

# Основы молекулярной физики и термодинамики



Газовые законы

Модель идеального газа

Уравнение Клапейрона-  
Менделеева

# Введение

---

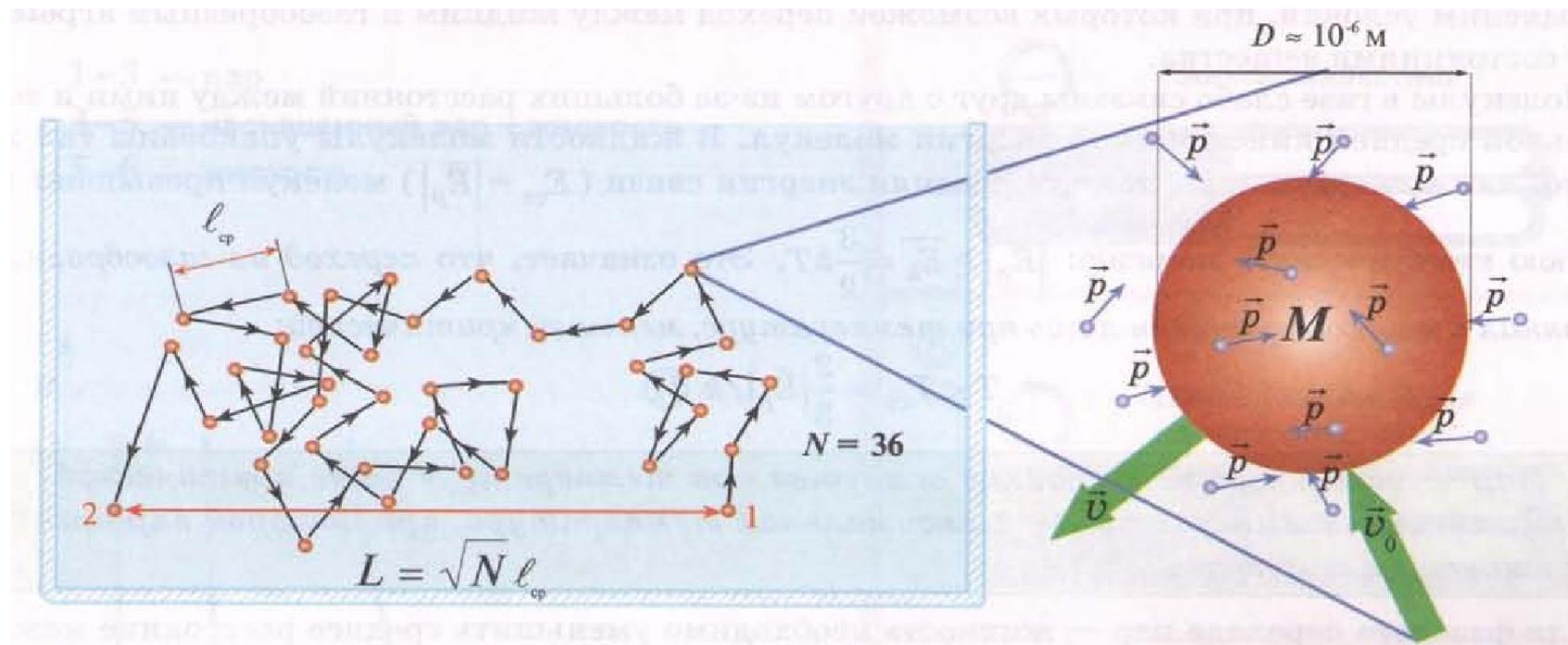
**Молекулярная физика и термодинамика** – разделы физики, в которых изучаются макроскопические процессы в телах, связанные с огромным числом содержащихся в телах атомов и молекул.

**Молекула** – наименьшая частица данного вещества, сохраняющая его свойства

**Атом** – наименьшая частица данного химического элемента, сохраняющая его свойства

# Броуновское движение

явление хаотического беспорядочного движения макрочастицы, взвешенной в жидкости или газе (Р.Броун - 1827 г.)



Положение произвольной частицы цветочной пыли отмечены через равные промежутки времени

# Молекулярная физика и термодинамика

методы исследования

статистический

термодинамический

**Молекулярная физика** изучает строение вещества, исходя из молекулярно-кинетических представлений (все тела состоят из молекул, находящихся в движении)

**Термодинамика** изучает общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии ТД равновесия, и процессы перехода между этими состояниями

Термодинамика базируется на фундаментальных законах, установленных в результате обобщения опытных данных. Область применения ТД значительно шире, чем МКТ. ТД – метод и МКТ взаимно дополняют друг друга.

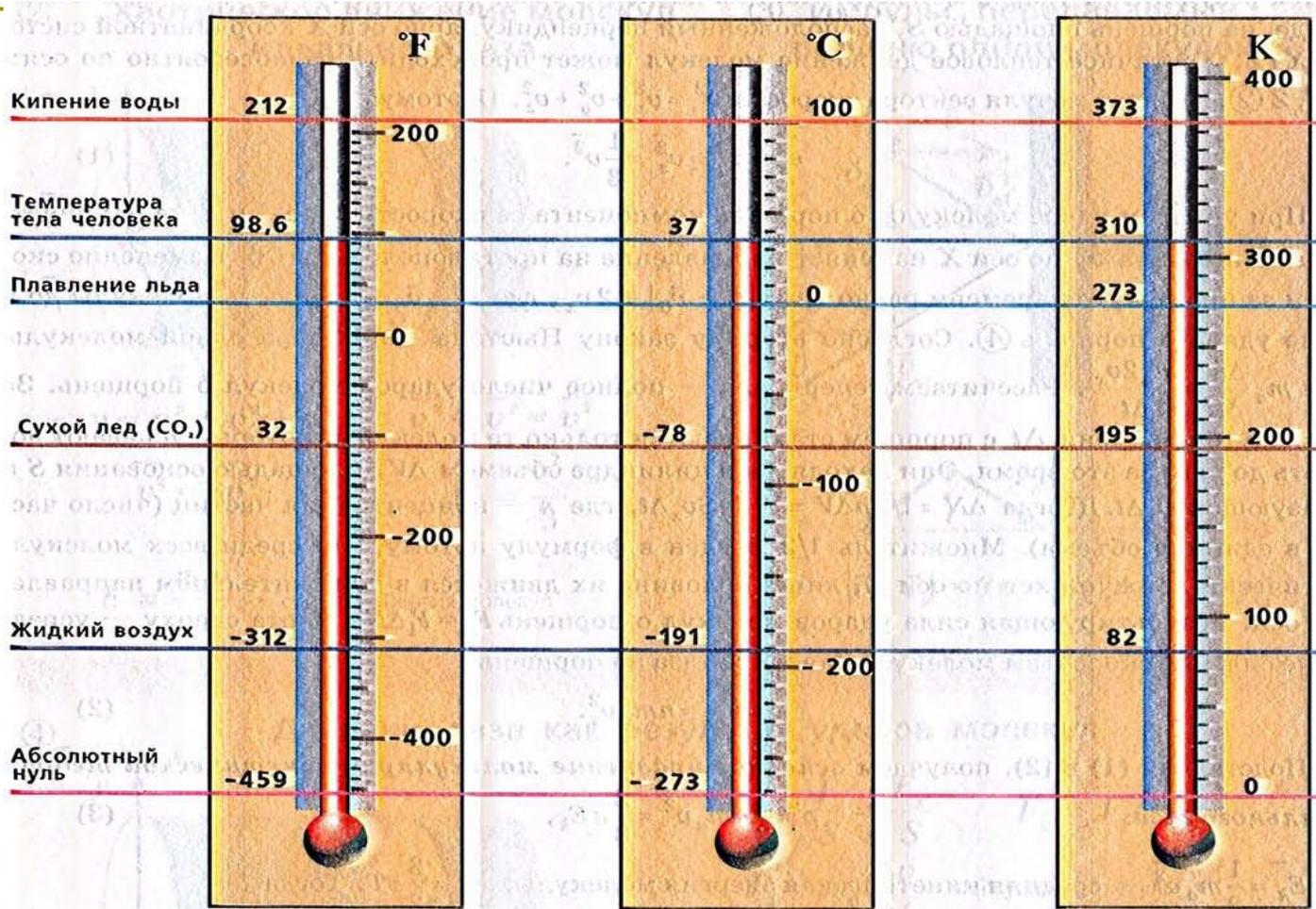
# Термодинамическая система

**ТД - система** – совокупность макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами (внешней средой)

Термодинамические параметры – величины, характеризующие состояние термодинамической системы в любой момент времени: **температура, давление, объем**



# Температура



ШКАЛА ФАРЕНГЕЙТА

$$T_F = 32 + 1,8t$$

ШКАЛА ЦЕЛЬСИЯ

$$t = \frac{5}{9}(T_F - 32) = T - 273$$

ШКАЛА КЕЛЬВИНА

$$T = t + 273$$

# Единицы измерения количества вещества

---

1 моль – количество вещества, в котором находится столько же частиц, сколько содержится атомов в 0,012 кг изотопа углерода  $C^{12}$ .

1 моль любого вещества содержит одинаковое количество частиц, называемое постоянной Авогадро:

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Молярная масса – масса одного моля вещества

$$\left. \begin{array}{l} \nu = \frac{m}{M} \\ \nu = \frac{N}{N_A} \end{array} \right\} \text{число молей}$$

масса одной частицы

$$m_0 = \frac{m}{N} \qquad m_0 = \frac{M}{N_A}$$

# Модель идеального газа

---

- Собственный объем молекул пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда
- Между молекулами отсутствуют силы взаимодействия
- Столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие

# Изопроцессы

---

Изопроцессы – термодинамические процессы, происходящие при одном постоянном термодинамическом параметре и неизменной массе газа

Изотермический процесс  $T = \text{const}$

Изобарный процесс  $p = \text{const}$

Изохорный процесс  $V = \text{const}$

# Закон Бойля-Мариотта



**Р.Бойль**  
**1627-1691**

Для данной массы идеального газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная

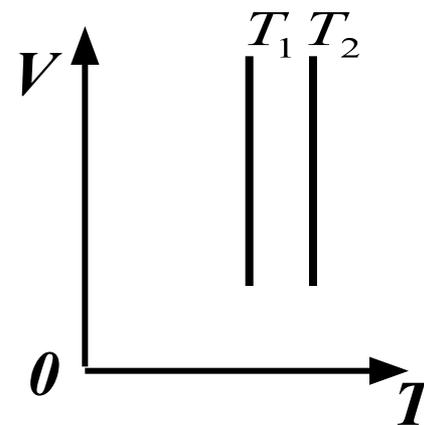
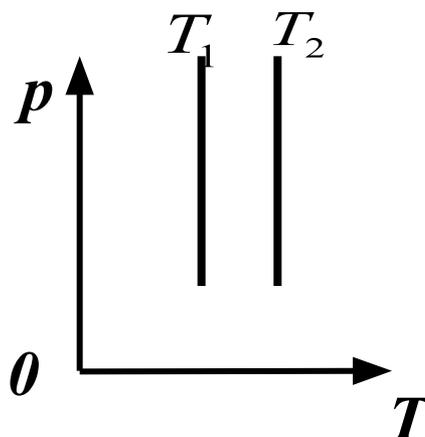
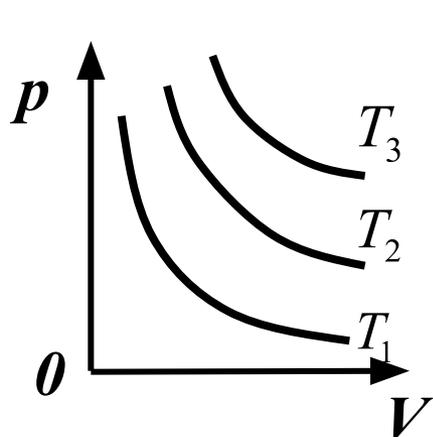
$$p \cdot V = \text{const}$$

при  $T, m = \text{const}$



**Э.Мариотт**  
**1620-1684**

Графическое представление



# Закон Гей-Люссака

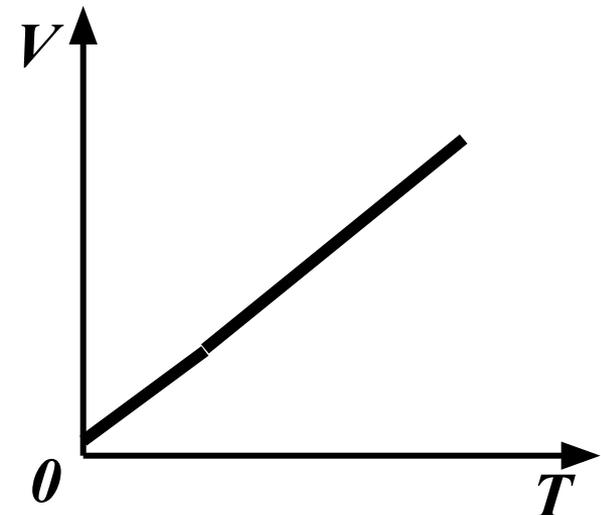
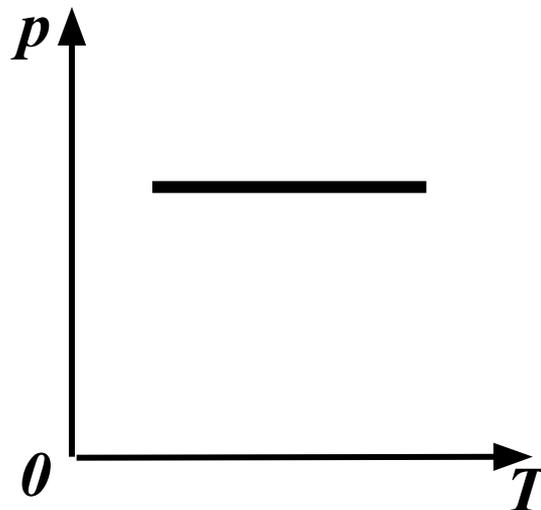
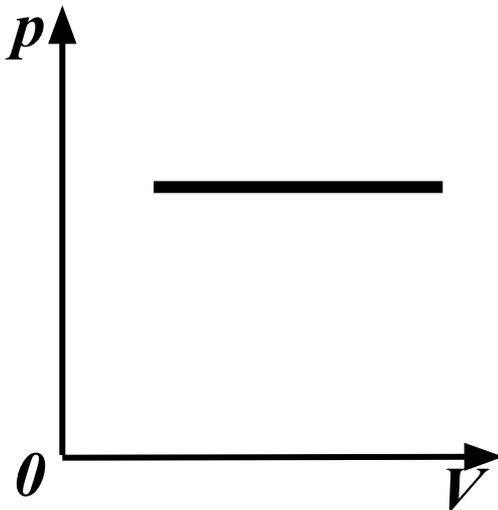
Объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$



**Ж.Гей-Люссак**  
**1778-1850**

Графическое представление



# Закон Шарля

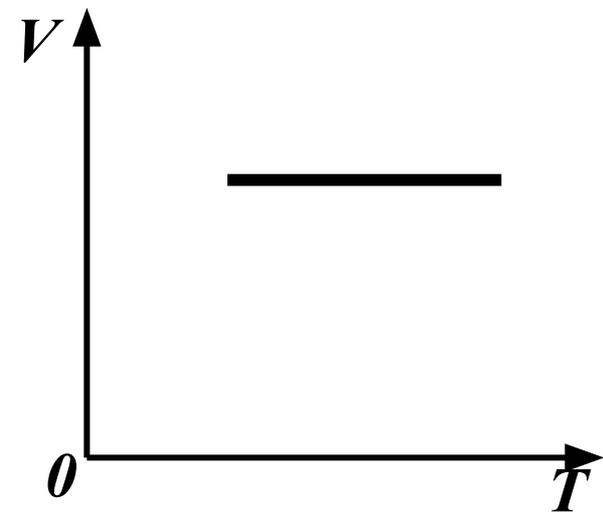
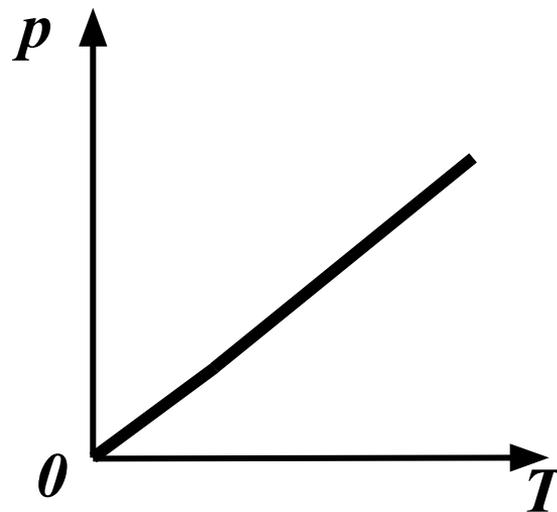
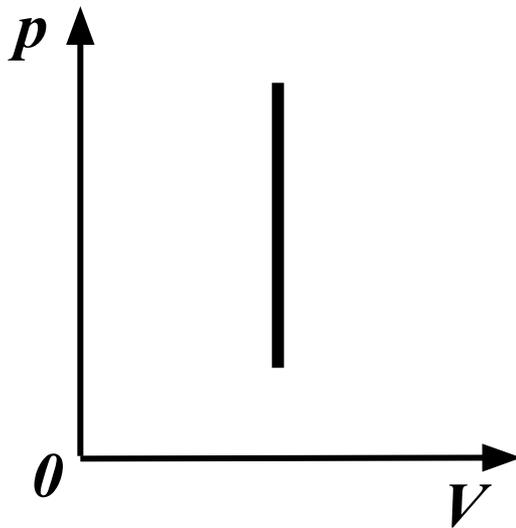


**Ж.Шарль**  
**1746-1823**

Давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с температурой

$$\frac{p}{T} = const$$

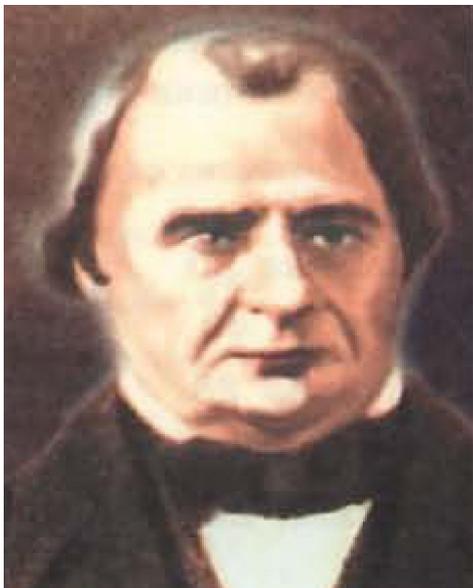
Графическое представление



# Уравнение Клапейрона- Менделеева

Уравнение состояния – уравнение, связывающее термодинамические параметры, однозначно описывающие состояние термодинамической системы в любой момент времени.

$$\frac{pV}{T} = const \quad \text{-уравнение Клапейрона}$$



**Б.Клапейрон**  
**1799-1864**

$$\frac{pV}{T} = \nu R$$

уравнение Клапейрона-  
Менделеева

$$R = 8.31$$

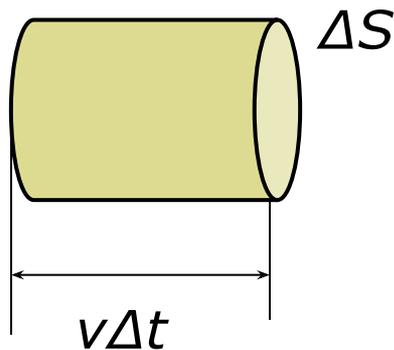
Дж/К · моль

**Д.И.Менделеев**  
**1834-1907**



# Вывод основного уравнения МКТ

## идеальных газов



При каждом соударении молекула массой  $m_0$  передает стенке сосуда импульс

$$m_0 v - (-m_0 v) = 2m_0 v$$

За время  $\Delta t$  стенки достигнет число молекул

$$n \Delta S v \Delta t$$

С учетом хаотического движения молекул, импульс, переданный площадке

$$\Delta P = \frac{1}{3} n m_0 v^2 \Delta S \Delta t$$

Давление газа на стенку сосуда

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v^2$$

# Основное уравнение МКТ идеальных газов

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_i^2}{N}}$$

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

- средняя квадратичная скорость

$$pV = \frac{1}{3} N m_0 \langle v_{кв} \rangle^2 \quad \text{или}$$

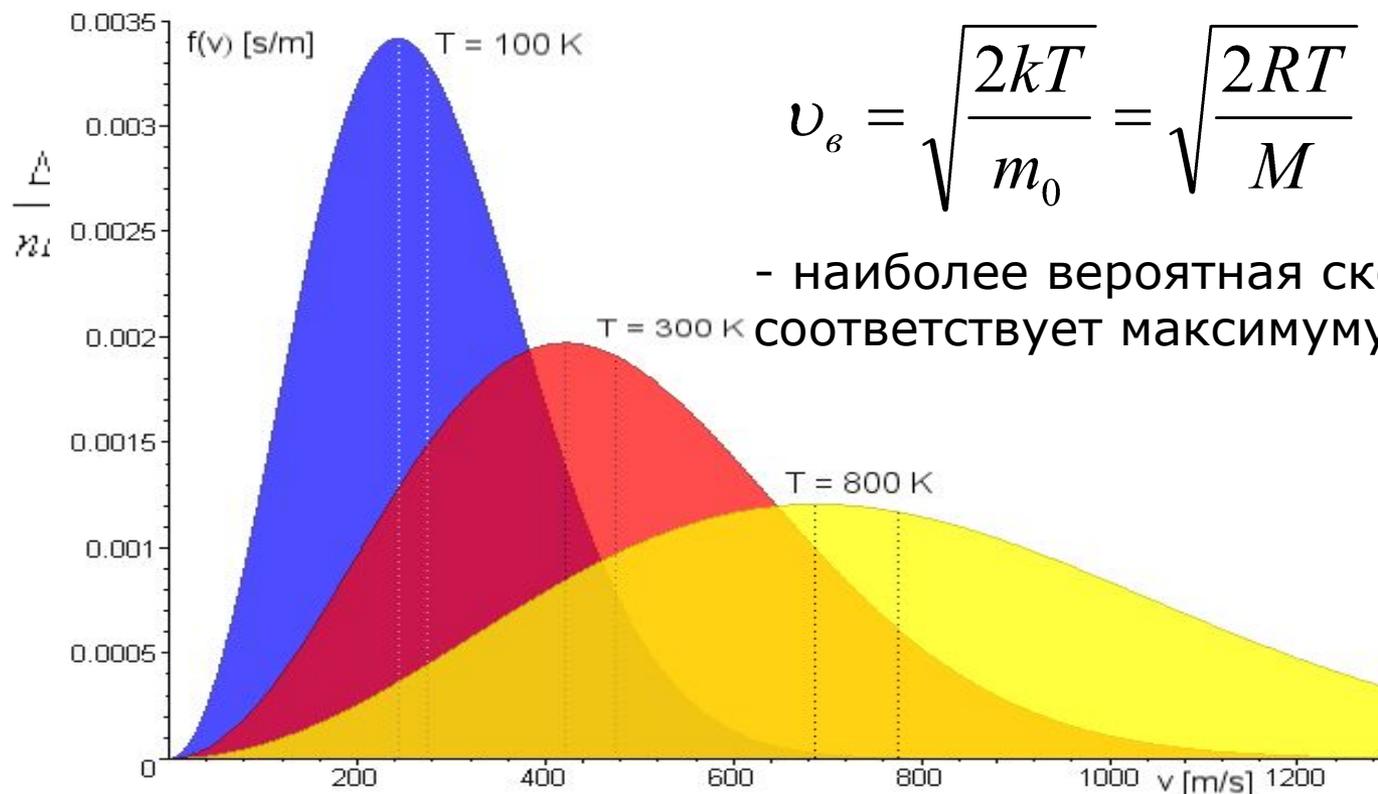
$$pV = \frac{2}{3} N \left( \frac{m_0 \langle v_{кв} \rangle^2}{2} \right) = \frac{2}{3} E$$

- основное уравнение МКТ

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{E}{N} = \frac{m_0 \langle v_{кв} \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

- средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы идеального газа

# Распределение Максвелла молекул по скоростям



$$v_g = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$

- наиболее вероятная скорость соответствует максимуму кривой

Площадь, ограниченная кривой, остается неизменной, так общее число молекул не зависит от температуры

# Среднее число столкновений и средняя длина свободного пробега

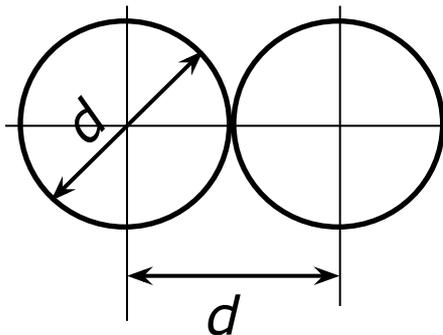
$$\langle l \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle Z \rangle}$$

## МОЛЕКУЛА

- **средняя длина свободного пробега молекул** – расстояние, которое проходят молекулы между 2-мя последовательными столкновениями

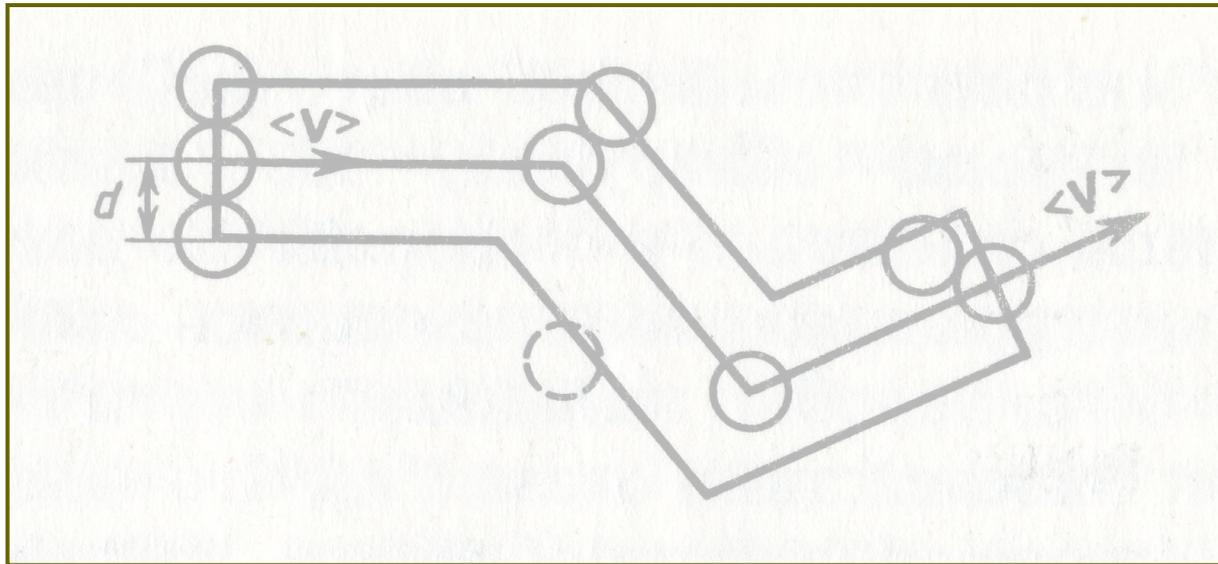
$\langle v \rangle$  – *средняя скорость*

$\langle Z \rangle$  – *среднее число столкновений молекул за 1с*



**Эффективный диаметр молекулы  $d$**  – минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры 2-х молекул

# Среднее число столкновений молекул

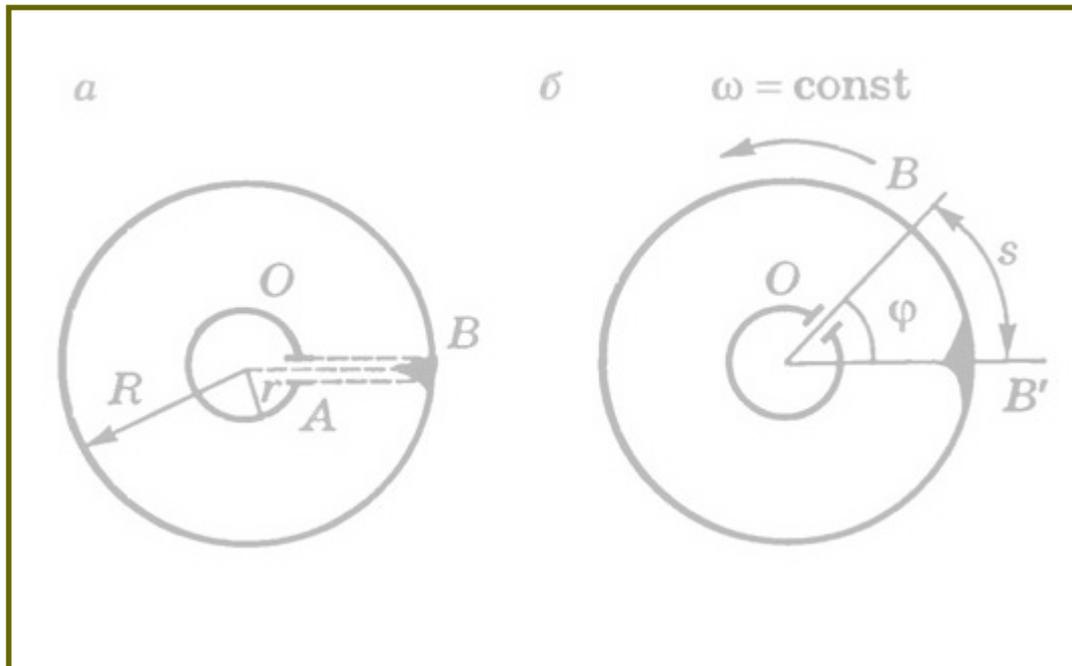


$$\langle Z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle$$

$$\langle l \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle Z \rangle} = \frac{\langle v \rangle}{\sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}$$

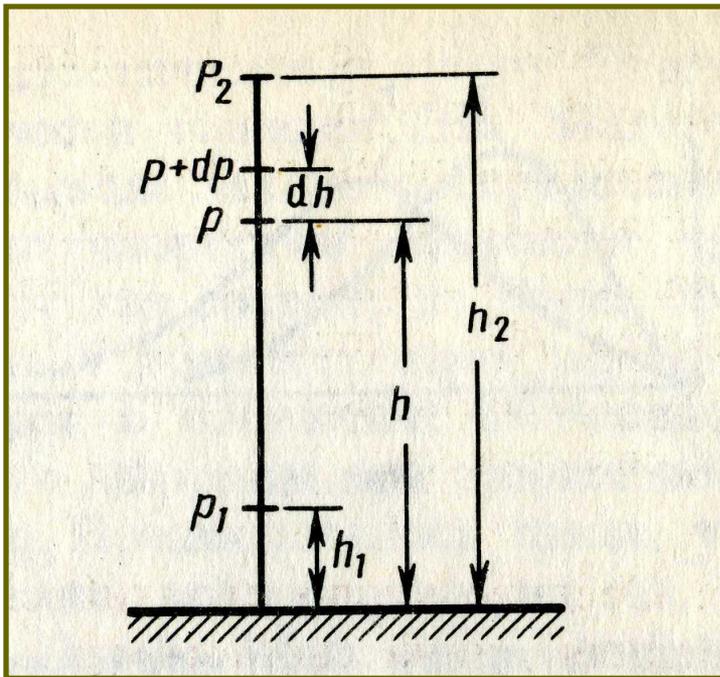
# Опытное обоснование МКТ

Опыт О.Штерна 1920 г.



# Барометрическая формула

Молекулы любого газа находятся в потенциальном поле тяготения Земли



- поле тяготения – однородное
- температура – постоянная
- масса всех молекул одинаковая

$$p_2 = p_1 e^{-\frac{Mg(h_2 - h_1)}{RT}}$$