

# Биофизика как наука





В **1961** году был создан Международный союз чистой и прикладной биофизики (IUPAB)



**Цель биофизики:** изучение фундаментальных процессов, обеспечивающих основу жизнедеятельности всех без исключения живых организмов, независимо от уровня развития, эволюционной ступени, возраста индивидуума, среды обитания



# ОСОБЕННОСТИ БИОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ  
МЕТОДЫ

ИЗУЧАЕМЫЙ ОБЪЕКТ  
РАССМАТРИВАЕТСЯ  
В ЦЕЛОМ

СИСТЕМНЫЙ  
ПОДХОД

# Значение биофизики для теоретической и практической медицины

- раскрытие механизмов возникновения и протекания патологических процессов в организме на молекулярном уровне
- разработка путей лечения заболевания
- разработка методов исследования

# ОСНОВЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ



- Основные понятия термодинамики
- Первый и второй законы термодинамики
- Биокалориметрия
- Термодинамические потенциалы
- Термодинамическое равновесие состояние и стационарное состояние
- Уравнение Пригожина и его анализ
- Понятие обобщенной силы и потока, их взаимосвязь
- Принцип взаимности Онзагера. Теорема Пригожина

# ТЕРМОДИНАМИКА – наука, изучающая наиболее общие законы превращения энергии



★ Превращение энергии

• Потенциальная энергия превращается в кинетическую.

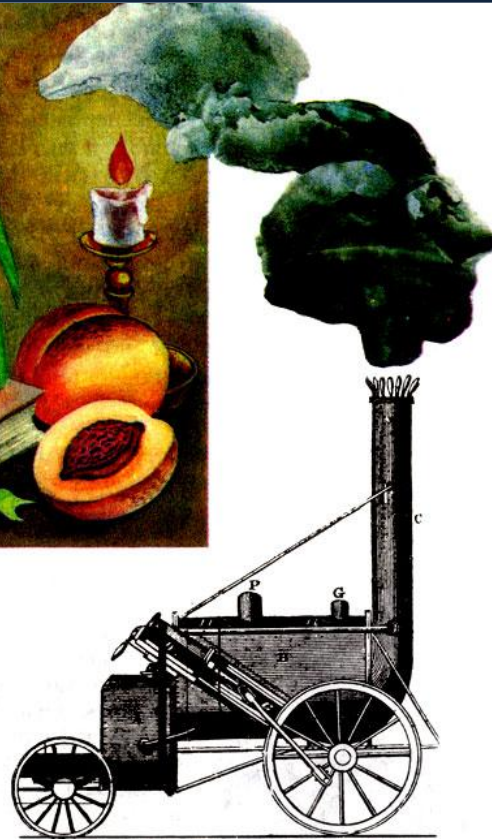
★  $E_p = mgh$   $E_k = 0$  ★

h

$E_p = 0$   $E_k = \frac{mv^2}{2}$

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА – часть пространства с материальным содержанием, ограниченная от окружающей сре



Любой объект материального мира является термодинамической системой.

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

**ИЗОЛИРОВАННЫЕ**

**ЗАКРЫТЫЕ**

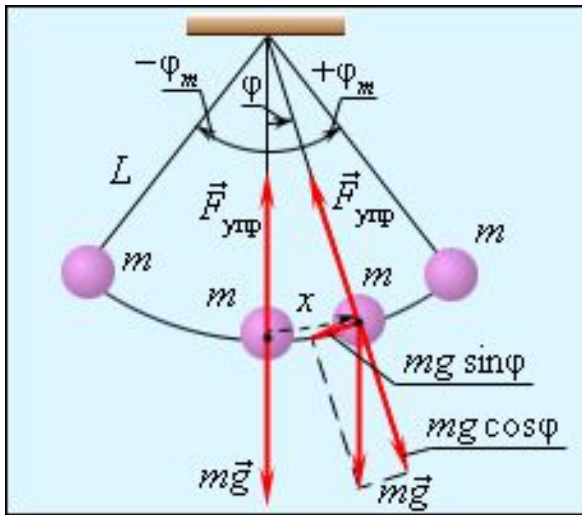
**ОТКРЫТЫЕ**

система

система

система

e



**Математический маятник - ИЗОЛИРОВАННАЯ СИСТЕМА**



**ЗАМКНУТАЯ СИСТЕМА**



**ОТКРЫТАЯ СИСТЕМА**

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

```
graph TD; A[ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ] --> B[ЭКСТЕНСИВНЫЕ  
Факторы емкости]; A --> C[ИНТЕНСИВНЫЕ  
Фактор интенсивности];
```

**ЭКСТЕНСИВНЫЕ**

Факторы емкости

$m, V$

**ИНТЕНСИВНЫЕ**

Фактор интенсивности

$T, p$

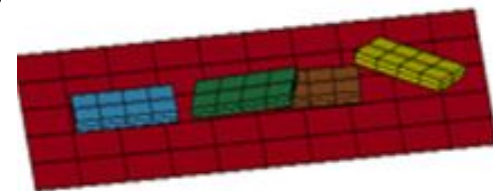
**СВЯЗИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ВЫРАЖАЮТ  
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ**

Произведение фактора емкости и фактора  
интенсивности - **энергия**

# СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ

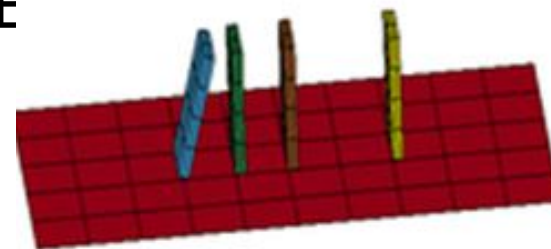
## РАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯНИЕ:

ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ НЕ МЕНЯЮТСЯ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ, ИНТЕНСИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОДИНАКОВЫ ВО ВСЕХ ТОЧКАХ СИСТЕМЫ .т.е.ГРАДИЕНТЫ РАВНЫ 0



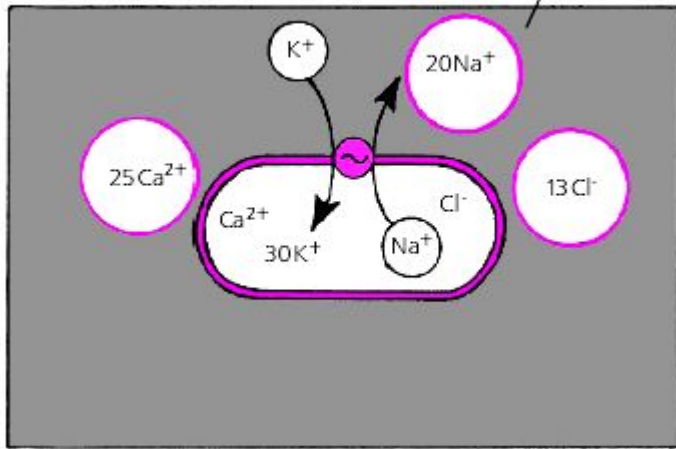
## НЕРАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯНИЕ:

ИНТЕНСИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕОДНАКОВЫ В РАЗНЫХ ТОЧКАХ СИСТЕМЫ, А ЗНАЧИТ, СУЩЕСТВУЮТ **ГРАДИЕНТЫ**, ЧТО ПРИВОДИТ К ПЕРЕХОДУ В НОЕ

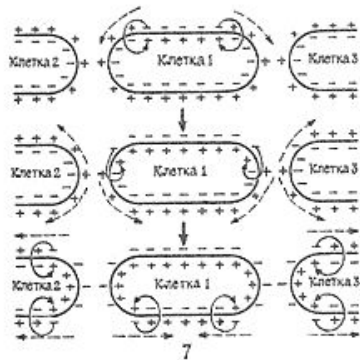
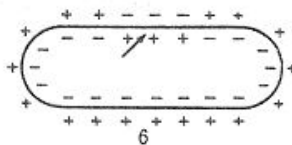
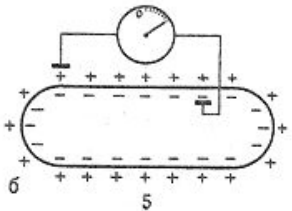
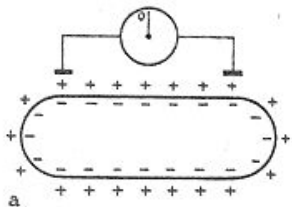




Внеклеточная жидкость



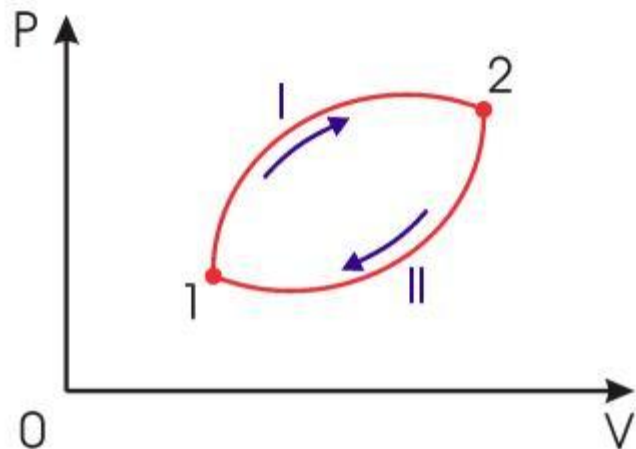
# Концентрационный градиент



# Электрический градиент

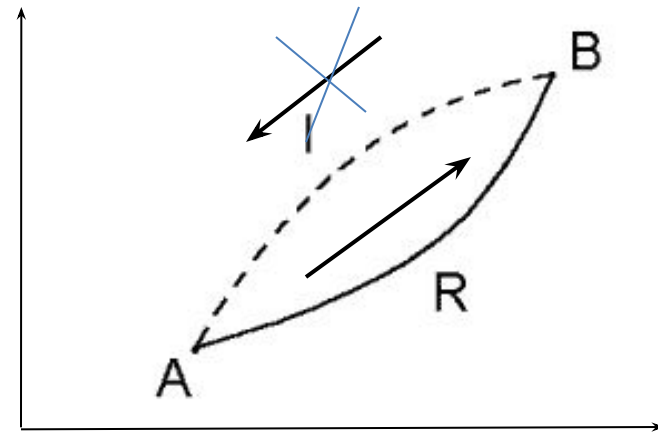
# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

## ОБРАТИМЫЕ



ВОЗМОЖЕН ПЕРЕХОД ИЗ 1 В 2 И ИЗ 2 В 1 БЕЗ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ

## НЕОБРАТИМЫЕ



ВОЗМОЖЕН ПЕРЕХОД ИЗ А В В ЧЕРЕЗ R. ПЕРЕХОД ИЗ В В А ЧЕРЕЗ I НЕВОЗМОЖЕН, Т.К. ПЕРЕХОД А-R-В СОПРОВОЖДАЕТСЯ ПОТЕРЯМИ ЭНЕРГИИ



**Юлиус  
Роберт  
Майер  
(1814-1878)**

# **ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ**

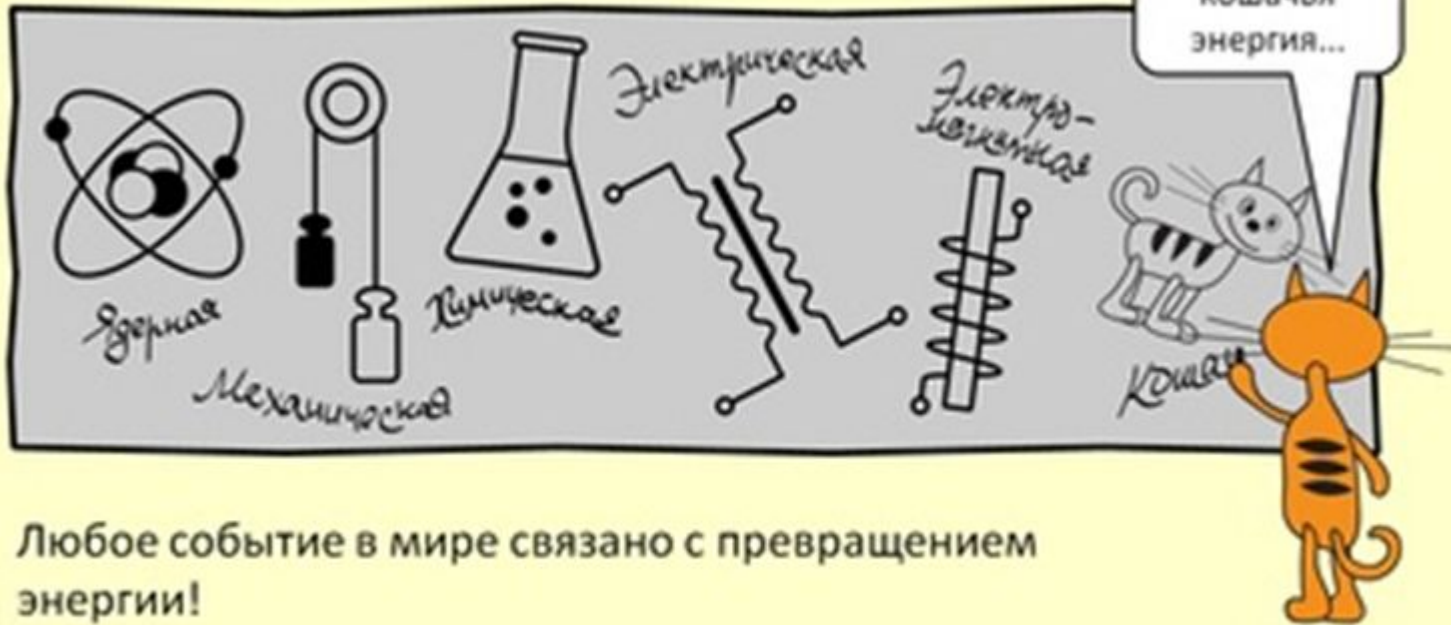
## **КОНКРЕТИЗАЦИЯ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ**



**Джеймс Прескотт  
Джоуль  
(1818-1889)**

# Энергия характеризует способность тела совершать работу

## Некоторые виды энергии



Любое событие в мире связано с превращением энергии!

Энергия не возникает **из ничего** и не исчезает, она **превращается** из одной формы в другую.

ЭНЕРГИЯ	ФАКТОР ИНТЕНСИВНОСТИ	ФАКТОР ЕМКОСТИ
КИНЕТИЧЕСКАЯ	$\frac{1}{2}v^2$	МАССА
ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ	ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ	ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ
ТЕПЛОВАЯ	ТЕМПЕРАТУРА	ТЕПЛОЕМКОСТЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ	ЗАРЯД
ХИМИЧЕСКАЯ	ХИМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ	КОЛИЧЕСТВО МОЛЕЙ ВЕЩЕСТВА

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОТЕНЦИАЛЫ

**U** - ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

**H** - ЭНТАЛЬПИЯ

**S** - ЭНТРОПИЯ

**G** - СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ ГИББСА

**F** - СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ

ГЕЛЬМГОЛЬЦА

□ ПОЛНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЫ

□ ФУНКЦИИ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ, т.к. не зависят от пути протекания процесса

# ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

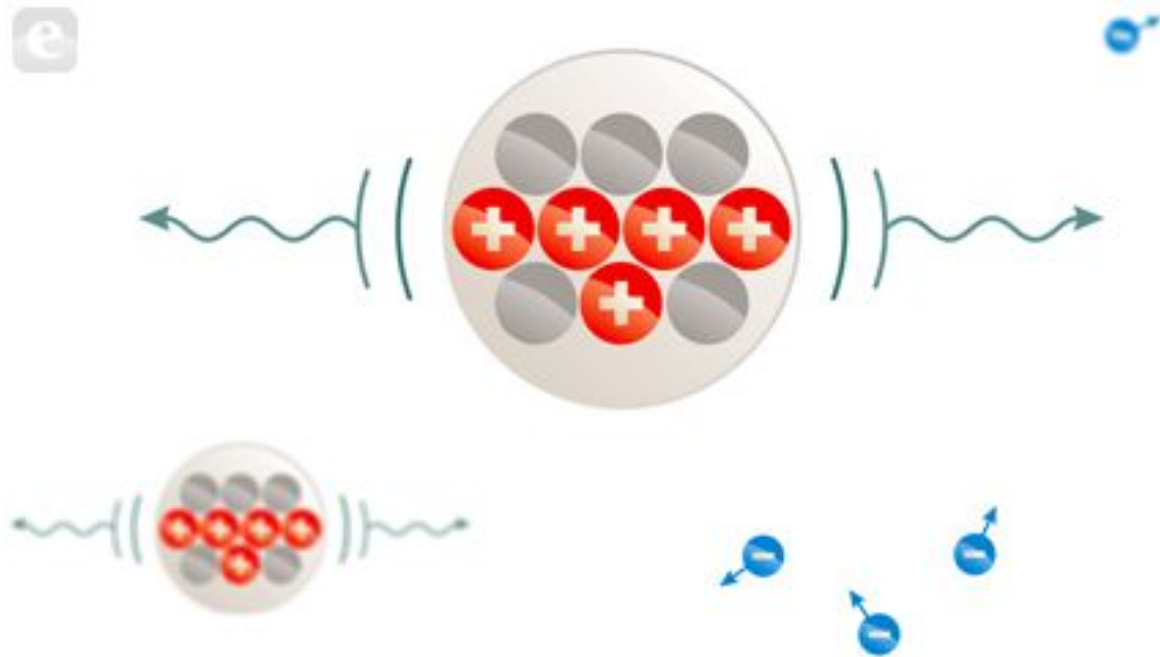
$$U = f(m, p, V, T)$$

$dU$  – полный дифференциал

$$\oint dU = 0$$

# Основа внутренней энергии системы

**U** — энергия атомных ядер  
и электронов







# ФОРМУЛИРОВКА ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ:

ИЗМЕНЕНИЕ  
**ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ**  
СИСТЕМЫ ПРОИСХОДИТ  
ЗА СЧЕТ

□ **СОВЕРШЕНИЯ РАБОТЫ**

ИЛИ

□ **ПЕРЕДАЧИ ТЕЛУ**

**ОПРЕДЕЛЕННОГО**

**КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ**





## ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

$$dU = \partial Q \pm \partial W$$

+ $W$  работа совершается над системой  
- $W$  работу совершает система над  
окружающей средой

# СЛЕДСТВИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ

**ЭНТАЛЬПИЯ** – функция состояния системы  
при  $p = \text{const}$

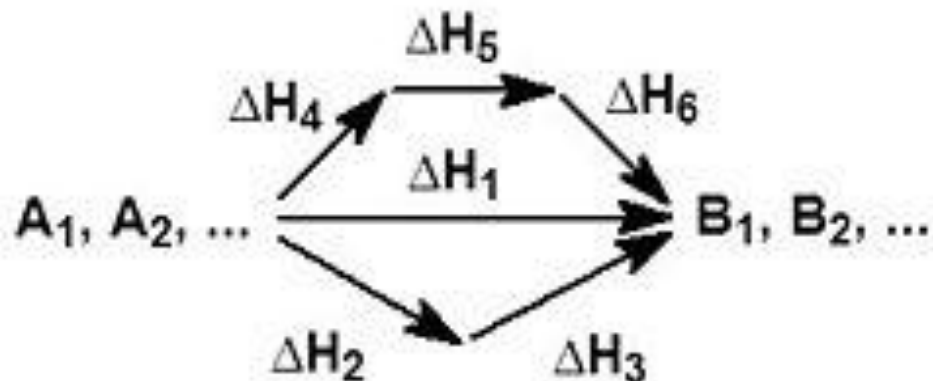
$$dH = dU + pdV$$

# ЗАКОН ГЕССА



Г.И.Гесс  
(1802–1850)

**Теплота, выделяемая в химическом процессе не зависит от того, протекает этот процесс в одну или в несколько стадий**



Согласно закону Гесса, тепловые эффекты всех этих реакций связаны следующим соотношением:

$$\Delta H_1 = \Delta H_2 + \Delta H_3 = \Delta H_4 + \Delta H_5 + \Delta H_6$$

Практическое значение закона Гесса: возможность рассчитывать тепловые эффекты разнообразных химических процессов.

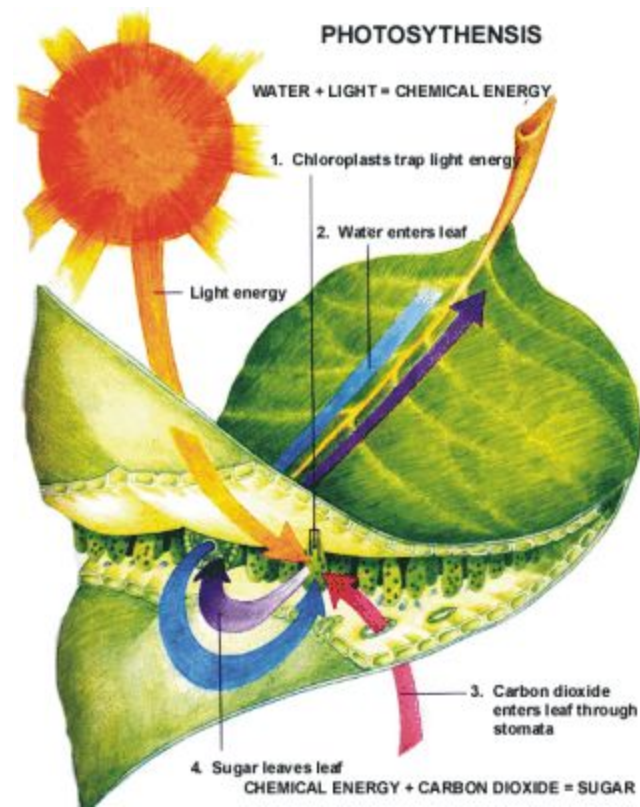


**ТЕПЛОВАЯ МАШИНА:**

ТЕПЛО → РАБОТА

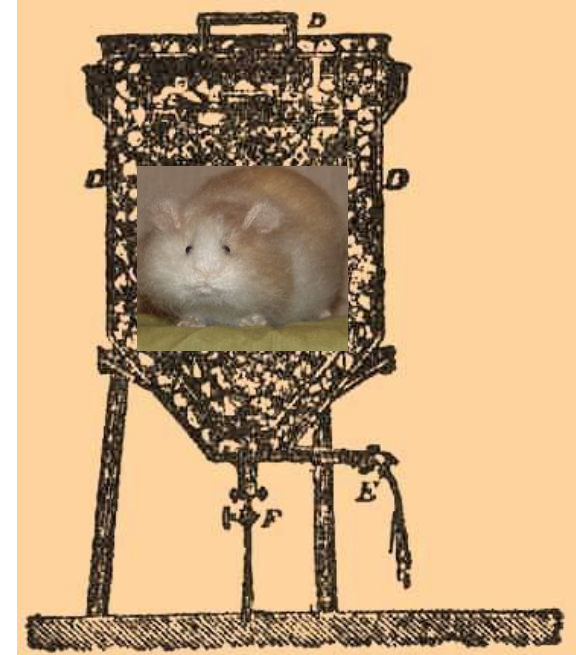
**БИОЛОГИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ:**

ХИМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ → РАБОТА



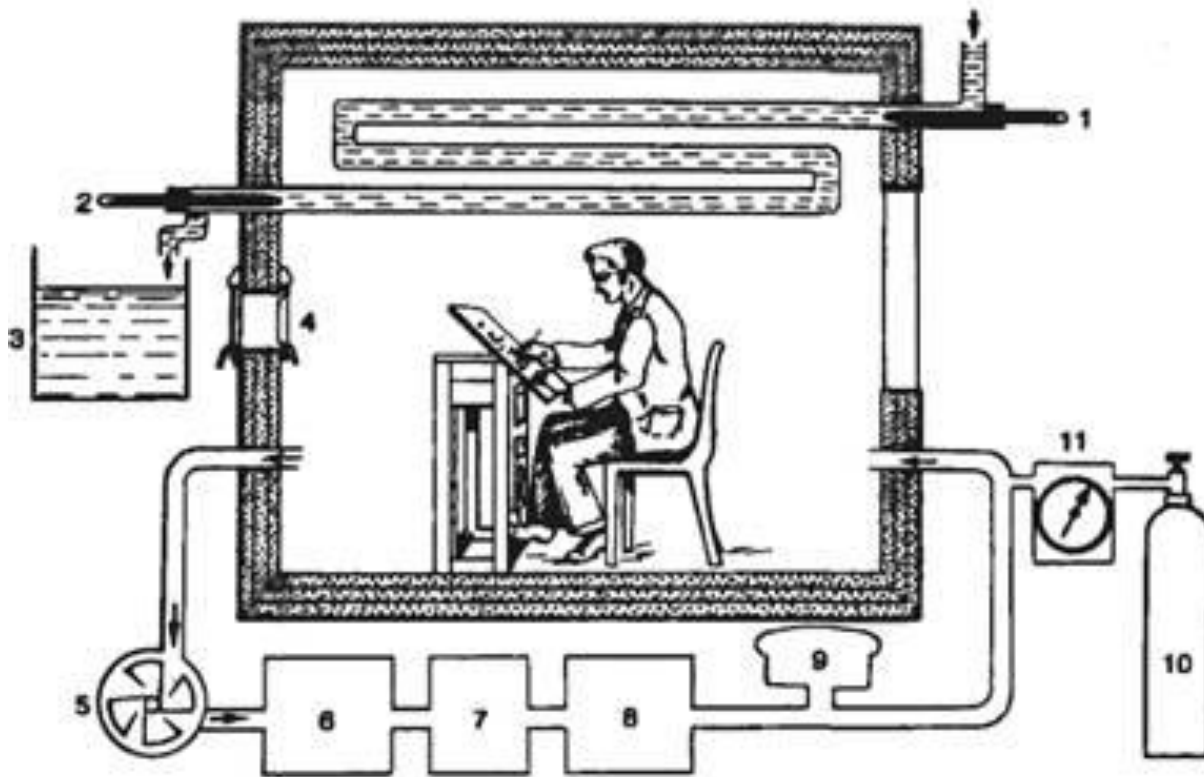
# ПРИМЕНИМОСТЬ 1 ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ К ЖИВЫМ СИСТЕМАМ

□ Опыты ЛАВУАЗЬЕ и ЛАПЛАСА (XVIII век)



Фиг. 8. Ледяной калориметр Лавуазье и Лапласа.

# □ Опыты ЭТУОТЕРА (XX век)

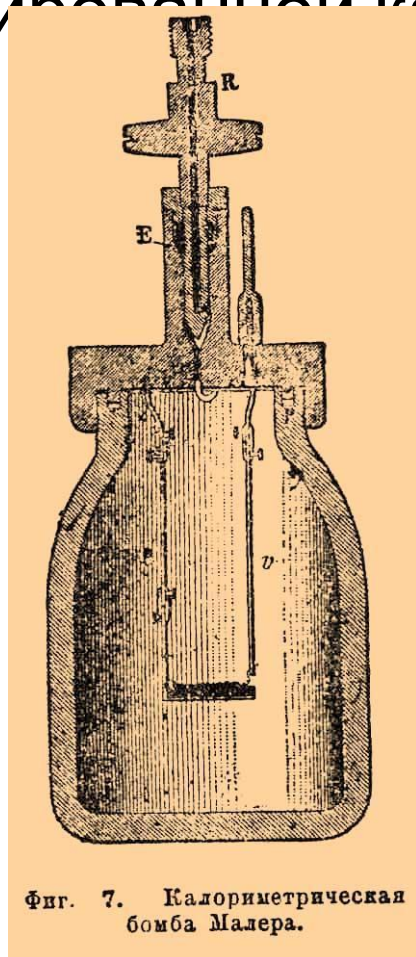


Биокалориметр Этуотера — Бенедикта (схема).

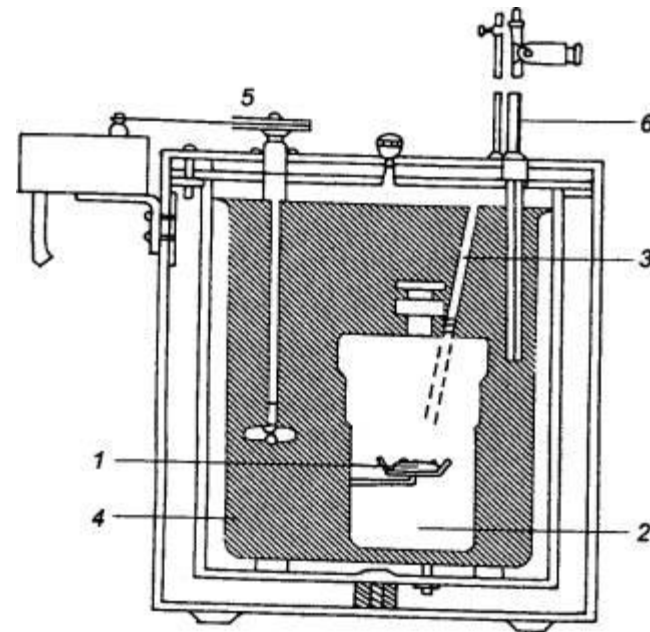


**КАЛОРИМЕТРИЯ**— совокупность методов измерения тепловых эффектов, сопровождающих различные физические, химические и биологические процессы.

**Прямая калориметрия** основана на измерении количества тепла, непосредственно рассеянного организмом в теплоизолированной камере.

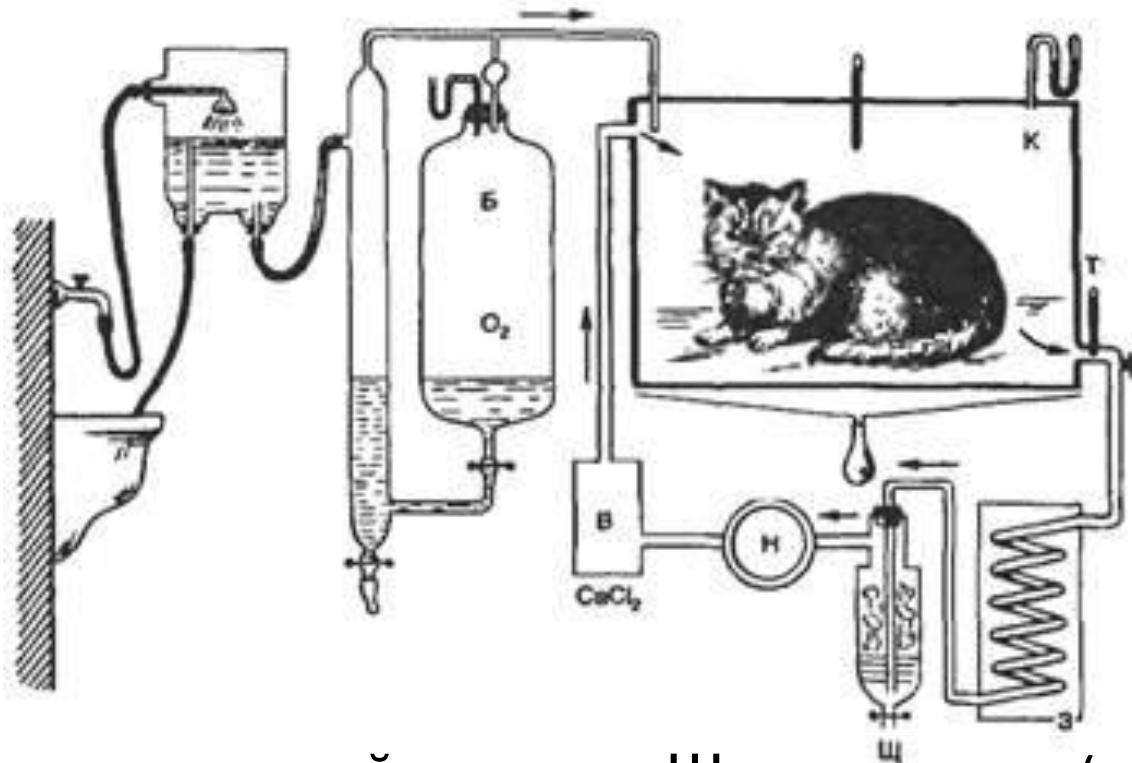


Фиг. 7. Калориметрическая бомба Малера.



Калориметр («бомба») Бертелло 1— проба пищи; 2 — камера, заполненная кислородом; запал; 4 — вода; 5 — мешалка; 6 — термометр.

**НЕПРЯМАЯ КАЛОРИМЕТРИЯ** основана на измерении количества потребленного организмом **кислорода** и последующем расчете энергозатрат с использованием данных о величинах **дыхательного коэффициента (ДК)** и **калорического эквивалента кислорода (КЭО<sub>2</sub>)**.



### Респираторный аппарат Шатерникова (схема).

К — камера; Б — баллон с  $O_2$ ; Н — мотор, выкачивающий воздух из камеры; З — змеевик для охлаждения воздуха; Щ — сосуд, наполненный раствором щелочи для поглощения  $CO_2$ ; В — баллон для поглощения водяных паров хлоридом кальция; Т — термометры. Слева устройство для автоматической подачи  $O_2$  в камеру и поддержания постоянства давления в ней.

## Определение легочной вентиляции с помощью мешка Дугласа



В течение 10—15 мин собирают выдыхаемый воздух в мешок из воздухонепроницаемой ткани (мешок Дугласа), укрепляемый на спине обследуемого. Когда мешок наполнен, измеряют объем выдохнутого воздуха, в котором определяют количество  $O_2$  и  $CO_2$ .

**□ КАЛОРИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ КИСЛОРОДА (КЭО<sub>2</sub>)** - количество тепла, освобождающегося после потребления организмом 1 л O<sub>2</sub>.

**□ ДЫХАТЕЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ (ДК)**- отношение объема выделенного углекислого газа к объему поглощенного кислорода.

Вещества	Энергетическая ценность (ккал/г)	O <sub>2</sub> (л/г)	CO <sub>2</sub> (л/г)	ДК	КЭO <sub>2</sub> (ккал/л)
Углеводы	<i>F</i> 4,0	0,81	0,81	1,0	5,05
Белки	<i>F</i> 4,0	0,94	0,75	0,80	4,46
Жиры	<i>F</i> 9,0	1,96	1,39	0,70	4,69

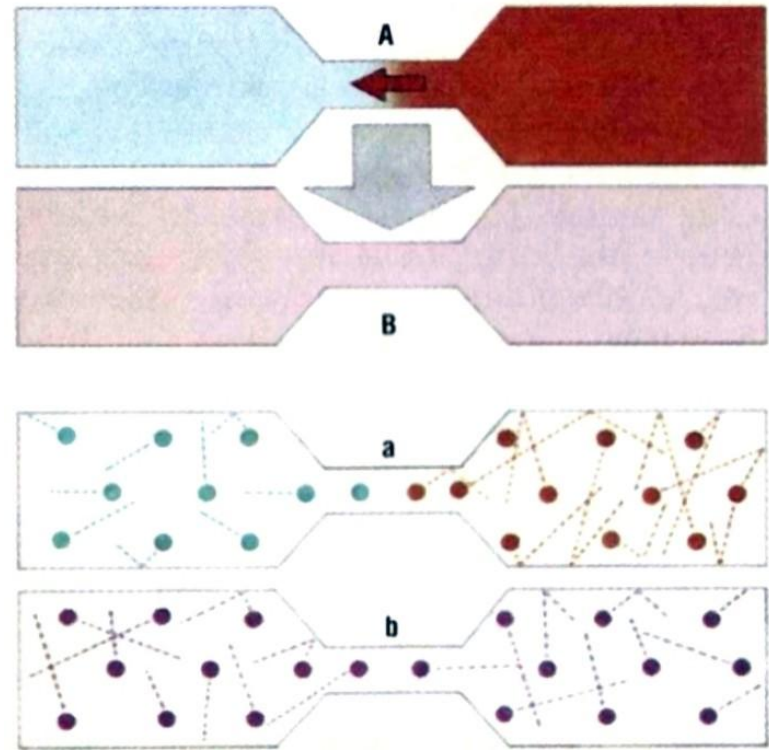
# ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

ОПРЕДЕЛЯЕТ НАПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССА





**Р.КЛАУЗИУС**  
1822-1888



Теплота не может переходить сама собой от более холодного тела к более теплому.

Понятие энтропии было впервые введено в 1865 году **Р. Клаузиусом**.

**Изменение энтропии** термодинамической системы при **обратимом процессе** есть отношение изменения общего количества тепла  $\Delta Q$  к величине абсолютной температуры  $T$ :

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad \text{или} \quad dS = \frac{\delta Q}{T}$$

**ЭНТРОПИЯ – ФУНКЦИЯ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ**

При условии  **$T = \text{const}$**

# ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

$$\frac{\partial Q}{T} = dS \geq 0$$

# СВЯЗЬ ЭНТРОПИИ С УПОРЯДОЧЕННОСТЬЮ СИСТЕМЫ

## ЭНТРОПИЯ $S$

ЛЕД	41 кДж/К
ВОДА (жидкая)	70 кДж/К
ПАР	189 кДж/К

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДОВ ЭНЕРГИЙ ПО КАЧЕСТВУ В СООТВЕТСТВИИ С ВЕЛИЧИНОЙ ЭНТРОПИИ В ХОДЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В РАБОТУ

Качество энергии	ВИД ЭНЕРГИИ	ЭНТРОПИЯ $\Delta S$	Дж/К
ВЫСОКОЕ	ГРАВИТАЦИОННАЯ	0	
	ЯДЕРНАЯ	$10^{-6}$	
	СВЕТОВАЯ	1	
СРЕДНЕЕ	ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ	1-10	
	ХИМИЧЕСКАЯ	1-10	
НИЗКОЕ	ТЕПЛОВАЯ	10-100	

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОТЕНЦИАЛЫ

## 1 закон термодинамики

$$dU = \partial Q - \partial W$$

**-W СИСТЕМА СОВЕРШАЕТ РАБОТУ**

## 2 закон термодинамики

$$\partial Q = TdS$$

**Объединенная запись**

$$TdS = dU + \partial W$$



**Связанная энергия**

**СВЯЗАННАЯ** ЭНЕРГИЯ  $TdS$  РАССЕЙВАЕТСЯ В  
ВИДЕ ТЕПЛА

**СВОБОДНАЯ** ЭНЕРГИЯ ТРАТИТСЯ НА  
СОВЕРШЕНИЕ ПОЛЕЗНОЙ РАБОТЫ



# СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

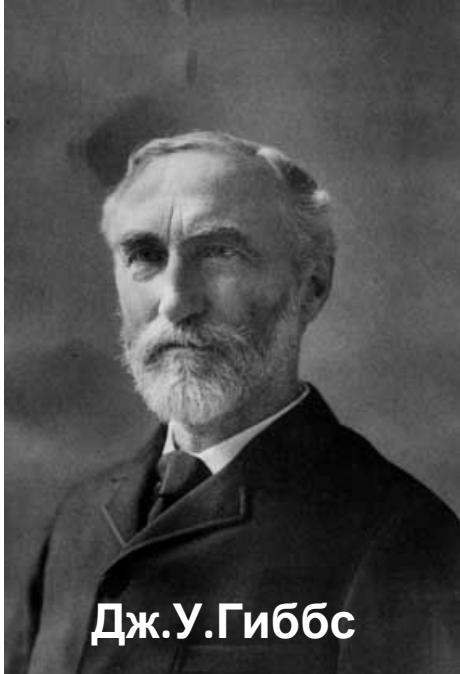


Г.Гельмгольц

1821-1894

При  $V=\text{const}$ ,  $T=\text{const}$

$$dF = dU - TdS$$



Дж.У.Гиббс

1839-1903

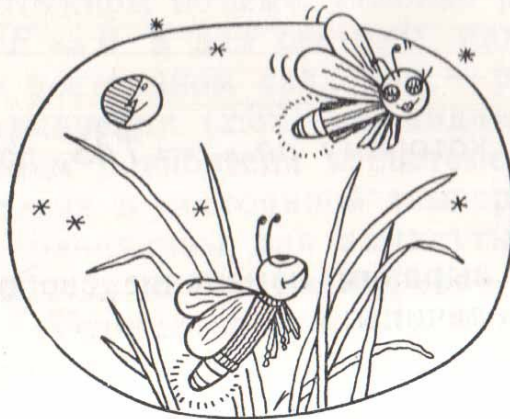
# СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ ГИББСА

При  $p=\text{const}$ ,  $T=\text{const}$

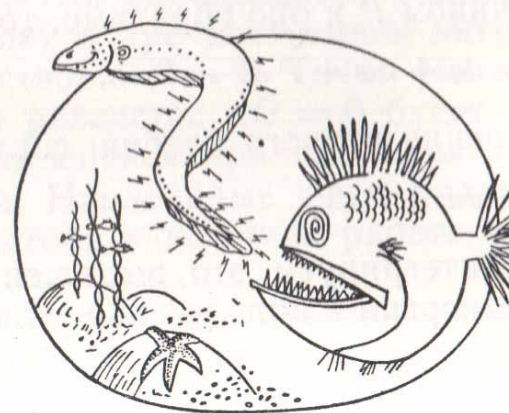
$$dG = dH - TdS$$

**А**

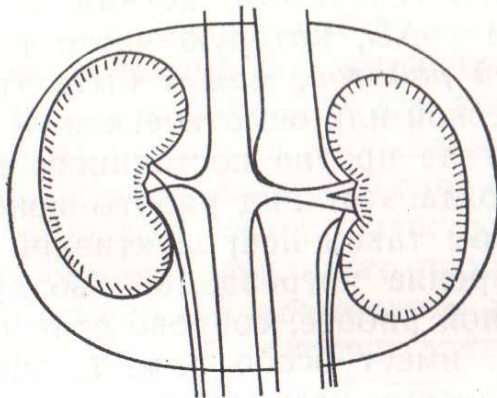
Световая энергия

**Б**

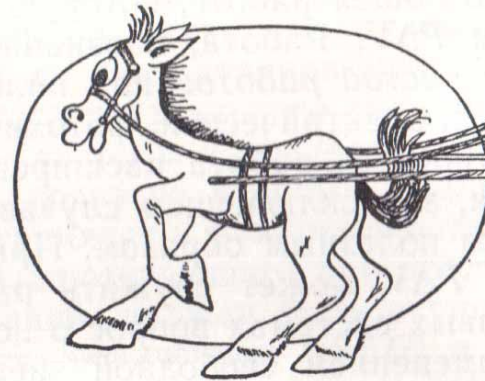
Электрическая энергия

**В**

Осмотическая работа

**Г**

Механическая работа



Результаты полезной работы ( $\Delta G$ ) в живых системах

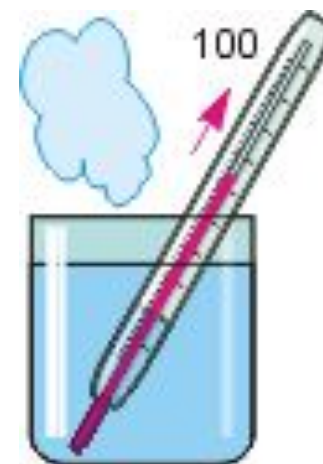
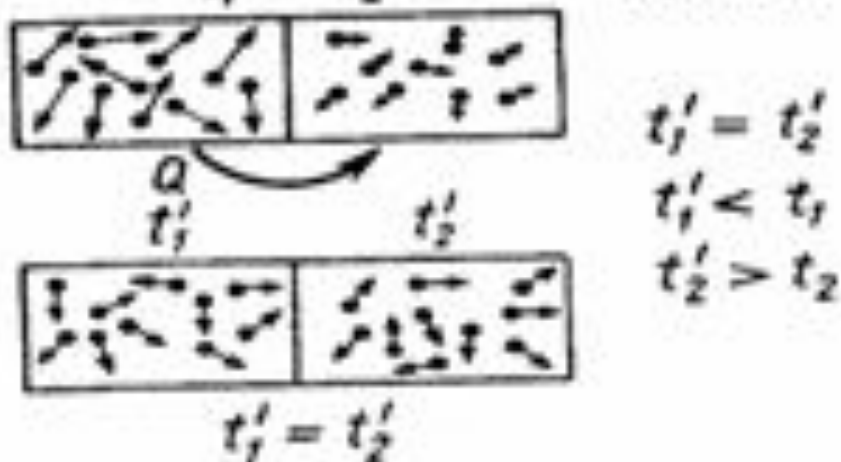
Результаты полезной работы в живых системах

# Термодинамическое равновесие – фундаментальное понятие классической термодинамики, характерно для изолированных и замкнутых систем

Энтропия максимальна, свободная энергия равна 0.

Система НЕ МОЖЕТ совершать работу.

Устойчивое состояние через  $\Delta t$



# ОТКРЫТАЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

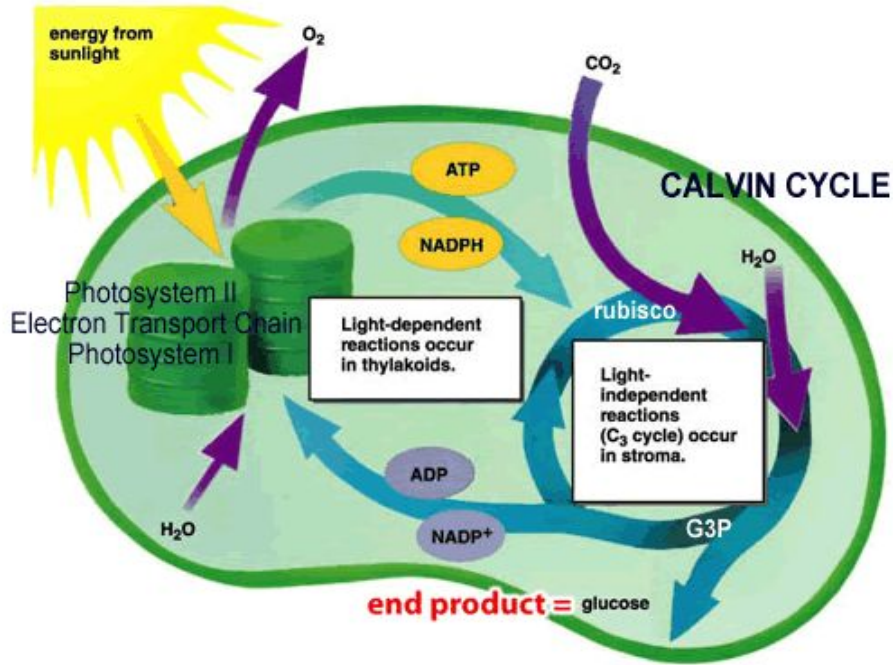


X - набор характеристик : С - состав системы и внешней среды ;  
Р - давление ; Т - температура.

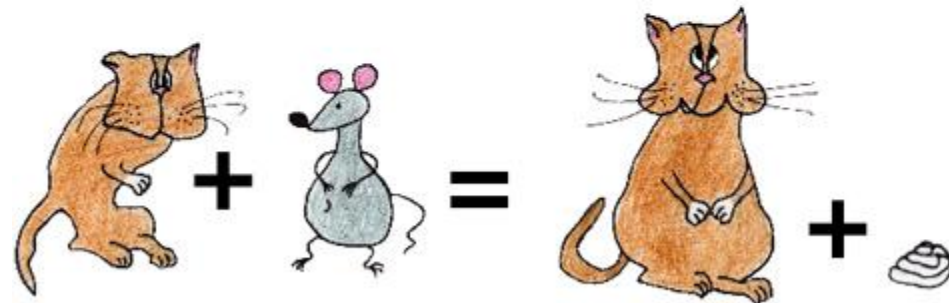
ОБМЕНИВАЕТСЯ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ НЕ ТОЛЬКО ЭНЕРГИЕЙ, НО И ВЕЩЕСТВОМ

ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ ПОНЯТИЕ – **СТАЦИОНАРНОЕ СОСТОЯНИЕ**

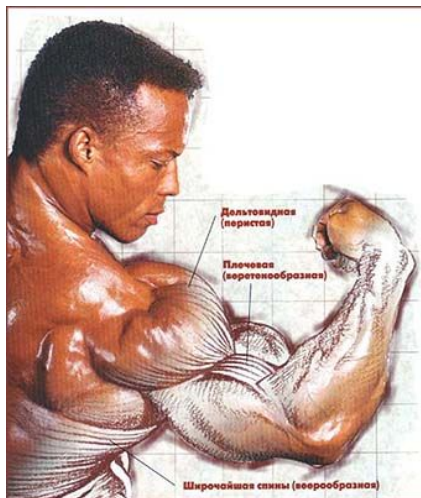
# ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ЖИВЫХ СИСТЕМАХ



## Обмен веществ и энергии



## Взаимодействие живых систем



# СТАЦИОНАРНОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ

**ОБЩЕЕ:** основные макроскопические параметры системы остаются постоянными

## Отличия

**Термодинамическое равновесие**

**Стационарное состояние**

□ Свободная энергия минимальна (равна 0)

□ Энтропия максимальна

□ Градиенты отсутствуют

□ Свободная энергия постоянна, но не минимальна

□ Энтропия постоянна, но не максимальна

□ Градиенты присутствуют



# ИЗМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИИ В ОТКРЫТЫХ СИСТЕМАХ

$$dS = dS_e + dS_i$$



# СКОРОСТЬ ПРОДУКЦИИ ЭНТРОПИИ В ОТКРЫТЫХ СИСТЕМАХ

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt}$$

$$\frac{dS_i}{dt} > 0, \frac{dS_e}{dt} > 0 \text{ или } \frac{dS_e}{dt} < 0$$

для  
НЕОБРАТИМЫХ  
ПРОЦЕССОВ

$dS_e/dt$  может принимать разные значения

$$\frac{dS_i}{dt} > 0, \frac{dS_e}{dt} < 0, \text{ но } \left| \frac{dS_e}{dt} \right| > \frac{dS_i}{dt}$$

ТОГДА

$$\frac{dS}{dt} < 0$$

ПРОТИВОРЕЧИЕ СО  
ВТОРЫМ ЗАКОНОМ  
ТЕРМОДИНАМИКИ

# СТАЦИОНАРНОЕ СОСТОЯНИЕ

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt} = 0$$

$$\frac{dS_i}{dt} = -\frac{dS_e}{dt}$$

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ И ПОТОКИ

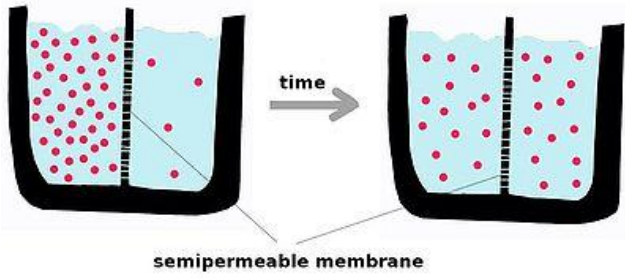
$$J = LX$$

*J* – поток, скорость процесса

*X* – сила, вызывающая процесс

*L* – коэффициент

# СИЛЫ И ПОТОКИ В НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ



Название процесса	Название потока	Обобщенная сила
1. Диффузия	Поток незаряженных частиц	Градиент концентрации ( $dc/dx$ )
2. Электродиффузия	Поток ионов	Градиент электрохимического потенциала ( $d\bar{\mu}/dx$ )
3. Электрический ток	Поток электронов	Градиент электрического потенциала ( $d\varphi/dx$ )
4. Течение жидкости	Объемный потск	Градиент гидростатического давления ( $dP/dx$ )



ВБЛИЗИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ ПОТОКИ И  
СИЛЫ СВЯЗАНЫ **ЛИНЕЙНО**



Адольф ФИК  
1829-1901

$$\frac{dm}{dt} = -DS \frac{dc}{dx}$$



Закон Фика



Жан Батист Жозеф ФУРЬЕ  
(1768-1830)

$$\frac{dQ}{dt} = -kS \frac{dT}{dx}$$

Закон Фурье



## Принцип взаимности Онзагера

$$J_1 = L_{11}X_1 + L_{12}X_2$$

$$J_2 = L_{22}X_2 + L_{21}X_1$$

$$L_{12} = L_{21}$$

Ларс ОНЗАГЕР  
1903 - 1976

Нобелевская премия  
по химии, 1968 г.

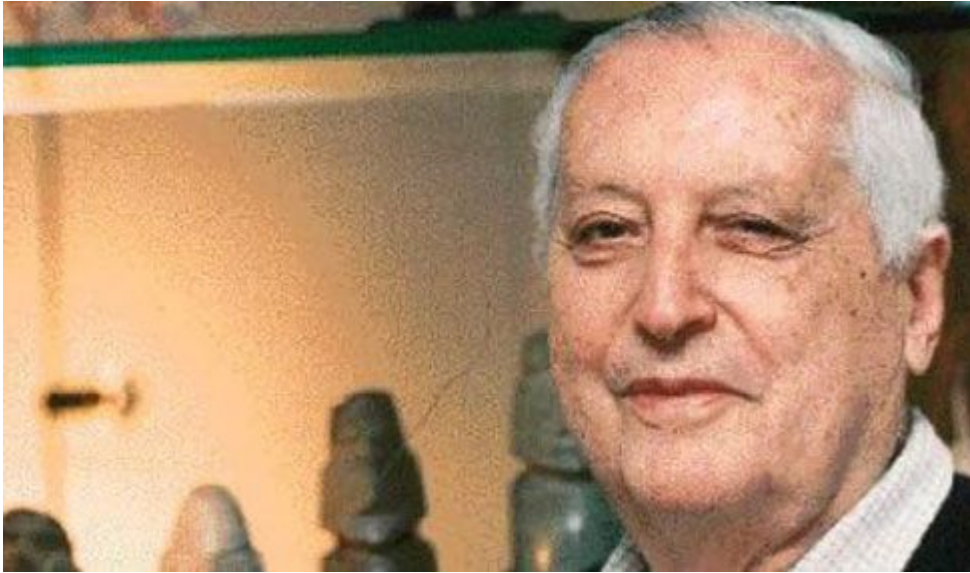
$J_1, J_2$  – потоки

$X_1, X_2$  – силы

$L_{11}, L_{22}$  – коэффициенты "прямых" процессов

$L_{12}, L_{21}$  – "феноменологические" коэффициенты

# ТЕОРЕМА ПРИГОЖИНА о скорости продукции энтропии в открытой системе



И.Р.Пригожин

1917 – 2003

Нобелевская премия по химии,  
1977



# ТЕОРЕМА ПРИГОЖИНА

В **стационарном состоянии** при фиксированных внешних параметрах скорость **продукции энтропии** в открытых системах стремится к **минимальному** значению:

$$T \frac{dS_i}{dt} \rightarrow \min$$

Диссипативная функция

**Открытая система эволюционирует к стационарному состоянию , которое характеризуется **минимальным производством энтропии** , при данных условиях.**