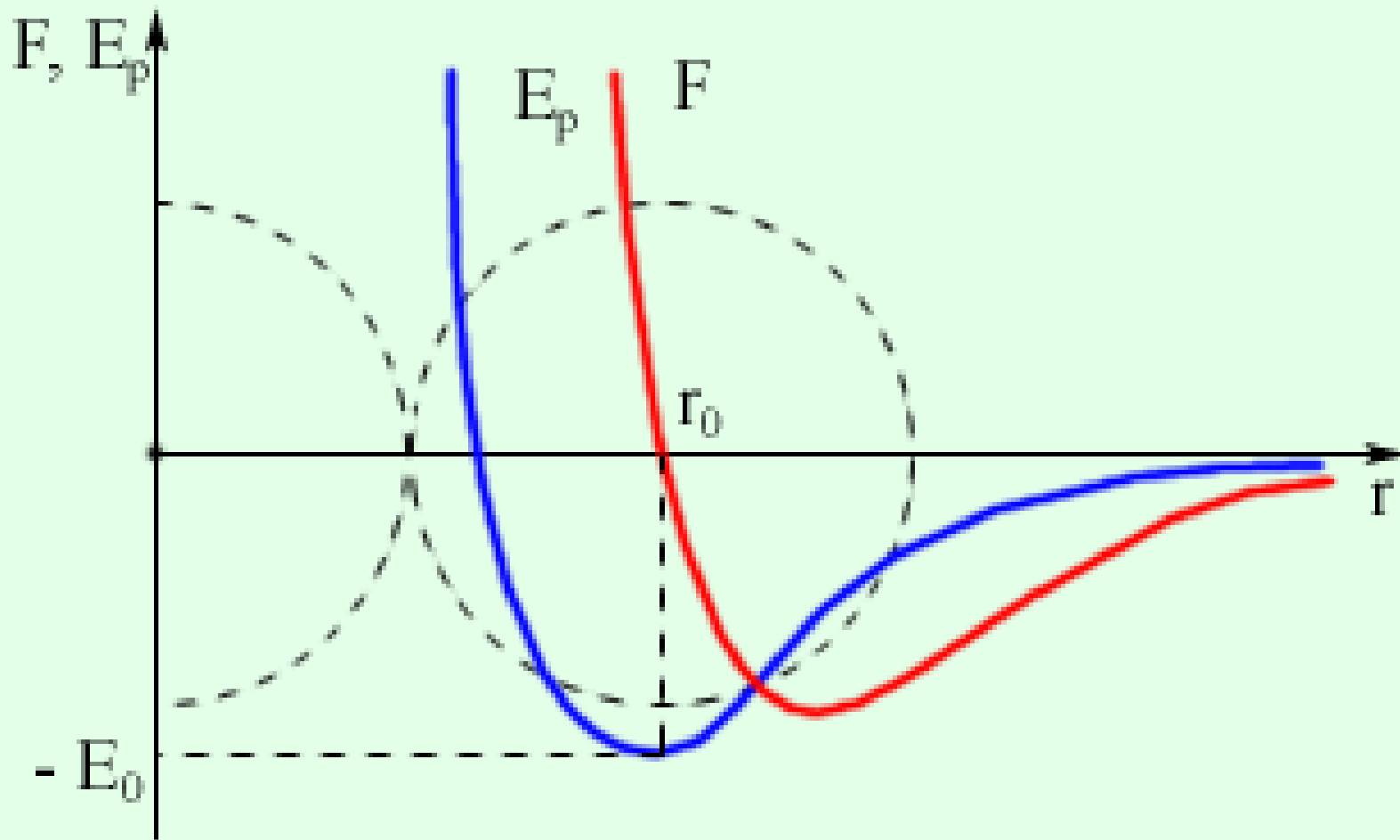


Тема 3. Основное уравнение МКТ

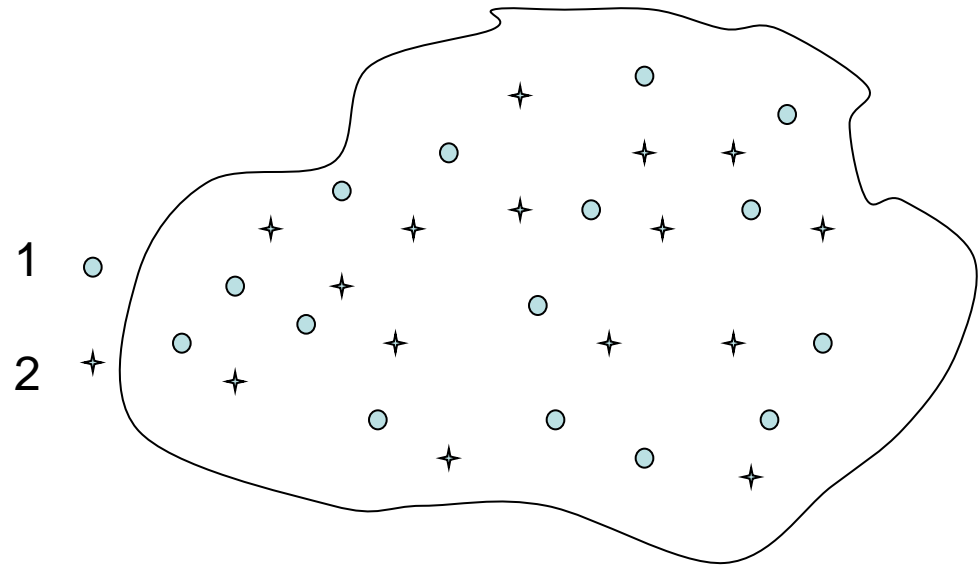
- 3.1. Модель классического идеального газа

Сила взаимодействия F и потенциальная энергия взаимодействия E_p двух молекул

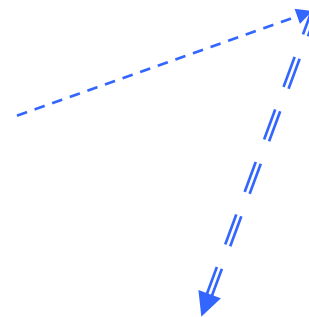
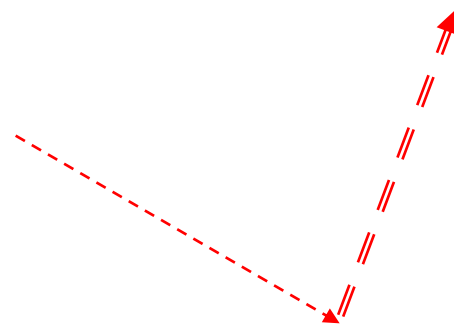
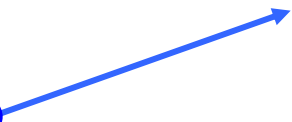
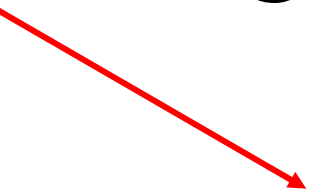


Тема 3. Основное уравнение МКТ

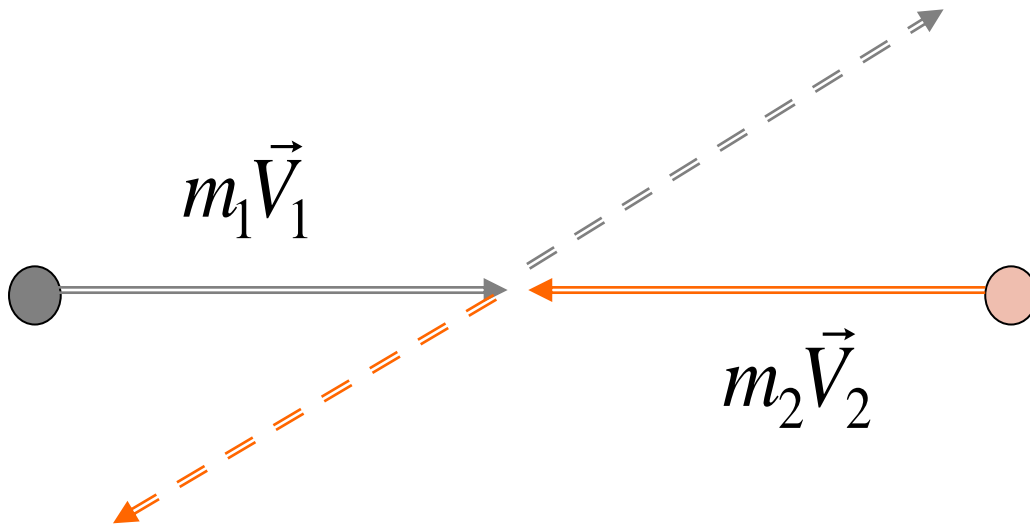
- 3.2. Молекулярно-кинетический смысл температуры



Столкновение двух частиц



Столкновение молекул в системе ЦМ



$$\vec{v}_{отн} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2$$

$$\vec{v}_{отн} = \vec{v}_{отн.цм}$$

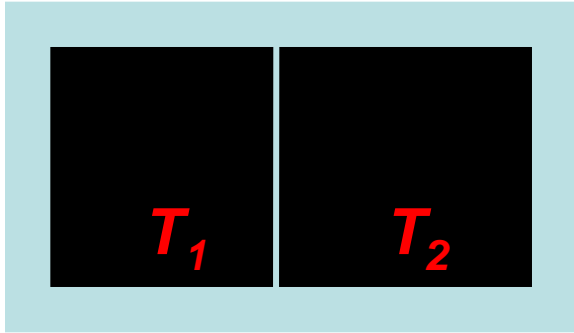
$$\langle \vec{v}_{отн.цм} \rangle = 0$$

$$\vec{W}_{\text{цм}} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}$$

$$\langle \vec{v}_{\text{отн}} \cdot \vec{W}_{\text{цм}} \rangle = 0$$

$$\left\langle \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2} \cdot \vec{v}_1 - \vec{v}_2 \right\rangle = 0$$

Тепловой (энергетический) контакт систем



Условие равновесия:

$$\left\langle \frac{m_1 v_1^2}{2} \right\rangle = \left\langle \frac{m_2 v_2^2}{2} \right\rangle$$

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT$$

k – постоянная Больцмана

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$$

Для двухатомной молекулы

$$\left\langle \frac{M \vec{v}_{цм}^2}{2} \right\rangle = \frac{M}{2} \left\langle \left(\frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2} \right)^2 \right\rangle =$$

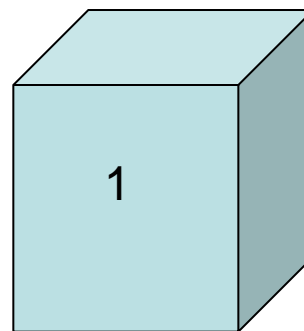
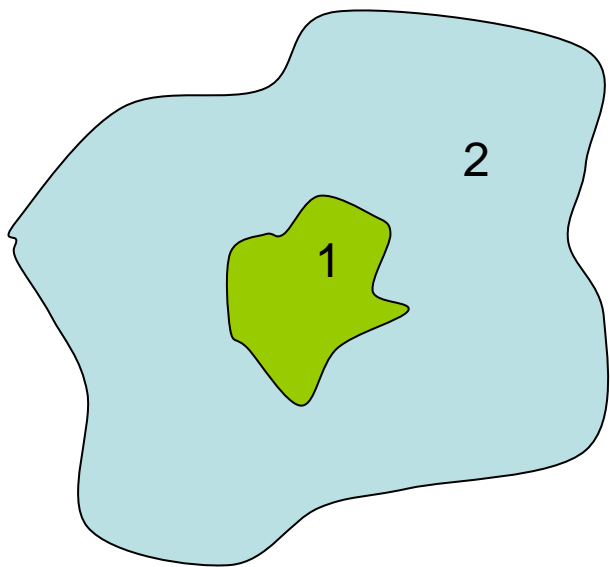
$$\frac{1}{M} \left[m_1 \frac{3}{2} kT + m_2 \frac{3}{2} kT \right] =$$

$$\frac{3}{2} kT$$

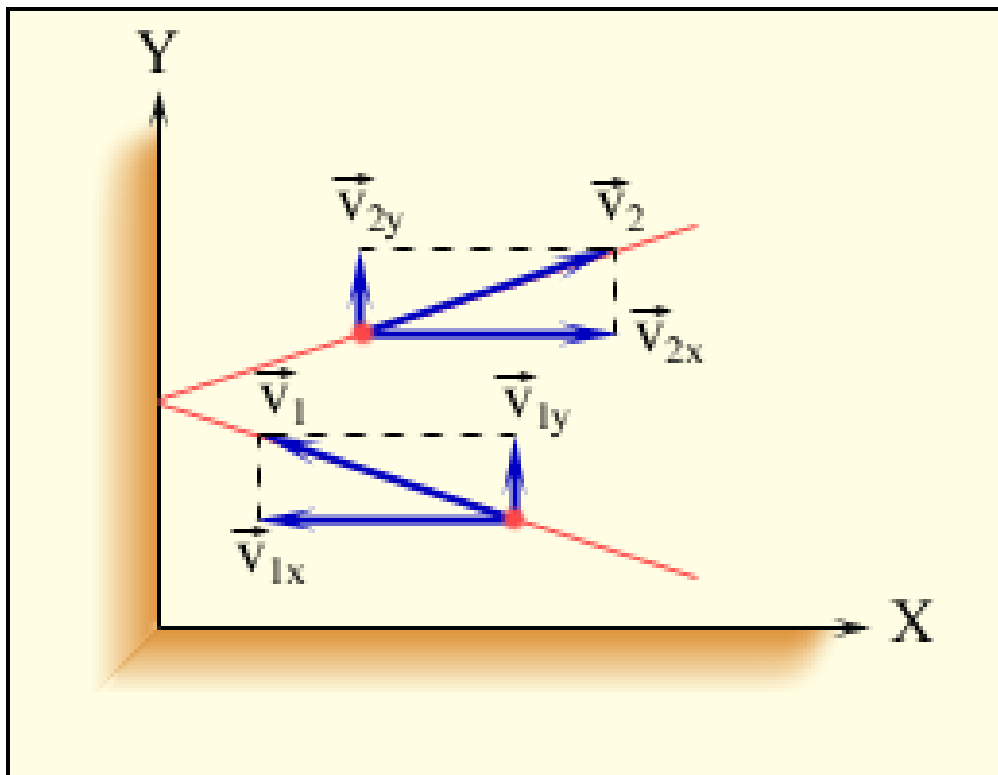
Тема 3. Основное уравнение МКТ

- 3.3. Давление газа с точки зрения МКТ

$$P_{\text{BH}} = P(V, T, N)$$

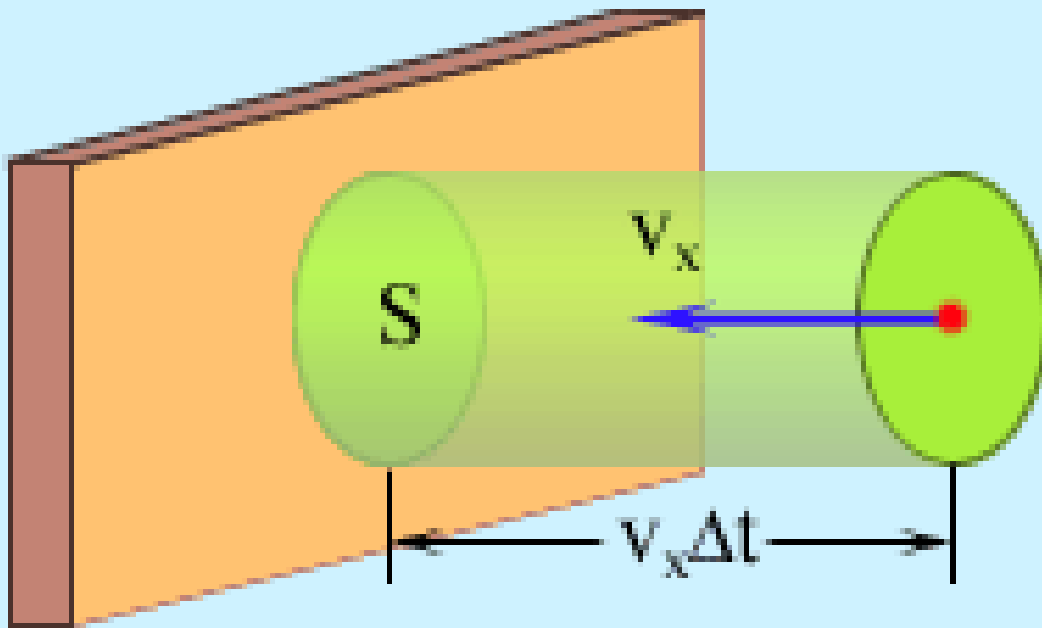


Упругое столкновение молекулы со стенкой



$$\Delta \vec{p} = -2m\vec{v}_x$$

Определение числа столкновений молекул с площадкой S



- $n(v_x)$ - концентрация молекул, имеющих скорости от v_x до $v_x + dv_x$
- $\Delta N(v_x)$ – число таких молекул, ударяющихся в Δs за Δt

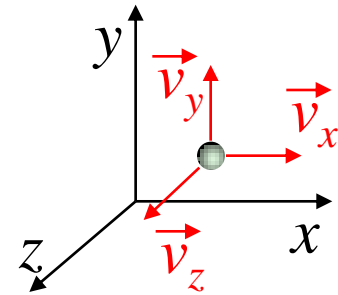
Выводы для одноатомного газа:

- 1. $P = \frac{2}{3}n\langle E_k \rangle$
- 2. $\langle E_k \rangle = \frac{3}{2}kT$
- 3. $U_\mu = N_A\langle E_k \rangle = \frac{3}{2}N_AkT = \frac{3}{2}RT$
- 4. $C_V = \frac{3}{2}R; \quad C_P = \frac{5}{2}R; \quad \gamma = \frac{5}{3}$

Тема 3. Основное уравнение МКТ

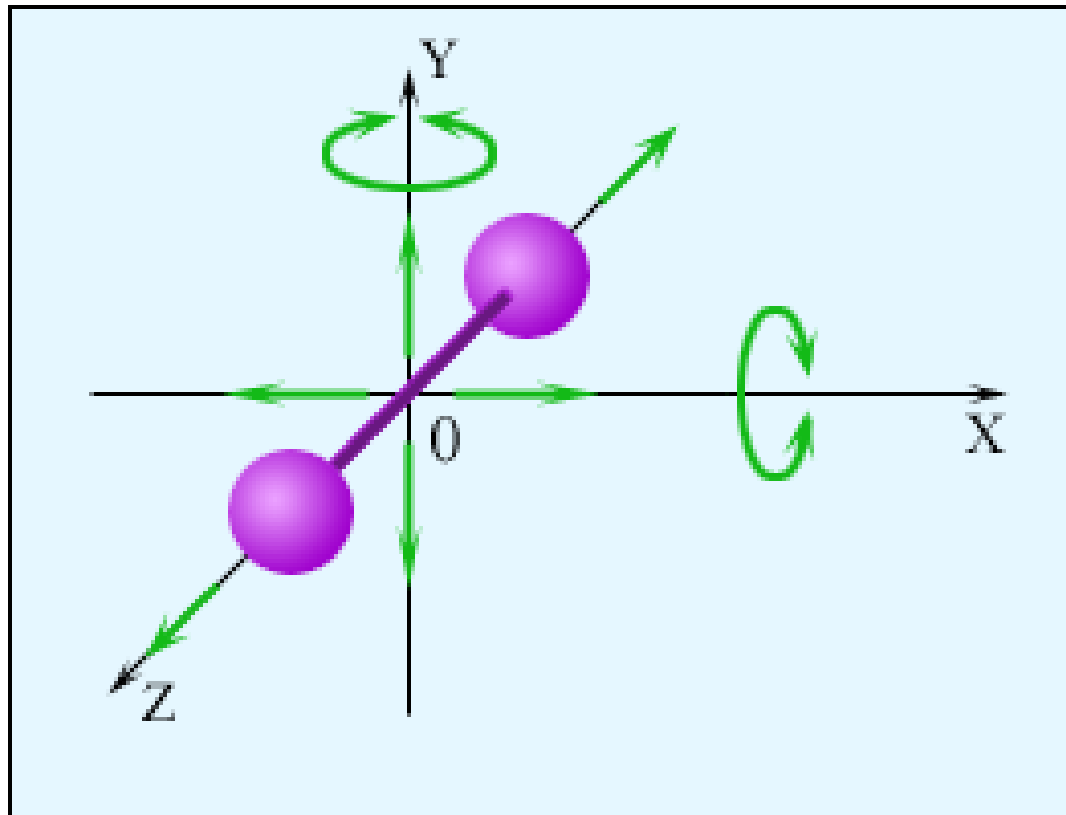
- 3.4. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы

Число степеней свободы механической системы называется число независимых величин, с помощью которых может быть задано положение системы



*$i = 3$ – число
поступательных
степеней свободы*

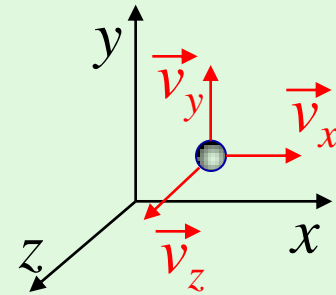
Модель двухатомной молекулы



Внутренняя энергия системы: $U = N\langle \varepsilon \rangle$

Для одноатомного идеального газа: $\langle \varepsilon \rangle = \langle \varepsilon^{(пост)} \rangle = \left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = \frac{3}{2} kT.$

$$\langle \varepsilon^{(пост)} \rangle = \frac{i_{пост}}{2} kT$$



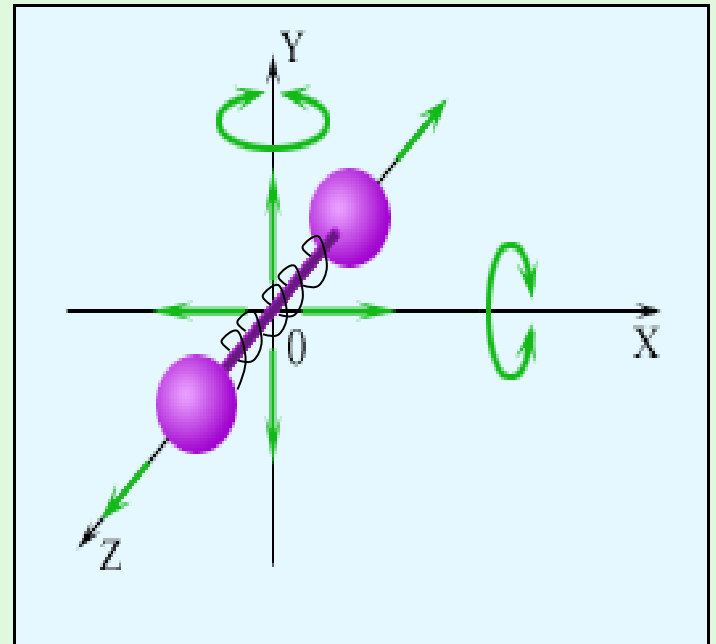
$i = 3$ – число
поступательных
степеней свободы

**Для двухатомного
идеального газа:**

$$\langle \varepsilon_k \rangle = \langle \varepsilon_{k1} \rangle + \langle \varepsilon_{k2} \rangle = \frac{3}{2} kT + \frac{3}{2} kT = 3kT$$

*Из них $i_{\text{цм}} = 3$,
 $i_{\text{вр}} = 2$, $i_{\text{кол}} = 1$*

*$i = 6$ число
степеней свободы*



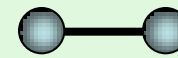
Теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы (теорема Больцмана)

В состоянии теплового равновесия на каждую степень свободы молекулы приходится одинаковая энергия, равная $kT/2$.

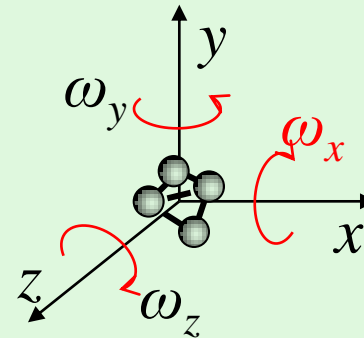


Больцман
Людвиг
(20.II.1844–5.IX.1906)

Вращательная составляющая энергии молекулы



Для многоатомного газа ($n \geq 3$):



$$i_{\text{пост}} = 3$$

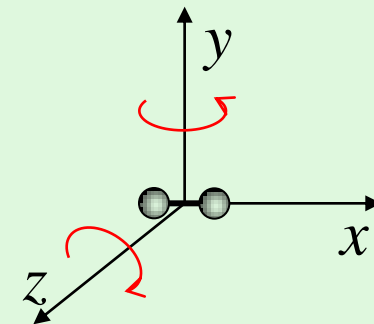
$$i_{\text{вр}} = 3$$

$$\langle \varepsilon^{(\text{вр})} \rangle = \left\langle \frac{I_x \omega_x^2}{2} \right\rangle + \left\langle \frac{I_y \omega_y^2}{2} \right\rangle + \left\langle \frac{I_z \omega_z^2}{2} \right\rangle = \frac{3}{2} kT;$$

Для двухатомного газа :

$$\langle \varepsilon^{(\text{вр})} \rangle = \left\langle \frac{I_y \omega_y^2}{2} \right\rangle + \left\langle \frac{I_z \omega_z^2}{2} \right\rangle = \frac{2}{2} kT,$$

т.к. $I_x = 0$ $\left(= mr^2 \right)$



$$i_{\text{пост}} = 3$$

$$i_{\text{вр}} = 2$$

Полная энергия молекулы:

$$\langle \varepsilon \rangle = \langle \varepsilon^{(пост)} \rangle + \langle \varepsilon^{(вр)} \rangle + \langle \varepsilon^{(кол)} \rangle$$

$$i = i_{пост} + i_{вр} + 2i_{кол}$$

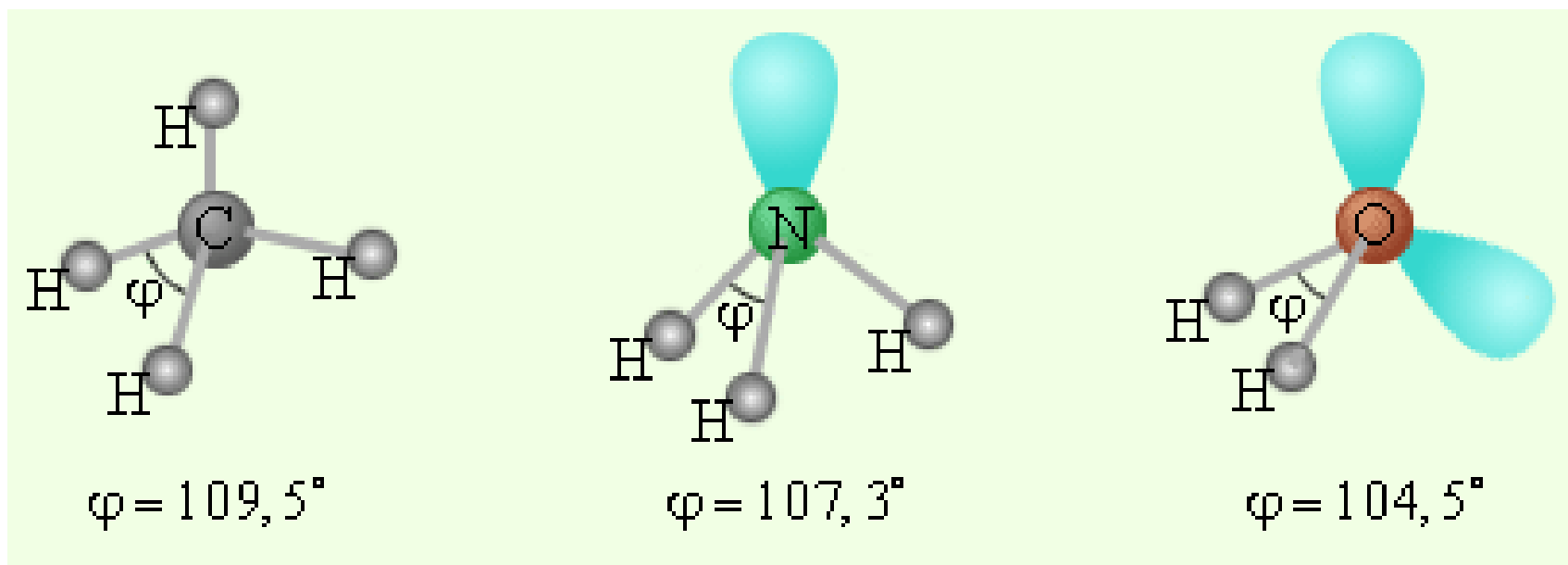
$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT$$

Внутренняя энергия газа: $U = N \langle \varepsilon \rangle$

$$U = \nu \frac{i}{2} RT = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT$$

Внутренняя энергия –
функция состояния!

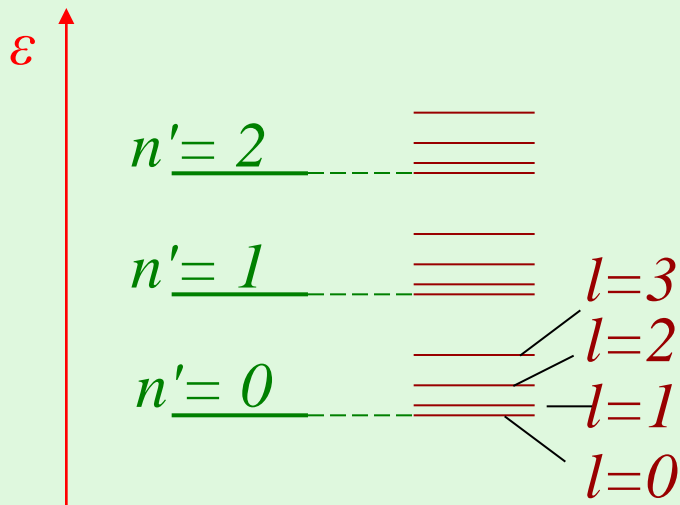
Несвязывающие электронные пары и углы связи в молекулах NH_3 и H_2O в сравнении с молекулой CH_4 .



$$C_V = \frac{1}{\nu} \frac{dU}{dT} = N_A \frac{d\langle \varepsilon \rangle}{dT};$$

Энергия молекулы

$$\varepsilon = \varepsilon^{(пост)} + \varepsilon^{(вр)} + \varepsilon^{(кол)}$$



$$\varepsilon^{(вр)} = \frac{\hbar^2}{2I} l(l+1)$$

$$\varepsilon^{(кол)} = \hbar\omega_\nu \left(n - \frac{1}{2}\right)$$

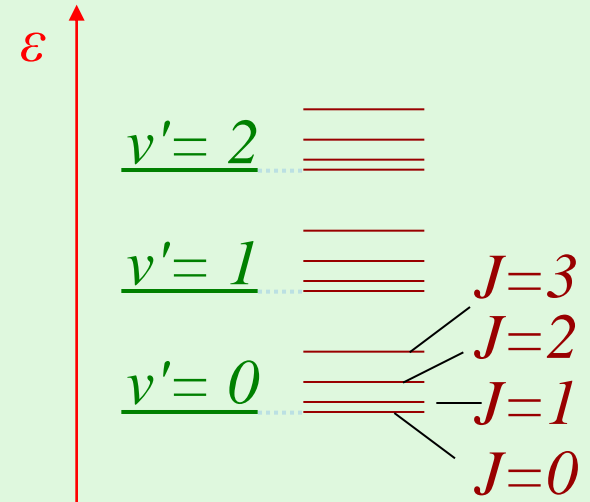
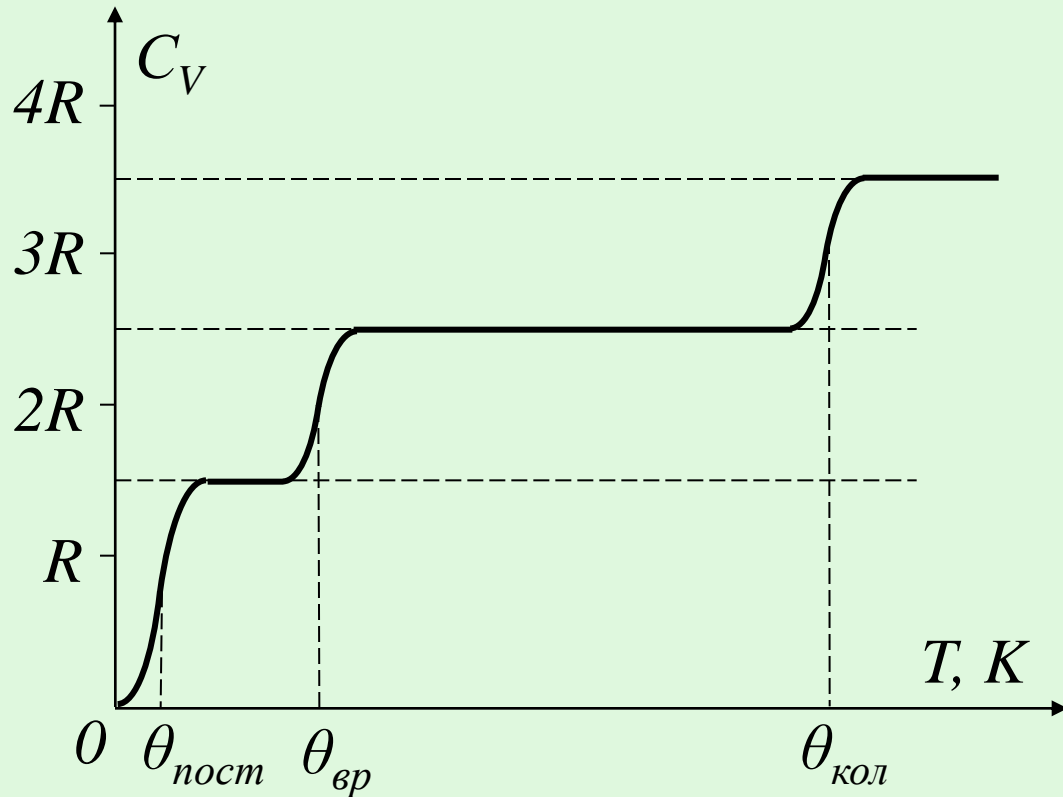
$$\Delta\varepsilon_{кол} \gg \Delta\varepsilon_{вр} \gg \Delta\varepsilon_{пост}$$

$$C_V = \frac{i}{2} R;$$

$$i = i_{пост} + i_{вр} + 2i_{кол}$$

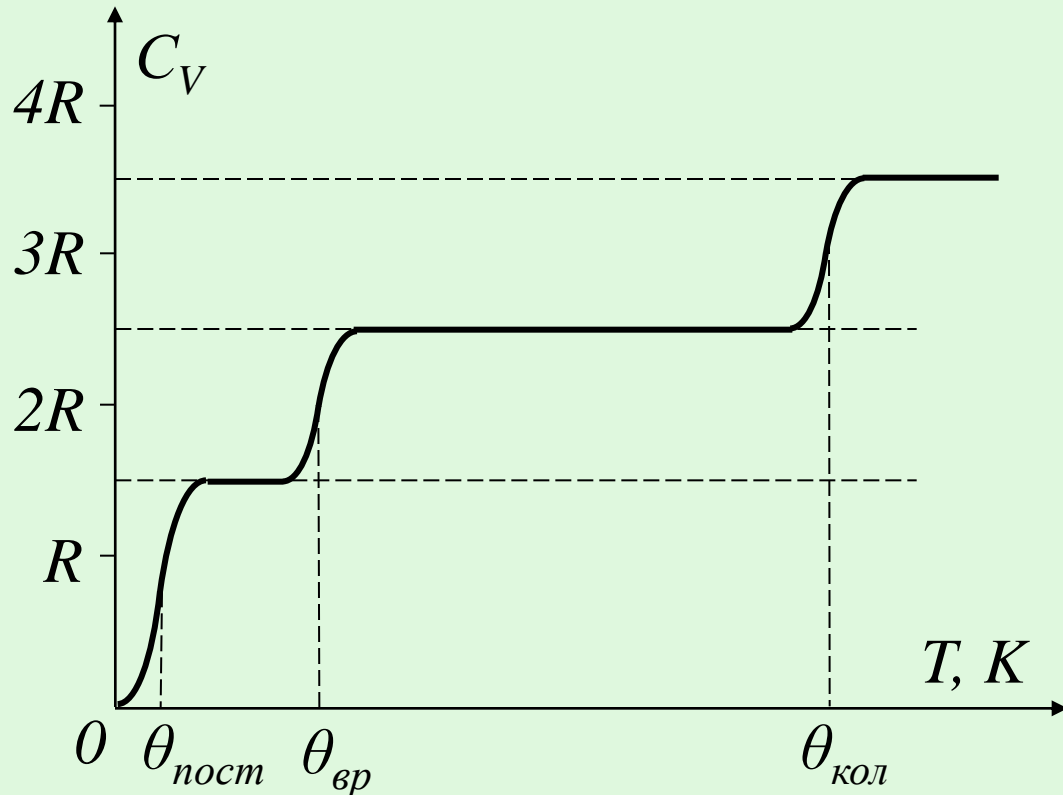
$$C_V = \frac{i}{2} R; \quad i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} + 2i_{\text{кол}}$$

Теплоемкость двухатомного газа ($i_{\text{пост}} = 3; i_{\text{вр}} = 2; i_{\text{кол}} = 1$):



$$C_V = \frac{i}{2} R; \quad i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} + 2i_{\text{кол}}$$

Теплоемкость двухатомного газа ($i_{\text{пост}} = 3; i_{\text{вр}} = 2; i_{\text{кол}} = 1$):



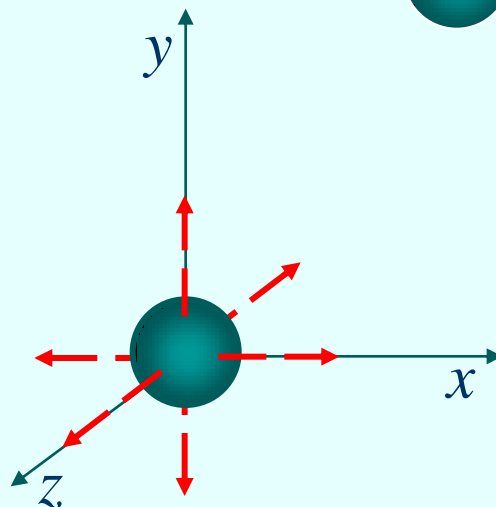
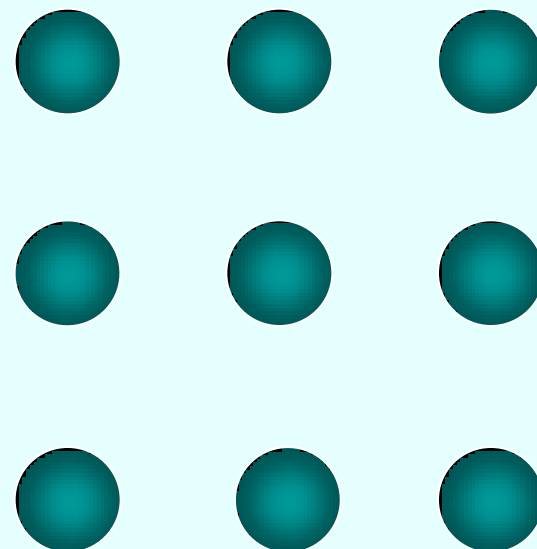
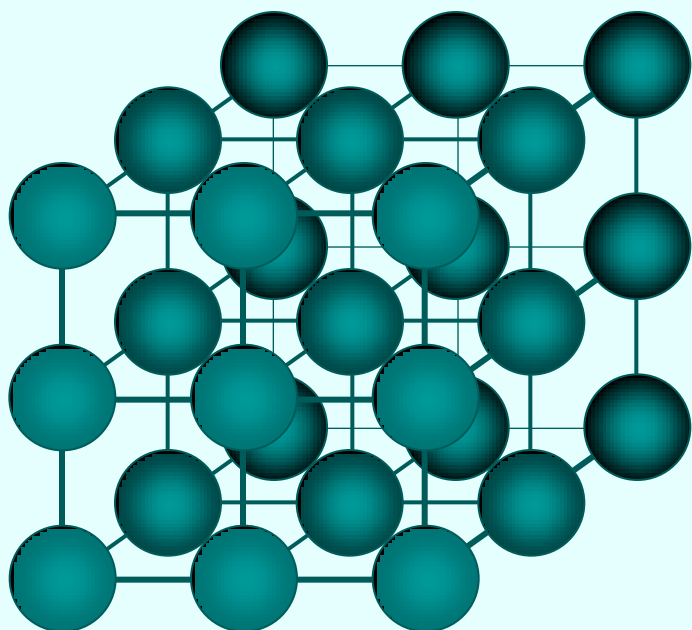
	H ₂	N ₂	O ₂
$\theta_{\text{вр}}$ К	85	3	2
$\theta_{\text{кол}}$ К	6100	3330	2230

Для практических расчетов принимают

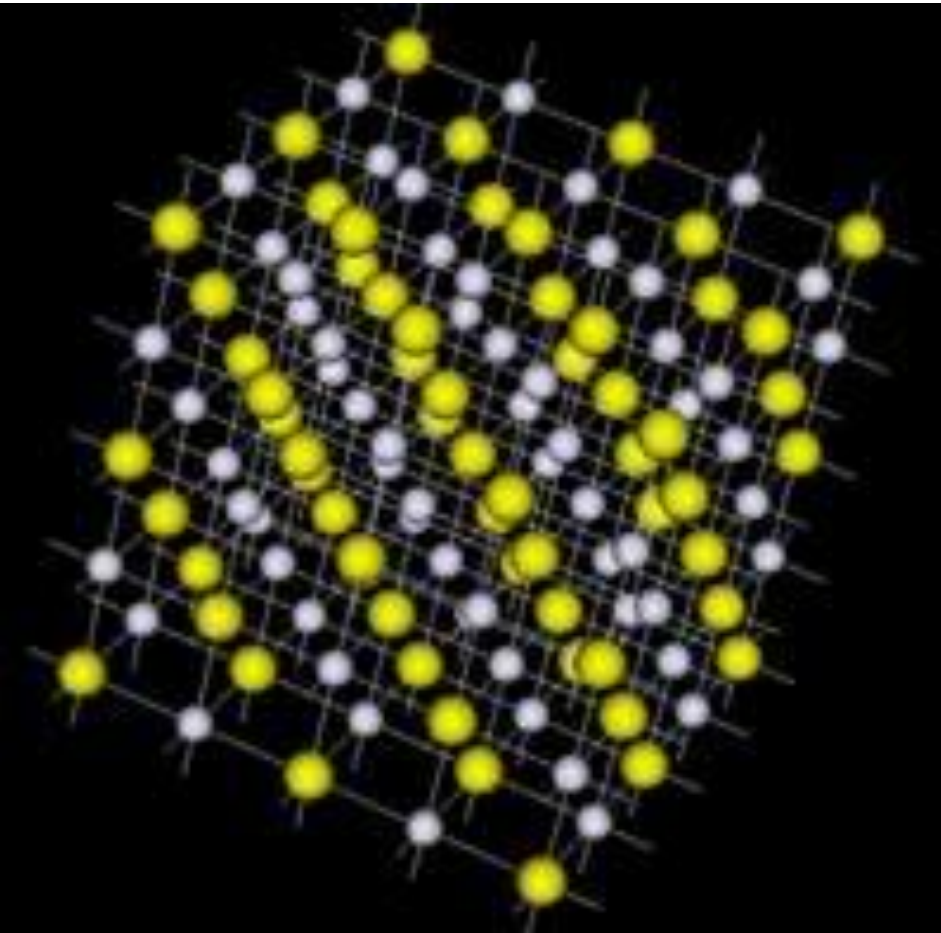
$$i_{(n=1)} = 3; i_{(n=2)} = 5; i_{(n \geq 3)} = 6$$

Теплоемкость твердых тел

Движение атомов в кристалле



Теплоемкость твердых тел



Число степеней свободы – $3N$

$$C_V = 3RT$$

Закон Дюлонга-Пти

$c = 3R$ - закон Дюлонга – Пти

