр., по закону  $y \sim x^n$ ,

имеет место **нелинейный отклик.**

**Система называется нелинейной**

**Даже малые воздействия в нелинейных системах ведут к нарастанию реакции объекта и качественному изменению его поведения.**

# В опыте Бенара ПРИ ПОРОГОВОМ ЗНАЧЕНИИ $\Delta T$

- проявляется **нелинейность** свойств ИСПОЛЬЗУЕМОЙ жидкости, усиливающая ее реакцию на малые воздействия
- возникает **УСТОЙЧИВАЯ** ячеистая структура – система переходит в качественно новое состояние порядка.

# Условие 3

Перепад  
температур  
Потоки энергии,  
частиц  
**Особые свойства  
жидкости (сорт  
масла)**  
Вязкость жидкости

Огромное число  
частиц

**Н**елинейная  
реакция системы  
на воздействие.  
Флуктуации  
(отклик) сильно  
растут

Перепад  
температур  
Потоки энергии,  
частиц  
Особые свойства  
жидкости (сорт  
масла)  
**Вязкость жидкости**

Огромное число  
частиц

**Большие потери**  
**(диссипация)**  
**энергии.**  
**Возникающие**  
**структуры**  
**называются**  
***диссипативными***

**Перепад  
температур  
Потоки энергии,  
частиц  
Особые свойства  
жидкости (сорт  
масла)  
Вязкость жидкости**

**Огромное число  
частиц**

**Возникает  
корреляция в  
макроскопической  
области.**

**Она проявляется в  
виде  
пространственной  
структуры**



**В подобных системах  
рассеяние энергии  
сопутствует - «сбросу»  
энтропии и снижению  
симметрии, т.е. к  
возникновению  
упорядоченной структуры.**

- **Диссипативные структуры** – это **устойчивые** структуры, возникающие в результате развития **неустойчивостей**
- **Диссипативные структуры** – это **ОТКРЫТЫЕ** системы, энергия которых необратимо рассеивается в окружение.

# Диссипативные структуры способны:

- В состоянии, **ДАЛЕКОМ** от **РАВНОВЕСИЯ**, не только устойчиво существовать, но и развиваться;
- При **ПОЛУЧЕНИИ ЭНЕРГИИ** извне приобретать **новые формы** в результате флуктуаций, усиленных **ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ**.

# Диссипативная структура - оксиморон

- **Диссипация** – рассеивание, утечка, потеря, разрушение (порядка)
- **Структура** – воплощение порядка
- Система избавляется от прежней формы и реорганизуется в новую, более подходящую к внешним условиям.

# Концепция самоорганизации

При выполнении определенных условий на **отношения между объектом и его окружением** повышение уровня сложности (организации) в открытых природных системах может происходить **самопроизвольно.**

# Дополнительные материалы по теме лекции

1. Фильм «Тайная жизнь хаоса»

Оригинал на англ. яз.:

[http://www.dailymotion.com/video/xv1j0n\\_the-secret-life-of-chaos\\_shortfilms](http://www.dailymotion.com/video/xv1j0n_the-secret-life-of-chaos_shortfilms)

или с русским дубляжом

<https://rutube.ru/video/f0d456f786edf11e41a8ea2b5d91f6a0/>

2. Плакат «Фракталы»

<http://elementy.ru/posters/fractals>



# Самостоятельная работа №6

**Выполнить до истечения дня  
лекции**

*Esystem.pfur.ru* -> мои курсы ->  
«Концепции современного  
естествознания...» ->

**САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА  
ПОСЛЕ ЛЕКЦИИ 6**

# ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- Какими процессами сопровождается возникновение более упорядоченной структуры?
- Что означает термин «самоорганизация»?
- Как ведет себя энтропия системы при переходе к равновесию и упорядочивании системы?
- Приведите примеры необратимых явлений в природе. При каких воздействиях они имеют место?
- Обратимы ли квантовые состояния? Почему рост однородности системы связан с повышением ее симметрии?
- Приведите примеры самоорганизации в живой и неживой природе.
- Всегда ли возникновение упорядоченной структуры является самоорганизацией? Приведите поясняющий пример.

# ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- В чем состоит самоорганизация в случае химической реакции Белоусова-Жаботинского?
- Перечислите условия самоорганизации. Поясните их роль при самоорганизации на примере возникновения ячеек Бенара.
- Что такое открытая система? Приведите по одному примеру замкнутой и открытой систем. Возможна ли самоорганизация в замкнутых системах?
- Что такое нелинейные эффекты? Почему ячейки Бенара не возникают в воде?
- Что называют «диссипативными структурами»?
- В чем состоят особенности равновесия в диссипативных структурах?
- Что такое бифуркация? Приведите пример точки бифуркации. Что происходит с системой в этой точке?