

# **Неклассическое естествознание**

**Термодинамика и  
статистическая физика**

# Закон теплопроводности (1811 г)

- Французский математик и физик барон **Жан-Батист Жозеф Фурье** : поток тепла пропорционален градиенту температуры:

$$Q = -\sigma \cdot \frac{dT}{dx} \cdot S$$

- $Q$  – количество тепла, проходящего через некоторую поверхность  $S$  в единицу времени (количество энергии, передаваемой путем теплопередачи);
- $dT/dx$  – быстрота изменения температуры вдоль оси  $Ox$  (величина градиента температуры),
- $\sigma$  – коэффициент теплопроводности.
- Знак “–” перед правой частью указывает на то, что тепло распространяется в сторону уменьшения температуры (**необратимый процесс установления равновесия**).

# Термодинамический метод

- Макроскопический объект рассматривается как сплошная среда, не имеющая внутренней структуры. **Состояние** макросистемы характеризуется некоторым количеством величин – **параметров**. Эти величины характеризуют всю систему в целом, в разных точках среды могут иметь различные значения и изменяться с течением времени (**неравновесное состояние**).
- **Равновесным** называется такое состояние, при котором в изолированной системе при отсутствии внешних воздействий все параметры системы приобретают постоянные значения.
- В термодинамике вместо классического движения рассматривается **переход из одного равновесного состояния в другое равновесное состояние**.

# Термодинамика

- Промышленная революция первой трети 19 века в Западной Европе потребовала изучения закономерностей превращения теплоты в механическую работу в тепловых двигателях. Пионерские исследования, заложившие основы термодинамики:
- французский инженер и физик **Сади Карно** (1796-1832),
- немецкий физик-теоретик **Рудольф Клаузиус** (1822-1888)
- австрийский физик-теоретик **Людвиг Больцман** (1844-1906).
- Первые положения термодинамики были изложены в сочинении **Сади Карно «О движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824 г).** Первоначальная задача сводилась к исследованию условий, при которых превращение теплоты в работу является наиболее оптимальным.

# Термодинамика

- **Термодинамика** – это учение о связи и взаимопревращениях различных видов энергии, теплоты и работы.

Первое начало устанавливает количественные соотношения, имеющие место при превращениях энергии из одних видов в другие.

**Первое начало термодинамики** (закон сохранения энергии):

$$Q = \Delta U + A$$

- количество тепла, сообщенное системе, идет на приращение внутренней энергии системы и на совершение работы над внешними телами;
- невозможен вечный двигатель первого рода, т.е. такой периодически действующий двигатель, который совершал бы работу в большем количестве, чем получал извне энергию.

# Термодинамика

Второе начало определяет условия, при которых возможны эти превращения, то есть определяет возможные направления процессов.

## **Второе начало термодинамики:**

- невозможны такие процессы, единственным конечным результатом которых был бы переход тепла от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому;
- невозможен вечный двигатель второго рода, т.е. такой периодически действующий двигатель, который получал бы тепло от одного резервуара и превращал это тепло полностью в работу.

# Молекулярно-кинетическая теория

**Идеальный газ** – это газ, для которого:

- размерами молекул можно пренебречь;
- силами межмолекулярного взаимодействия можно пренебречь (на расстоянии молекулы друг с другом не взаимодействуют);
- друг с другом и со стенками сосуда молекулы взаимодействуют по законам абсолютно упругого удара.

Состояние идеального газа описывается уравнением Менделеева-Клайперона

$$P \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T$$

# Молекулярно-кинетическая теория

## Основные положения МКТ

- – полная хаотичность движения молекул. При столкновениях выполняется закон сохранения энергии движения. Между столкновениями молекулы движутся свободно, т.е. по прямым линиям с постоянной скоростью;
- – **средние кинетические энергии** молекул разных газов, находящихся при одинаковой температуре равны между собой.
- – **средняя скорость молекул** пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры;



# Статистическая физика

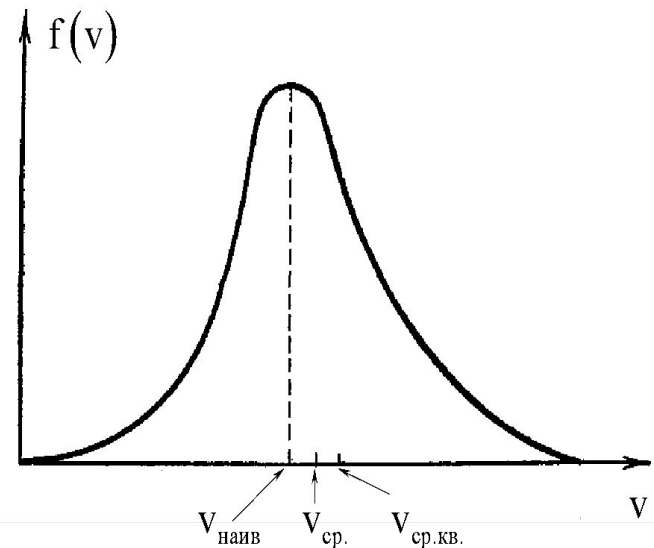
- Распределение свободных хаотически движущихся в замкнутом объеме молекул по скоростям

$$f(v) = \left( \frac{m_0}{2\pi \cdot k \cdot T} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{m_0 \cdot v^2}{2 \cdot k \cdot T}} \cdot 4\pi \cdot v^2$$

- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана
- $m_0$  - масса молекулы

- Распределение Максвелла

Распределение молекул по скоростям



# Статистическая физика

- $f(v)$  - вероятность того, что величина скорости каждой отдельной частицы находится в единичном интервале скоростей около скорости .
- $\int_0^{\infty} f(v) \cdot dv = 1$       вероятность того, что скорость любой частицы ансамбля принимает какое-либо значение в интервале от нуля до бесконечности, равна единице.
- Зная  $f(v)$ , можно вычислить число частиц , модули скоростей которых лежат в интервале значений от  $v_1$  до  $v_2$ .

$$\Delta N = \int_{v_1}^{v_2} N \cdot f(v) \cdot dv$$

# Статистическая физика

- Каждая отдельная молекула ансамбля может иметь любое значение скорости, однако при этом конкретному состоянию ансамбля частиц соответствуют вполне определенные значения скоростей и энергии:

- Средняя скорость

$$v_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} v \cdot f(v) \cdot dv = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot \mu}}$$

- Среднеквадратичная скорость

$$v_{\text{cp.кв.}} = \left( \int_0^{\infty} v^2 \cdot f(v) \cdot dv \right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m}} = \sqrt{\frac{3 \cdot R \cdot T}{\mu}}$$

- Средняя кинетическая энергия

$$\frac{(mV)_{\text{cp}}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

# Статистическая физика

- **Макроскопическое состояние сложной системы описывается статистически.**
- В изолированной системе частиц, находящейся в состоянии теплового равновесия, динамическое состояние каждой отдельной молекулы непрерывно изменяется, а макросостояние системы в целом остается стационарным, т.е. характеризуется постоянными значениями температуры и давления.
- **Классическая статистическая механика** (Больцман) позволяет предсказывать свойства систем на основе анализа статистического поведения частиц, из которых они состоят.

# Статистическая физика

- Важнейшим понятием статистической физики является **вероятность**.
- *Под вероятностью понимается предел, к которому стремиться относительная частота появления некоторого события при достаточно большом числе повторений опыта при неизменных внешних условиях.*

# Статистическая физика

Новые идеи Максвелла и Больцмана составили основу последующего развития естествознания (неклассического)

- – **введение вероятности в физике, как объясняющего принципа**, а не как аппроксимации;
- – **использование вероятностей и статистического подхода к исследованию микросостояний сложных систем для предсказания макроскопических свойств.**

# Статистическая физика

## Понятие энтропии.

- Всякое макросостояние может быть реализовано различными способами, каждому из которых соответствует некоторое микросостояние.
- Число различных микросостояний, соответствующих данному макросостоянию, называется **статистическим весом**, или **термодинамической вероятностью**.

# Статистическая физика

- Пример: как 4 молекулы могут распределяться между двумя половинками сосуда; способов  $2^4=16$

Слева	Справа	Число способов
0	4(1,2,3,4)	1
1(1;2;3;4)	3(2,3,4;1,3,4; 1,2,4;1,2,3)	4
2(1,2;1,3;1,4; 2,3;2,4;3,4)	2(3,4;2,4;2,3; 1,4;1,3;1,2)	6
3	1	4
4	0	1



# Статистическая физика

- В общем случае число микросостояний, отвечающих макросостоянию

$$\Omega(n, N - n) = \frac{N!}{n!(N - n)!}$$

- Вероятность макросостояния равна отношению его статистического веса к полному числу состояний.
- Отметим, что  $\Omega$  не обладает свойство аддитивности. Если система, к примеру, состоит из двух подсистем, то  $\Omega = \Omega_1 \Omega_2$ . Поэтому в качестве характеристики вероятности состояния принимается величина

$$S = k \ln \Omega,$$

которая называется **энтропией**.

# Статистическая физика

- Закон возрастания энтропии (второе начало термодинамики):

**Энтропия изолированной системы**

**возрастает**, т.к. система переходит из менее вероятных в более вероятные состояния;

- Энтропия системы, находящейся в равновесном состоянии, максимальна.

# Демон Максвелла

- "Понедельник начинается в субботу" А. и Б. Стругацких: Демон Максвелла -- важный элемент мысленного эксперимента крупного английского физика Максвелла. Предназначался для нападения на второй принцип термодинамики. В мысленном эксперименте Максвелла демон располагался рядом с отверстием в переборке, разделяющей сосуд, наполненный движущимися молекулами. Работа демона состоит в том, чтобы выпускать из одной половины сосуда в другую быстрые молекулы и закрывать отверстия перед носом медленных. Идеальный демон способен таким образом без затраты труда создать очень высокую температуру в одной половине сосуда и очень низкую -- в другой, осуществляя вечный двигатель второго рода.

# Демон Максвелла



# Статистическая физика

- Состояние, осуществляемое относительно малым числом способов, называется **упорядоченным**.
- **Энтропия** является мерой молекулярного беспорядка в системе. Тепловое движение приводит к увеличению степени беспорядка в системе (увеличению энтропии).
- Сообщение системе тепла приводит к усилению теплового движения и увеличению энтропии.

$$dS \geq \frac{dQ}{T}$$

# Статистическая физика

- При абсолютном нуле температуры всякое тело находится в основном состоянии, статистический вес которого равен единице т. е.

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$$

- **Теорема Нернста** (третье начало термодинамики)

энтропия всякого тела стремится к нулю при стремлении к нулю его температуры.