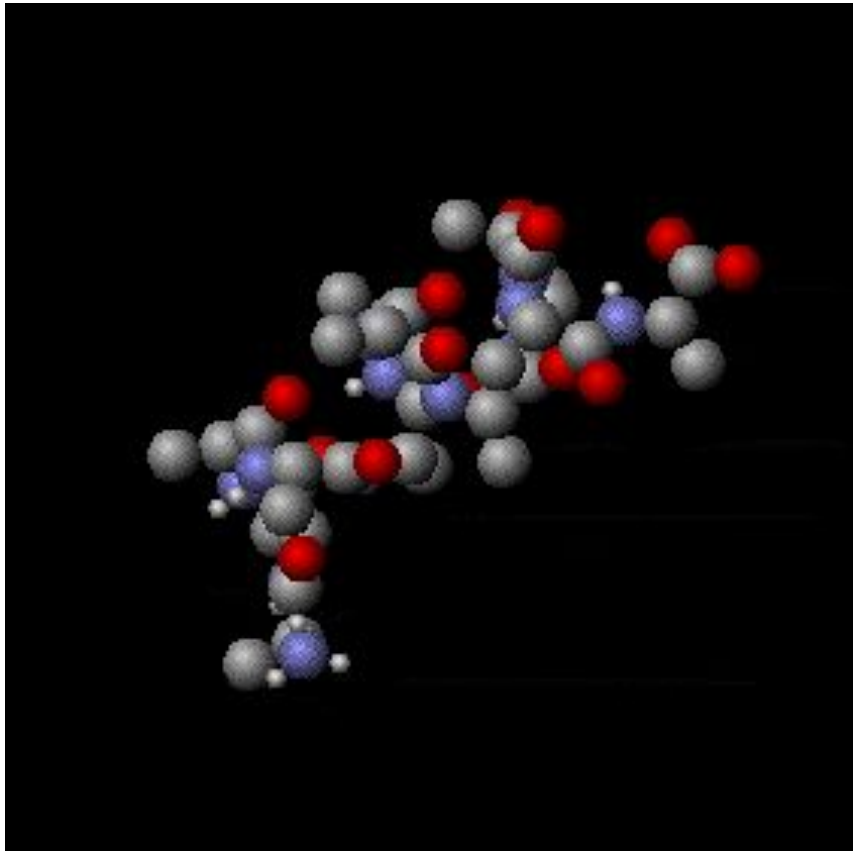
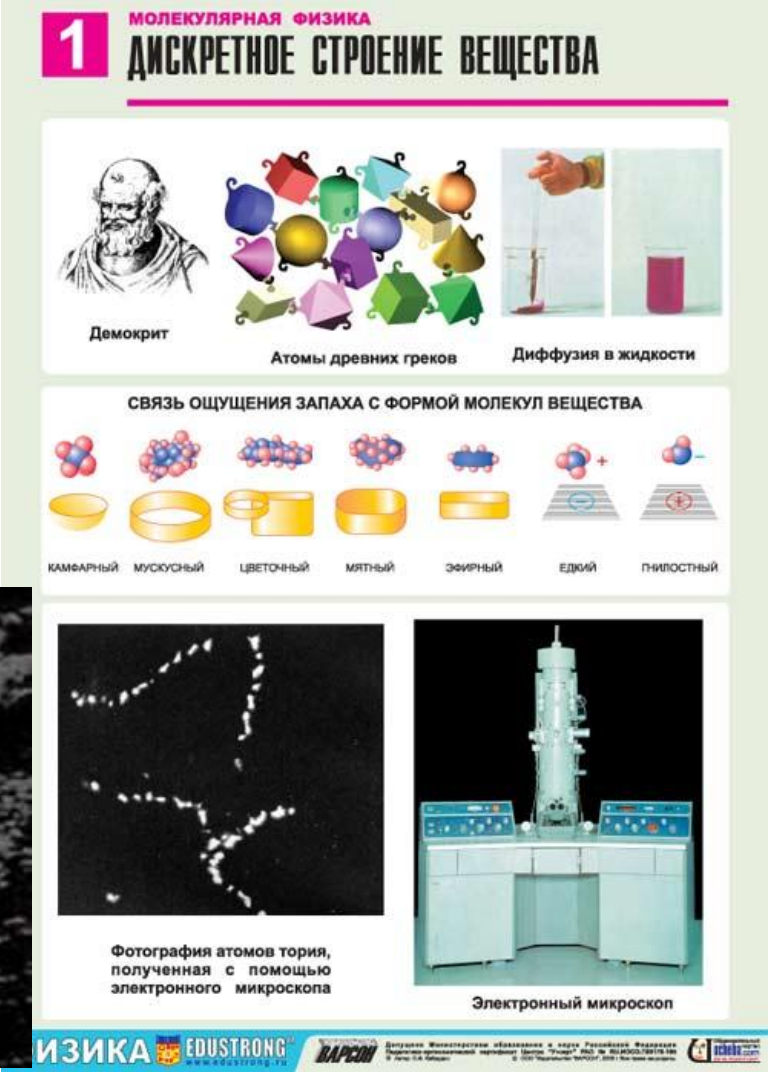
# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

## §1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МКТ

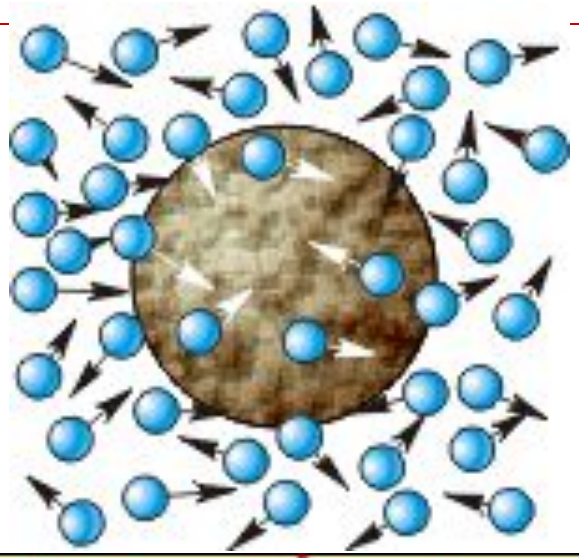


# 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МКТ (I)

Любое тело состоит из большого числа весьма малых обособленных частиц – молекул. Молекула является мельчайшей частицей вещества, сохраняющей все его химические свойства. Простейшие молекулы (содержат только одно ядро), называются атомами.



# 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МКТ (II)



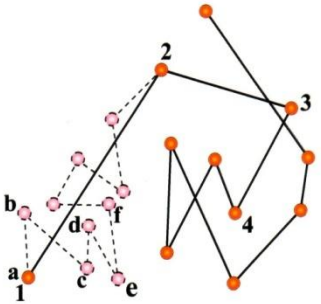
## Движение молекул

Атомы и молекулы находятся в состоянии непрерывного хаотического ТЕПЛОВОГО движения

Доказательством этого являются:

**БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ**

- движение взвешенных в жидкости или газе макроскопических частиц



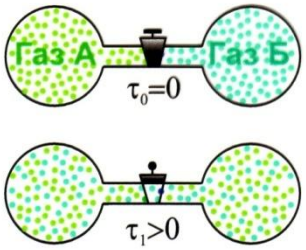

a-b-c-... - фиксация положения частицы производилась через $\Delta t=5$ с

1-2-3- ... - через $\Delta t=50$ с

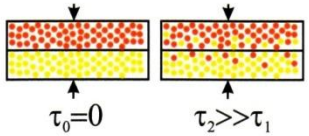
**ДИФФУЗИЯ**

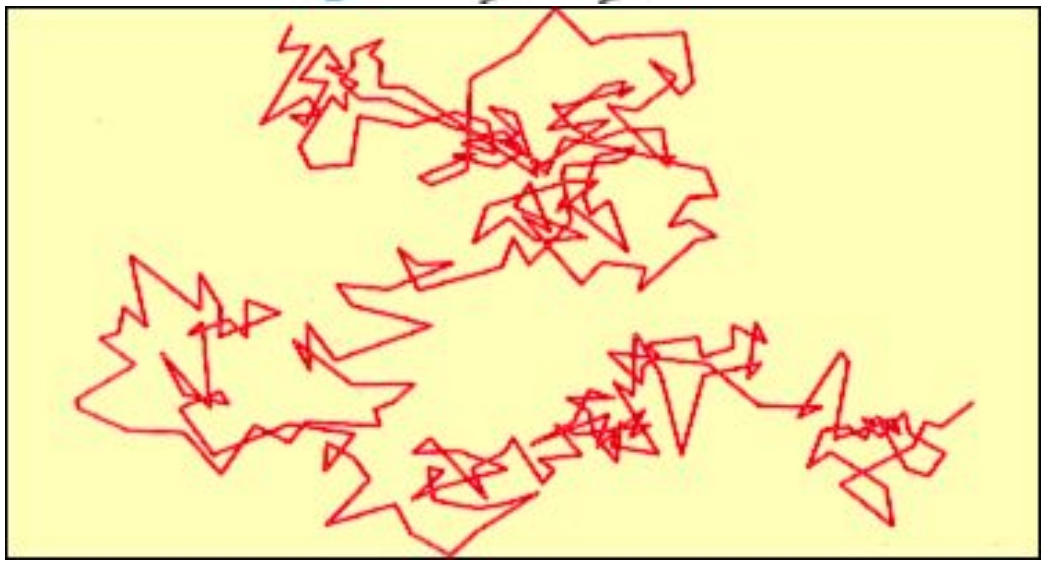
- проникновение различных веществ друг в друга , вследствие теплового движения молекул

*Диффузия в газах*

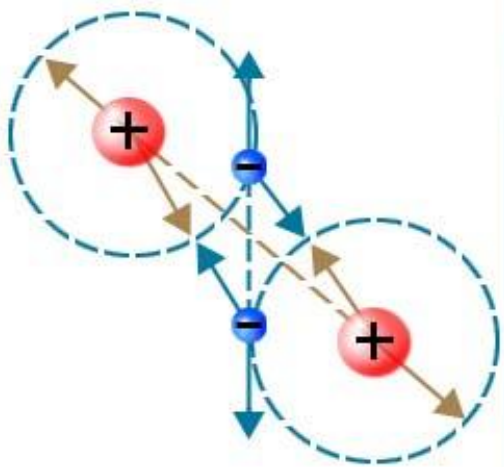


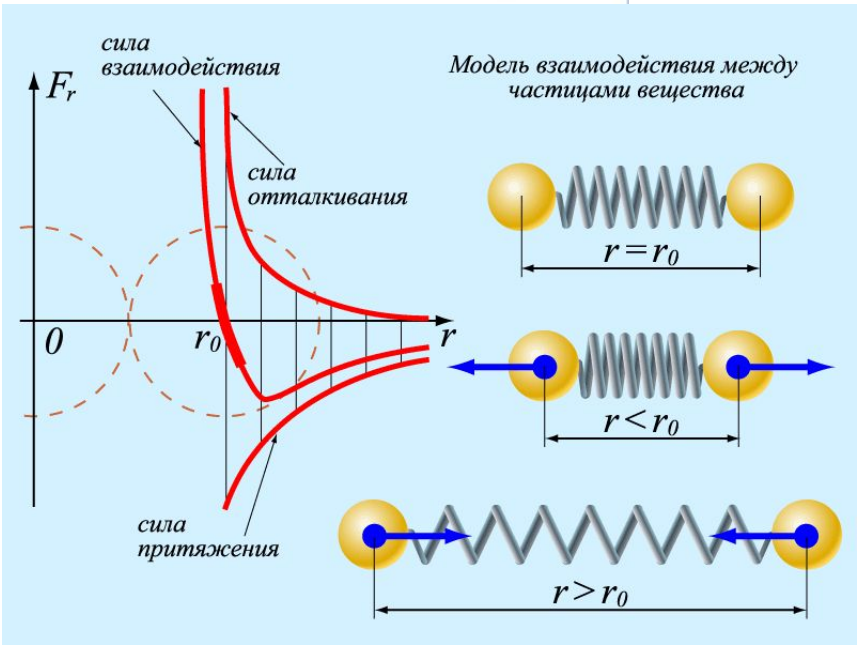

*Диффузия в твердых телах*

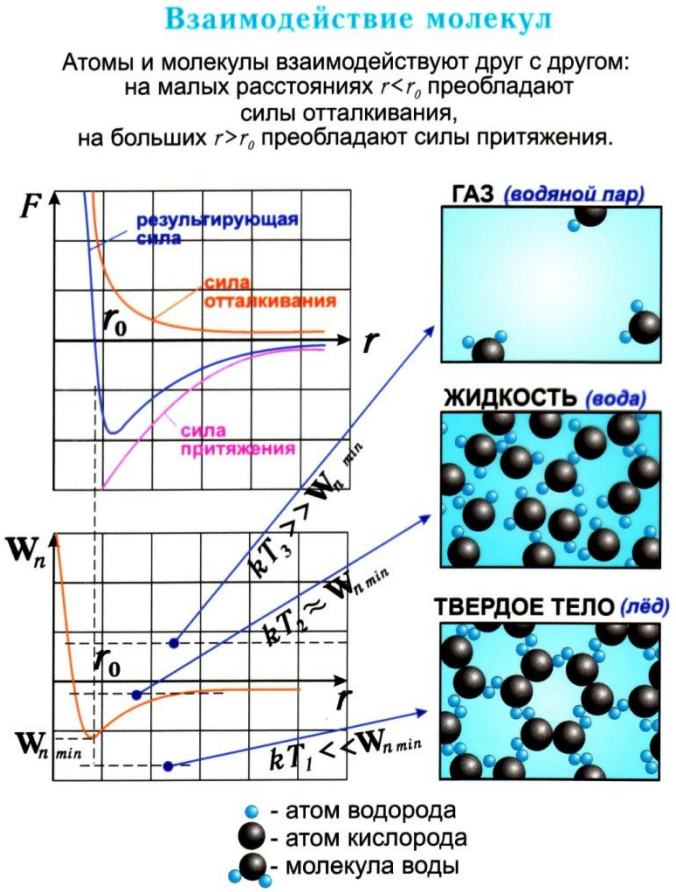


# 3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МКТ (III)







# 4. КОЛИЧЕСТВО ВЕЩЕСТВА

## Количество вещества

**Атомная единица массы вещества (а.е.м.)**

$$m_{ед} = \frac{\text{масса атома } C_{12}}{12} \approx 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,\text{кг}$$

**Относительная молекулярная (атомная) масса вещества -** отношение массы молекулы (атома) $m_0$ к а.е.м.

$$M_r = \frac{m_0}{m_{ед}}$$

| вещество | $M_r$ |
|---|---|
| C | 12 |
| O | 16 |
| N | 14 |
| H | 1 |

**Моль** - количество вещества, в котором содержится столько же молекул (атомов), сколько содержится в 0,012 кг углерода

Моль любого вещества содержит одно и тоже число молекул - **число Авогадро**

$$N_A = \frac{0{,}012\,\text{кг/моль}}{1{,}66 \cdot 10^{-27} \cdot 12} = 6{,}023 \cdot 10^{23}\,\text{моль}^{-1}$$

**Молярная масса** есть масса моля вещества

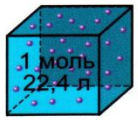
$$M = m_0 N_A = M_r m_{ед} N_A$$
$$M = M_r \cdot 10^{-3}\,(\text{кг/моль})$$

**Количество вещества**

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$$

**Закон Авогадро**

Моль любого идеального газа при нормальных условиях занимает объем



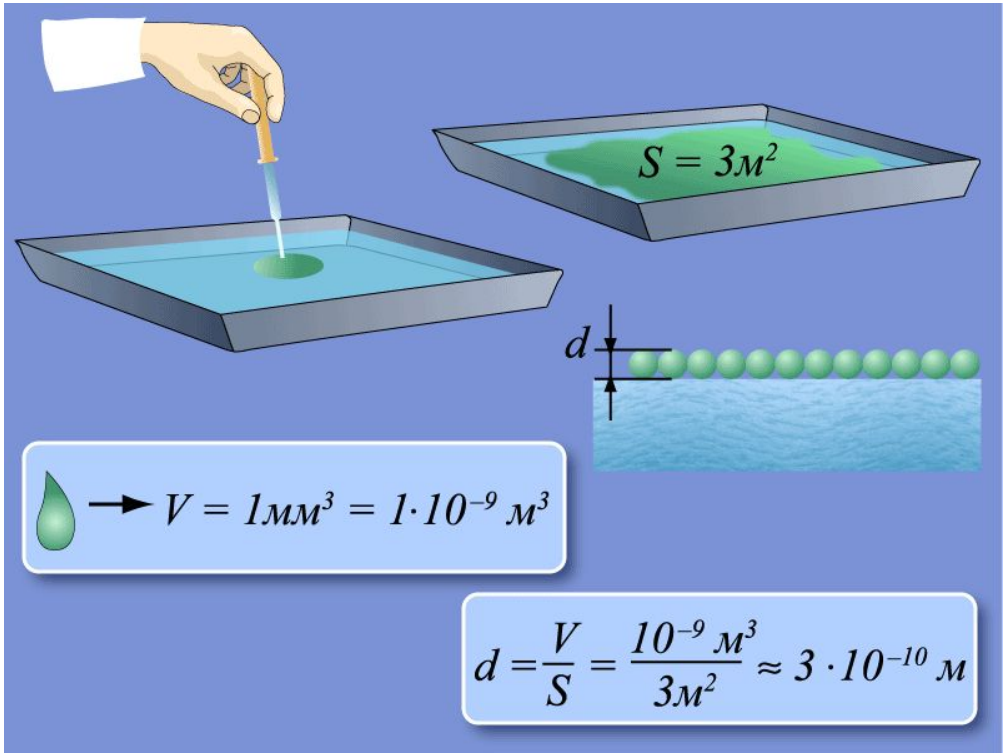

$p = 760$ *мм рт.ст.* $= 1{,}013\ 10^5$ *Па*, $T = 273$ *К*

$V = 22{,}4 \cdot 10^{-3}\,\text{м}^3$

Амедео Авогадро
1776-1856
Итальянский физик и химик

# 5. РАЗМЕР МОЛЕКУЛ

Естественно предположить, что в жидкостях и твердых телах молекулы расположены «вплотную» друг к другу. Объем молекулы можно оценить, разделив объем моля жидкости на число молекул в моле (число Авогадро). Известно, что 1 моль воды имеет массу 18 г и занимает объем 18 см$^3$. Следовательно,



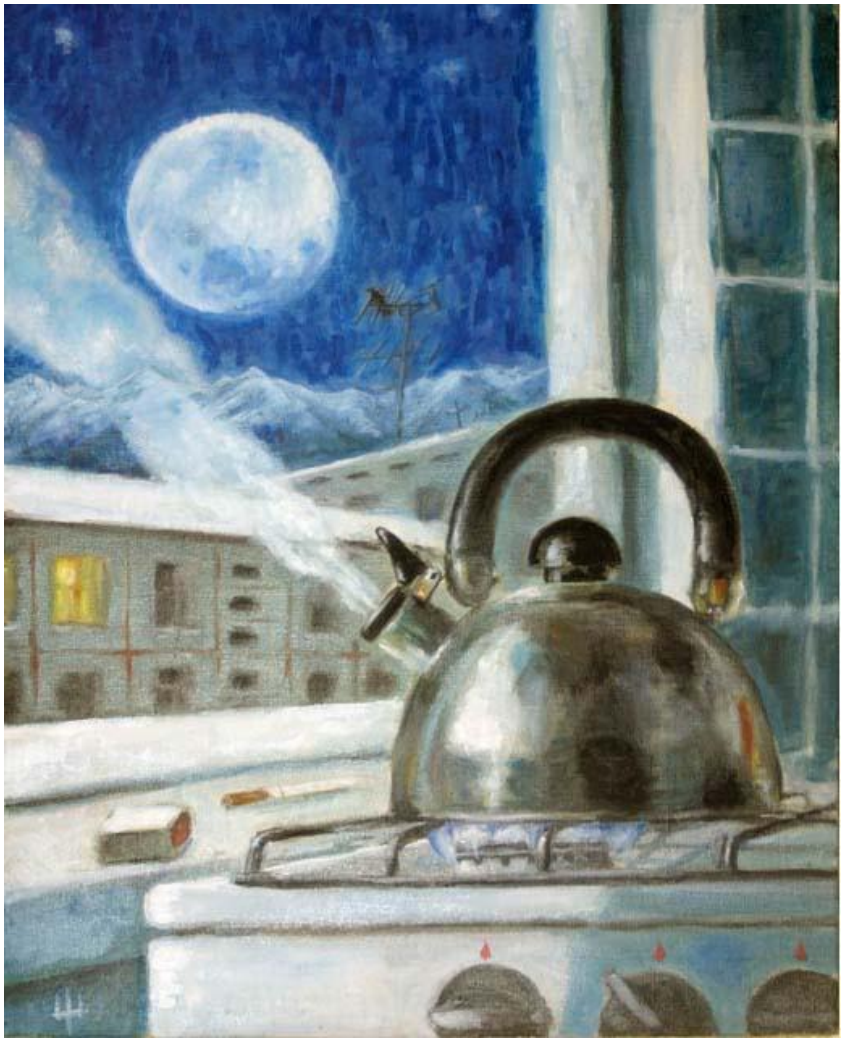

$$l^3 = \frac{18 \cdot 10^{-6}\, м^3 \cdot моль}{6{,}022 \cdot 10^{23}\, моль^{-1}} \approx 30 \cdot 10^{-30}\, м^3 \Rightarrow l \approx \sqrt[3]{30 \cdot 10^{-30}\, м^3} \approx 3 \cdot 10^{-10}\, м.$$

# 6. СТАТИСТИЧЕСКИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ

Существуют два способа описания процессов, происходящих в макроскопических телах (телах, состоящих из большого числа частиц) – статистический и термодинамический. Статистический метод изучает свойства макроскопических тел исходя из свойств образующих тело частиц и взаимодействий между ними. Свойства тел, наблюдаемые на опыте, объясняются как усредненный результат действия отдельных молекул. Термодинамический метод изучает свойства тел, не вдаваясь в их микроскопическую структуру, а опираясь на фундаментальные законы (начала термодинамики), установленные обобщением экспериментальных фактов.

| Макроскопические параметры | Микроскопические параметры |
|---|---|
| *Масса системы* | *Масса частицы* |
| *Объем системы* | *Объем частиц* |
| *Температура системы* | *Концентрация частиц* |
| *Количество вещества в системе* | *Количество частиц* |
| *Давление системы на внешние тела* | *Скорость частиц* |
| *Внутренняя энергия системы* | *Энергия частицы* |

# 7. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ



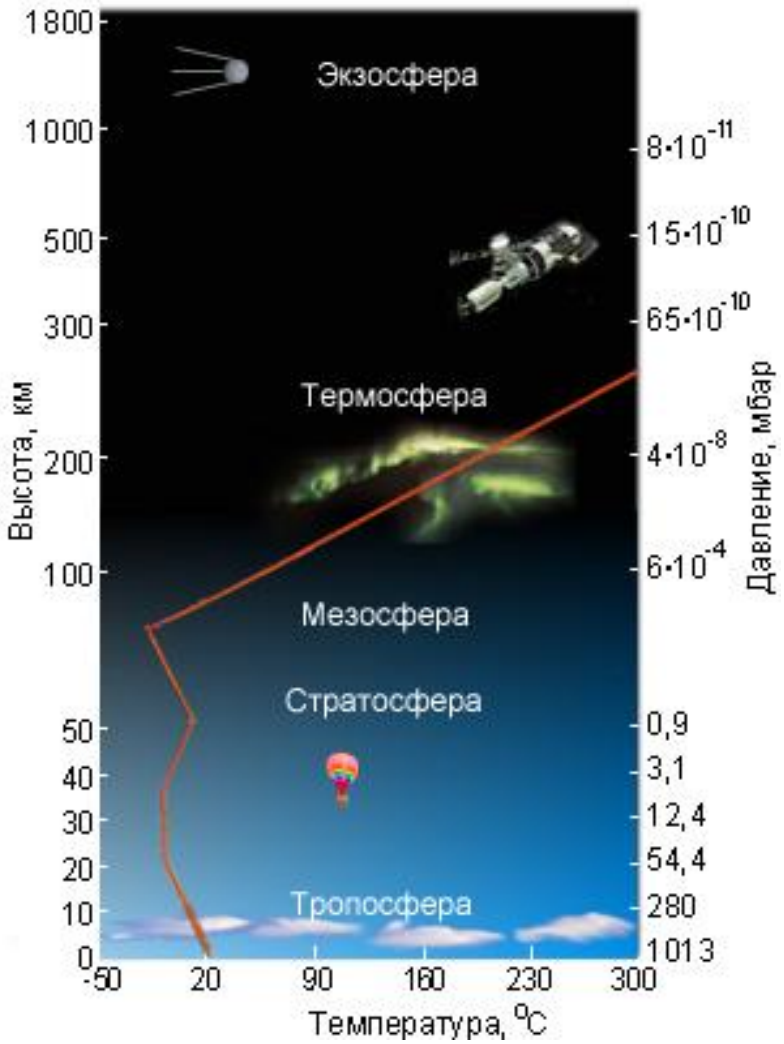
Термодинамической системой называется совокупность макроскопических тел, которые могут обмениваться энергией между собой и окружающей средой.

Термодинамическая система может находиться в различных состояниях, различающихся температурой, давлением, объемом, плотностью… Подобные величины, характерезующие состояние системы, называются параметрами состояниями. Термодинамические системы, которые не обмениваются с внешней средой ни энергией, ни веществом называются замкнутыми (изолированными).

# 8. РАВНОВЕСНЫЕ И НЕРАВНОВЕСНЫЕ СОСТОЯНИЯ

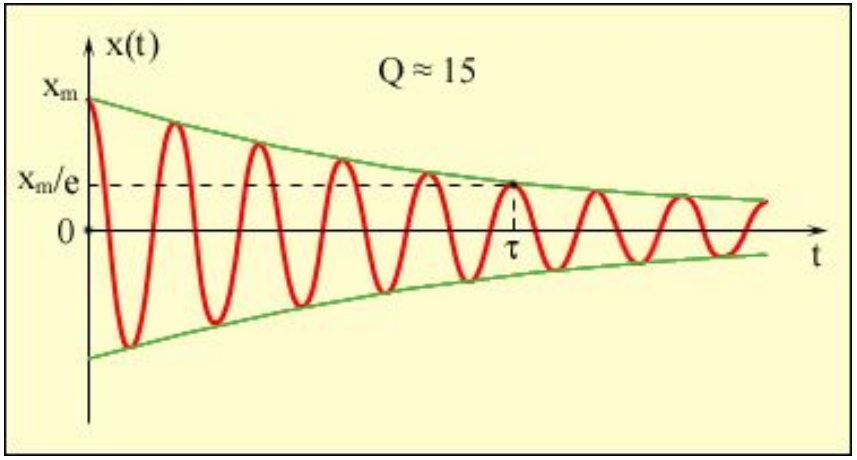
Параметры состояния не всегда имеют определенные значения (одинаковые во всех точках системы). Состояние, в котором хотя бы один из параметров не имеет определенного значения, называется неравновесным.

Состояние термодинамической системы будет равновесным, если все параметры состояния имеют определенные значения, не изменяющиеся с течением времени.



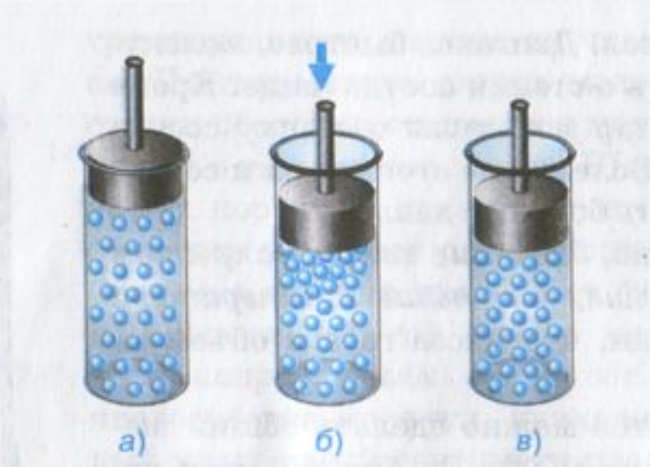
# 9. РЕЛАКСАЦИЯ. ВРЕМЯ РЕЛАКСАЦИИ

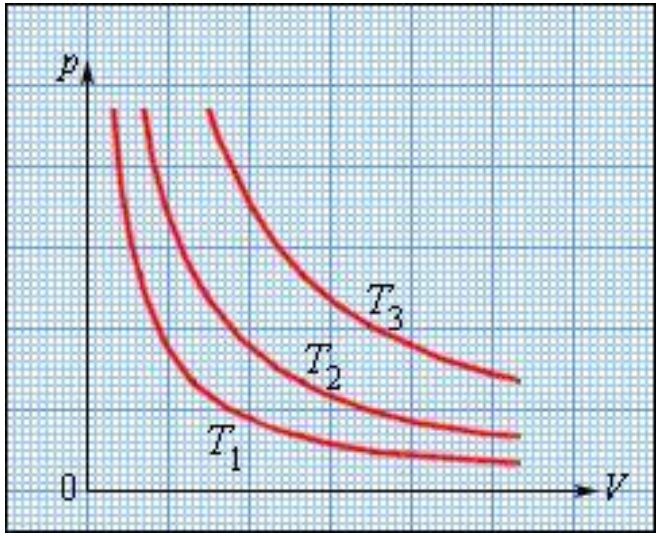
Если систему, находящуюся в неравновесном состоянии изолировать от внешней среды, то есть предоставить самой себе, то она перейдет в равновесное состояние. Такой переход называется процессом релаксации или просто релаксацией (relaxatio – уменьшение напряжения, ослабление, расслабление). Время, за которое первоначальное отклонение какой-либо величины от равновесного значения уменьшается в e (2,718281828…) раз, называется временем релаксации.



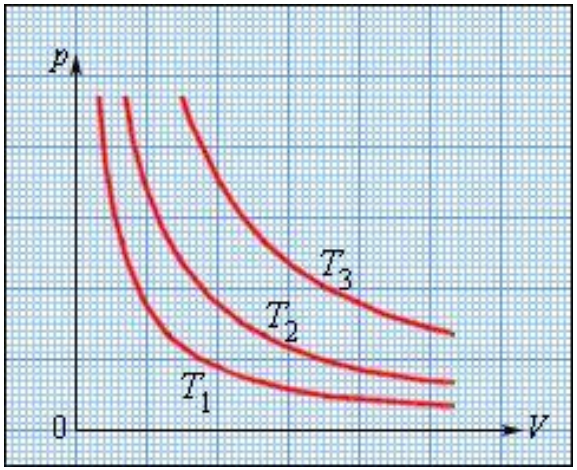
# 10. РАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Термодинамическим процессом называется переход системы из одного состояния в другое. Такой переход всегда связан с нарушением равновесия системы. Например, при сжатии газа давление в первую очередь возрастет вблизи поршня – равновесие нарушится. Нарушение равновесия будет тем значительнее, чем быстрее перемещать поршень. Если двигать поршень очень медленно, то равновесие нарушается незначительно и давление в разных точках мало отличается от равновесного для данного объема газа. В пределе, при бесконечно медленном сжатии процесс окажется состоящим из последовательности равновесных состояний. Такой процесс называется равновесным или квазистатическим.



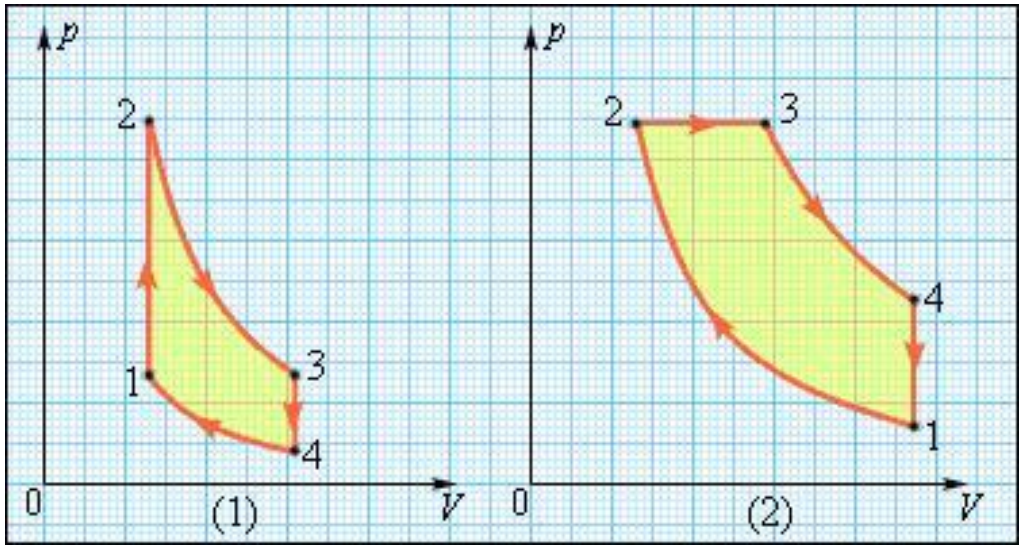
# 11. ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ

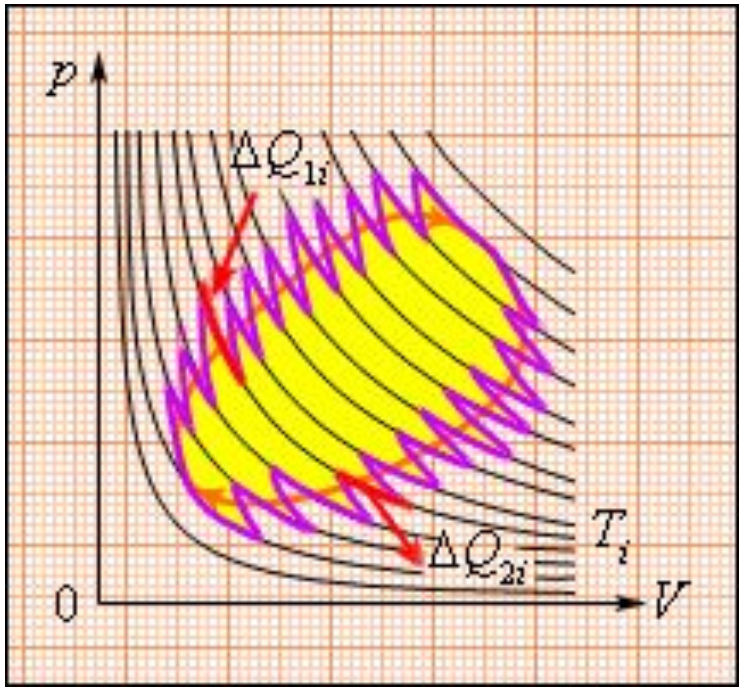


При изменении направления равновесного процесса (например, замене сжатия газа расширением) система будет проходить через те же равновесные состояния, что и при прямом ходе, но в обратной последовательности. Поэтому равновесные процессы называют также обратимыми процессами. Равновесное состояние можно изобразить точкой на координатной (фазовой) плоскости, а равновесный процесс – кривой линией. Неравновесное состояние и процесс не могут быть изображенными таким способом. Неравновесные процессы являются необратимыми процессами.

# 12. КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ (ЦИКЛЫ)

Процесс, при котором система после ряда изменений возвращается в исходное состояние, называется круговым процессом или циклом. Графически цикл изображается замкнутой кривой на фазовой диаграмме.

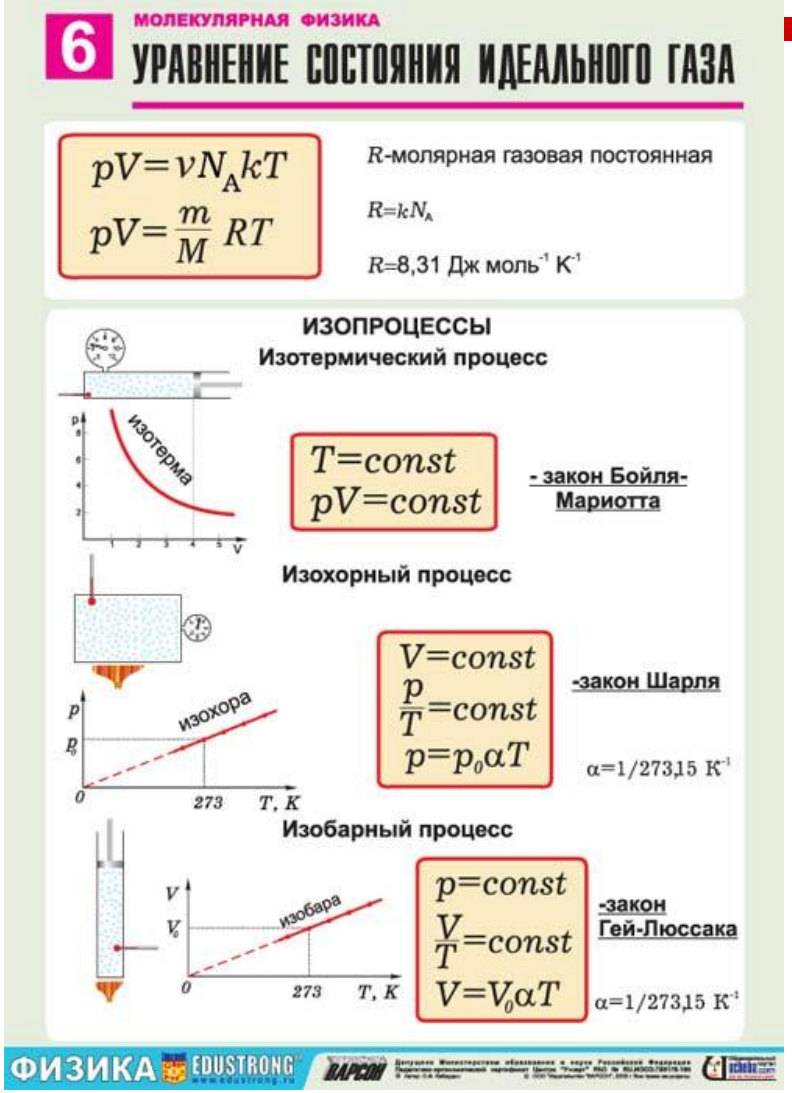


# 13. ТЕМПЕРАТУРА

Если два тела находятся в состоянии термодинамического равновесия, то есть не обмениваются энергией путем теплопередачи, то этим телам приписывается одинаковая температура.
Если между телами происходит направленный теплообмен, то телу отдающему энергию приписывают большую температуру по сравнению с телом, получающим тепловую энергию.
Ряд свойств тел – объем, давление, электрическое сопротивление – зависит от температуры. Любое из этих свойств Можно использовать для количественного определения температуры.

# 14. УРВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА



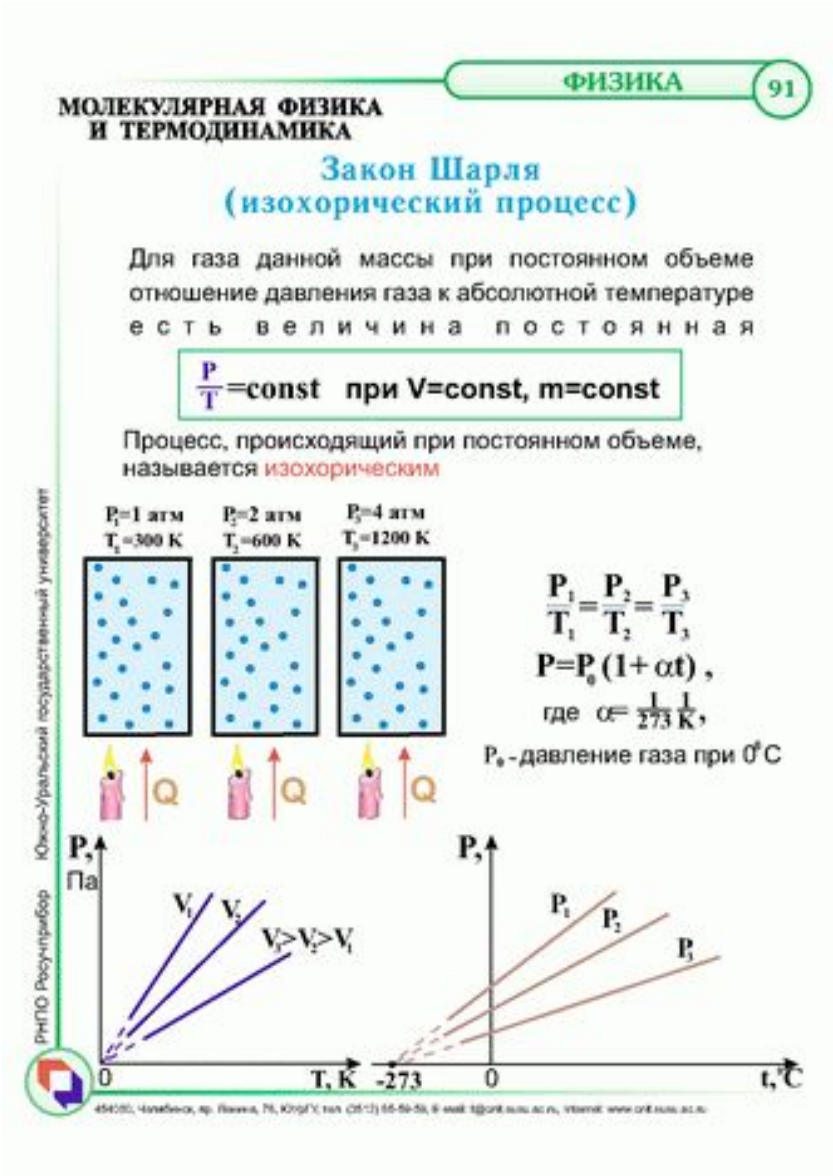

Параметры состояния термодинамической системы закономерно связаны между собой. Соотношение, определяющее связь между параметрами состояния системы, называется уравнением состояния.

Газ, взаимодействием между молекулами которого можно пренебречь, называется идеальным газом.

Опытным путем было установлено, что при обычных условиях (комнатная температура, атмосферное давление) газы подчиняются уравнению

$$\frac{pV}{T} = const \sim N.$$

# 15. ЗАКОН ШАРЛЯ



ФИЗИКА 91

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

## Закон Шарля (изохорический процесс)

Для газа данной массы при постоянном объеме отношение давления газа к абсолютной температуре есть величина постоянная

$$\frac{P}{T}=const \quad \text{при } V=const,\ m=const$$

Процесс, происходящий при постоянном объеме, называется изохорическим

$P_1$=1 атм, $T_1$=300 К; $P_2$=2 атм, $T_2$=600 К; $P_3$=4 атм, $T_3$=1200 К

Q Q Q

$$\frac{P_1}{T_1}=\frac{P_2}{T_2}=\frac{P_3}{T_3}$$

$$P=P_0(1+\alpha t),$$

где $\alpha=\frac{1}{273}\frac{1}{K}$,

$P_0$ - давление газа при 0°С

P, Па; $V_1$, $V_2$; $V_3>V_2>V_1$; 0; T, K

P; $P_1$, $P_2$, $P_3$; -273; 0; t, °C

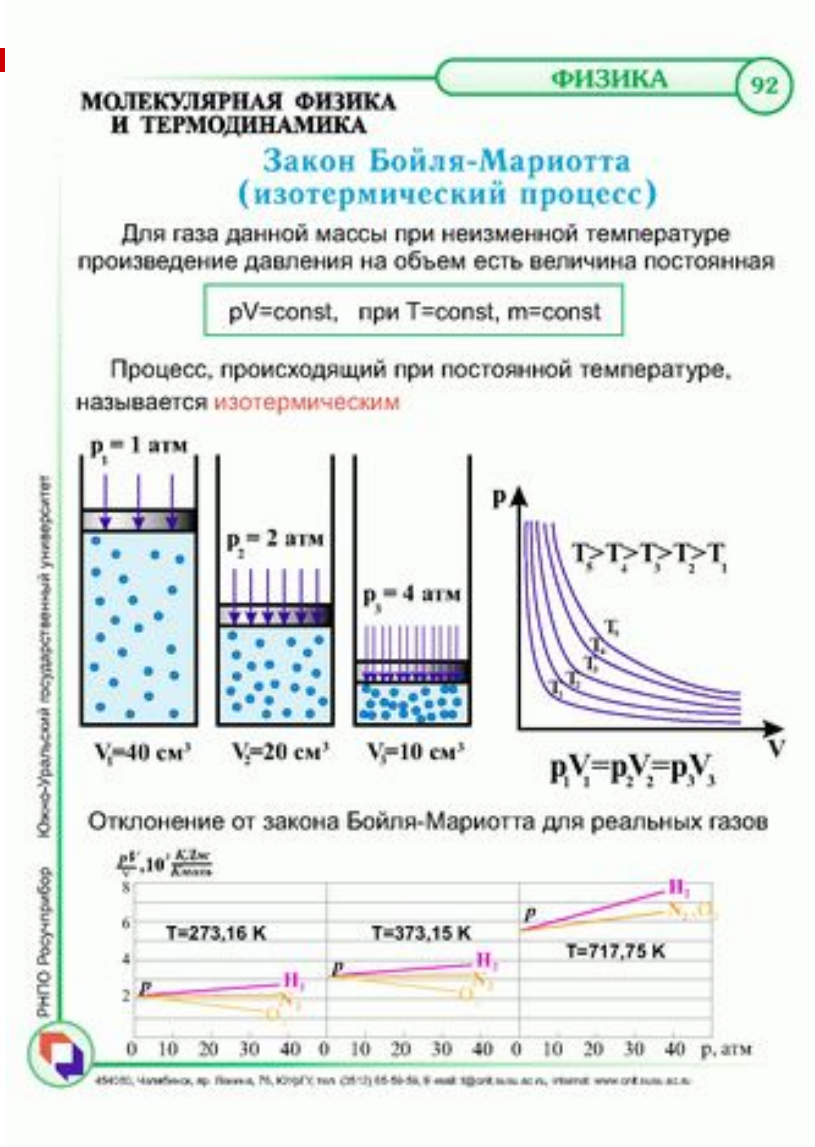
РНПО Росучприбор Южно-Уральский государственный университет

Жан Александр Шарль
1746-1823
французский физик и изобретатель

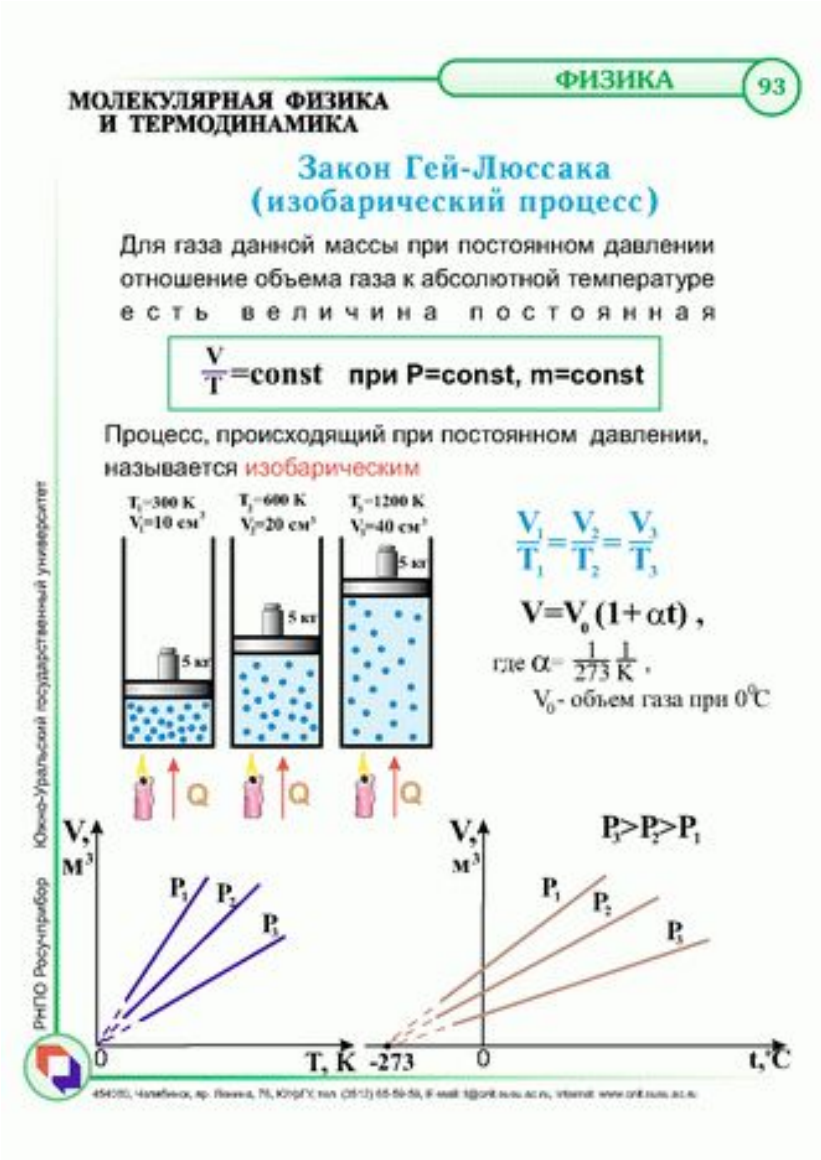
# 16. ЗАКОН БОЙЛЯ-МАРИОТТА

Роберт Бойль
1627-1691
английский химик,
физик и теолог

Эдм Мариотт
1620-1684
французский
физик

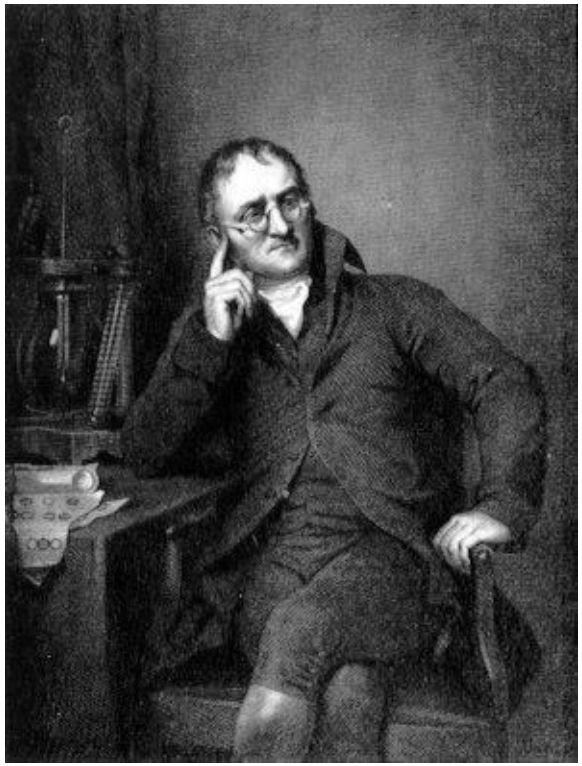


# 17. ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА



Жозеф Луи Гей-Люссак
1778-1850
французский химик и физик

# 18. ЗАКОН ДАЛЬТОНА

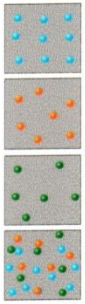


Джон Дальтон
1766-1844
английский физик

## Смесь газов

Давление идеального газа при T = const зависит от концентрации молекул и не зависит от их строения

$$P=\frac{m}{M}\frac{RT}{V}=\frac{Nm_0RT}{N_A m_0 V}$$



| | | |
|---|---|---|
| $M_1$ | $V, T, N_1, m_1$ | $P_1=\frac{m_1}{M_1}\frac{RT}{V}=\frac{N_1}{V}KT$ |
| $M_2$ | $V, T, N_2, m_2$ | $P_2=\frac{m_2}{M_2}\frac{RT}{V}=\frac{N_2}{V}KT$ |
| $M_3$ | $V, T, N_3, m_3$ | $P_3=\frac{m_3}{M_3}\frac{RT}{V}=\frac{N_3}{V}KT$ |
| $M$ | $V, T, (N_1+N_2+N_3)$ $(m_1+m_2+m_3)$ | $P_2=\frac{N_1+N_2+N_3}{V}KT$ |

## Закон Дальтона

Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений компонент смеси

$$P=P_1+P_2+P_3$$

$$\frac{m_1+m_2+m_3}{MV}RT=\frac{m_1}{M_1V}RT+\frac{m_2}{M_2V}RT+\frac{m_3}{M_3V}RT$$

Молярная масса смеси газов

$$M=\frac{m_1+m_2+m_3}{\frac{m_1}{M_1}+\frac{m_2}{M_2}+\frac{m_3}{M_3}}$$

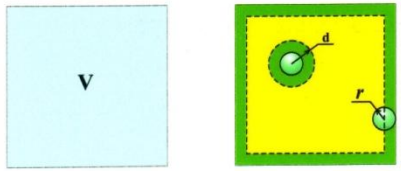
Уравнение Менделеева-Клапейрона для смеси газов

$$PV=\left(\frac{m_1}{M_1}+\frac{m_2}{M_2}+\frac{m_3}{M_3}\right)RT$$

# 19. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

## Уравнение Ван-дер-Ваальса

1. Учет сил отталкивания между молекулами



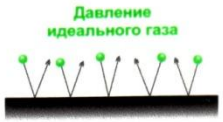

$b$ - поправка на объем, занимаемый молекулами

$$b = \frac{16}{3}\pi r^3 N$$

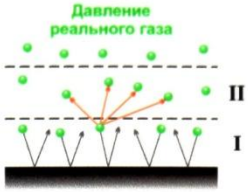
N - число молекул
d и $r$ - радиус и диаметр молекулы

V - объем идеального газа
(V-$b$) - доступный объем для центра молекулы
(V-$b$) - объем реального газа
$b$ - недоступный объем

2. Учет сил притяжения между молекулами




$$P \sim n \sim \frac{N}{V}$$




**Уравнение Ван-дер-Ваальса**

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = \frac{m}{M}RT$$

$$a = a_M \nu^2 \quad b = b_M \nu$$

$\nu$ - число молей
$a_M, b_M$ - константы Ван-дер-Ваальса для одного моля

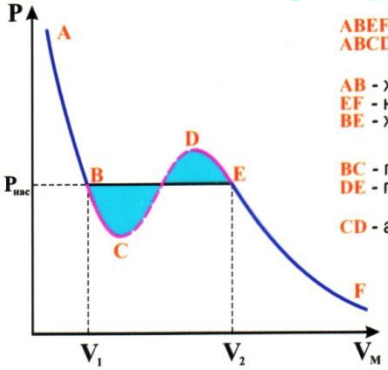
$(P - P')$ - давление реального газа

$$P' \sim n^2 \sim \frac{N^2}{V^2}$$

$P'$ - поправка на внутреннее давление

$$P' = \frac{a}{V^2}$$

## Теоретические и экспериментальные изотермы реального газа




ABEF - экспериментальная изотерма
ABCDEF - теоретическая изотерма

AB - жидкое состояние
EF - ненасыщенный пар
BE - жидкость+насыщенный пар
} стабильное состояние

BC - перегретая жидкость
DE - пересыщенный пар
} метастабильное состояние

CD - абсолютно неустойчивое состояние

$V_1$ - объем жидкости
$V_2$ - объем насыщенного пара

### Камера Вильсона

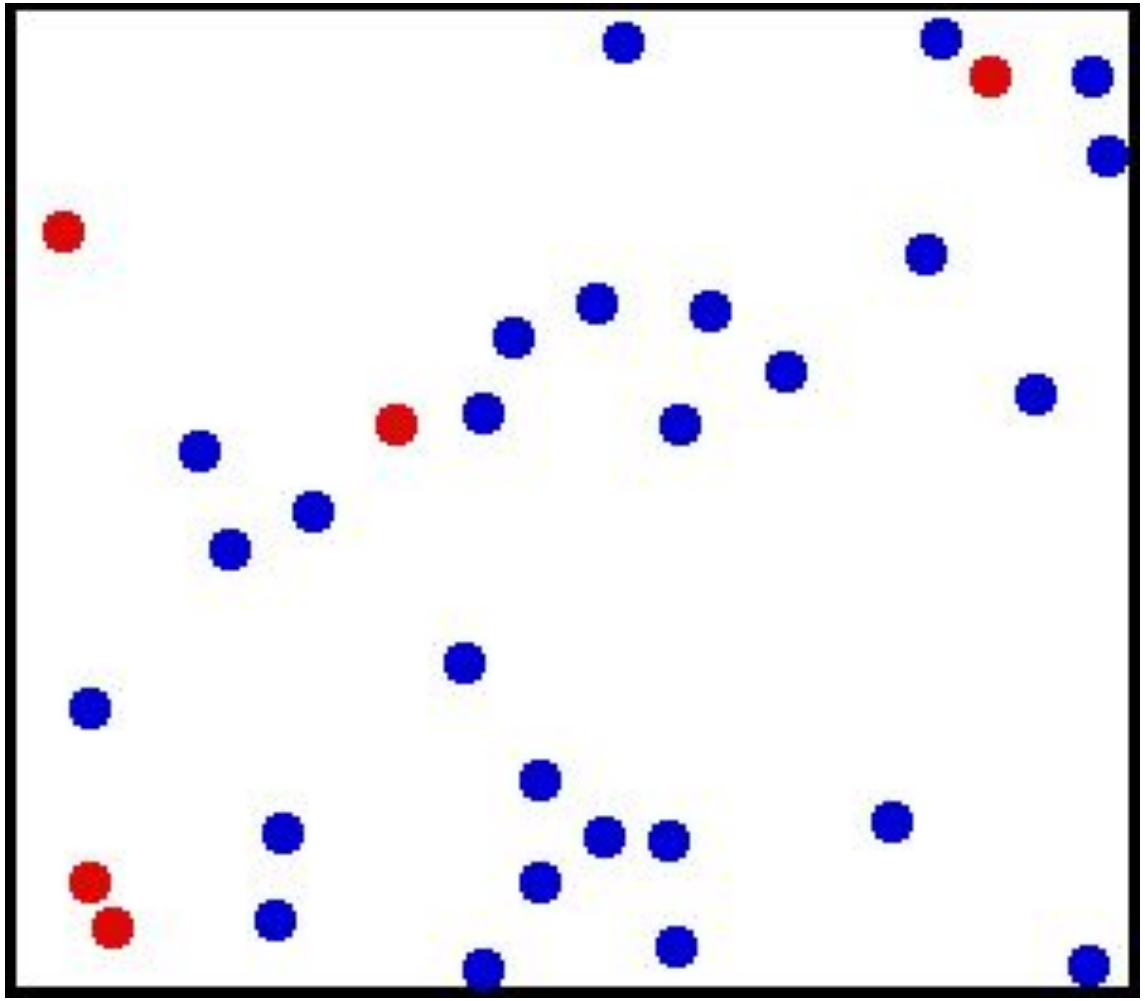
Действие камеры основано на конденсации пересыщенного пара на ионах с образованием капелек воды вдоль следа частицы - трека

### Пузырьковая камера

Для обнаружения треков используется перегретая жидкость

Треки заряженных частиц в пузырьковой камере

# §2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

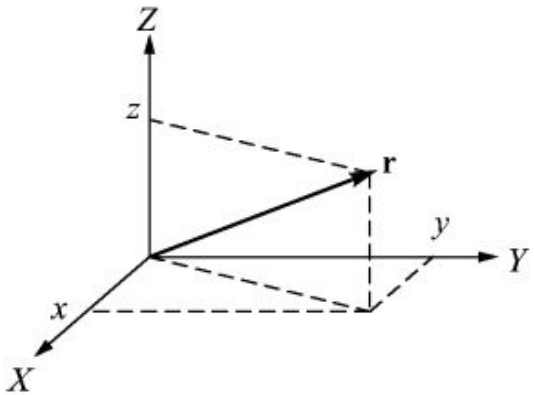


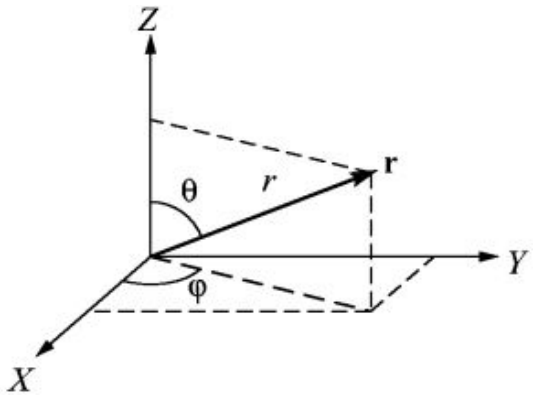
# 1.ЧИСЛО МОЛЕКУЛ, ДВИЖУЩИХСЯ В ЗАДАННОМ НАПРАВЛЕНИИ

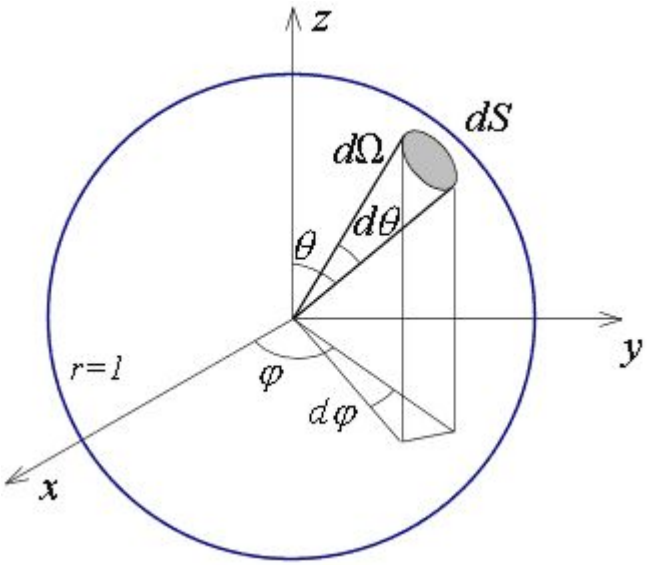
Хаотичность движения молекул приводит к тому, что распределение молекул по направлениям является равномерным. Тогда, количество молекул, движущихся в пределах бесконечно малого телесного угла

$$dN = \frac{N}{4\pi} d\Omega; \quad d\Omega = \frac{dS}{r^2}; \quad dS = r d\theta \cdot r \sin\theta d\varphi = r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \Rightarrow$$

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi \Rightarrow \; dN = \frac{N}{4\pi} \sin\theta d\theta d\varphi.$$



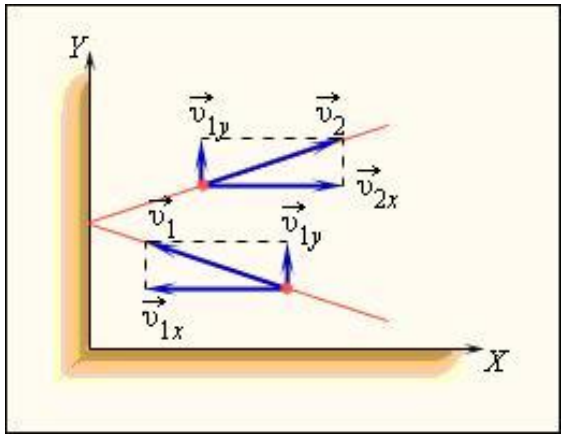
# 2. ЧИСЛО УДАРОВ МОЛЕКУЛ О СТЕНКУ (I)

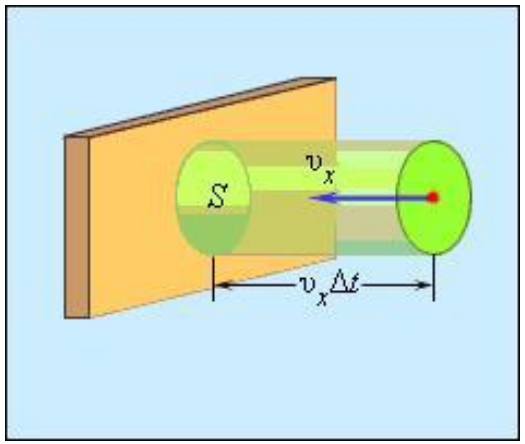
Выделим из N молекул, заключенных в сосуде, те $dN_V$ молекул, модуль скорости которых лежит в пределах от V до V+dV. Из числа этих молекул направления движения, заключенные внутри телесного угла $d\Omega$, будет иметь количество молекул

$$dN'_V(\theta,\varphi) = dN_V \frac{d\Omega(\theta,\varphi)}{4\pi}.$$

Из выделенных молекул долетят за время dt до площадки dS и ударятся о нее молекулы, заключенные в цилиндре с основанием dS и высотой $V\cos\theta dt$. Число этих молекул равно

$$dN(V,\theta,\varphi) = dN_V \frac{\sin\theta d\theta d\varphi}{4\pi} \frac{dSV\cos\theta dt}{V_0}.$$




$$0 \le V \le V_{\max};$$

$$0 \le \theta \le \pi/2;$$

$$0 \le \varphi \le 2\pi.$$

# 3. ЧИСЛО УДАРОВ МОЛЕКУЛ О СТЕНКУ (II)

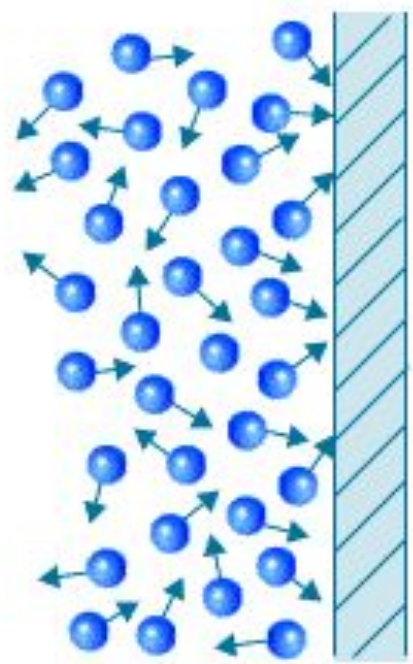
$$dN(V,\theta,\varphi) = dN_V \frac{\sin\theta d\theta d\varphi}{4\pi} \frac{dSV\cos\theta dt}{V_0} \Rightarrow$$

$$dN = \frac{dSdt}{4\pi V_0} \int_0^{V_{\max}} V dN_V \int_0^{\pi/2} \sin\theta\cos\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \Rightarrow$$

$$dN = \frac{dSdt}{4\pi} \frac{N}{V_0} \int_0^{V_{\max}} V \frac{dN_V}{N} \int_0^{\pi/2} \sin\theta d\left(\sin\theta\right) \cdot 2\pi \Rightarrow$$

$$\frac{dN}{dSdt} = \frac{1}{2}\frac{N}{V_0} \int_0^{V_{\max}} V dP_V \left(\frac{\sin^2\theta}{2}\right)_0^{\pi/2} = \frac{1}{4}\frac{N}{V_0} \int_0^{V_{\max}} V dP_V .$$

$$\frac{dN}{dSdt} \equiv \nu; \qquad \frac{N}{V_0} \equiv n; \qquad \int_0^{V_{\max}} V dP_{Vp} \equiv V \quad \Rightarrow$$

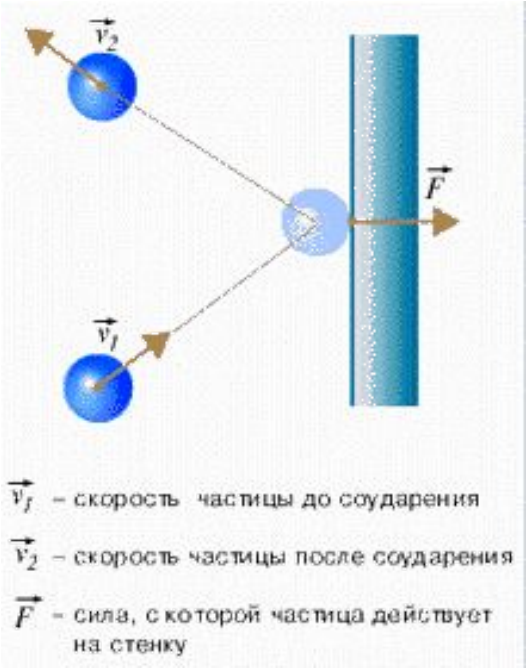


Как возникает давление газа на стенки сосуда?

$$\nu = \frac{1}{4} n V_{cp} .$$

# 4. ДАВЛЕНИЕ ГАЗА НА СТЕНКУ (I)

Стенки сосуда, в котором заключен газ, подвергаются непрерывной бомбардировке молекулами. Если предположить, что молекулы отскакивают от стенки по закону зеркального отражения и модуль скорости молекулы не изменяется, то импульс, сообщаемый стенке молекулой при ударе равен $2m_0V\cos\theta.$ Импульс, передаваемый поверхности dS за время dt, молекулами движущимися в пределах телесного угла $d\Omega(\theta,\varphi)=\sin\theta d\theta d\varphi$ со скоростью в интервале от V до V+dV, будет равен




$$dK(V,\theta,\varphi)=2m_0V\cos\theta dN_V\frac{\sin\theta d\theta d\varphi}{4\pi}\frac{V\cos\theta dtdS}{V_0}\Rightarrow$$

$$\frac{dK(V,\theta,\varphi)}{dtdS}=\frac{m_0V^2dN_V}{2\pi V_0}\cos^2\theta\sin\theta d\theta d\varphi;$$

$$0\le V\le V_m;\qquad 0\le\theta\le\pi/2;\qquad 0\le\varphi\le 2\pi.$$

# 5. ДАВЛЕНИЕ ГАЗА НА СТЕНКУ (II)

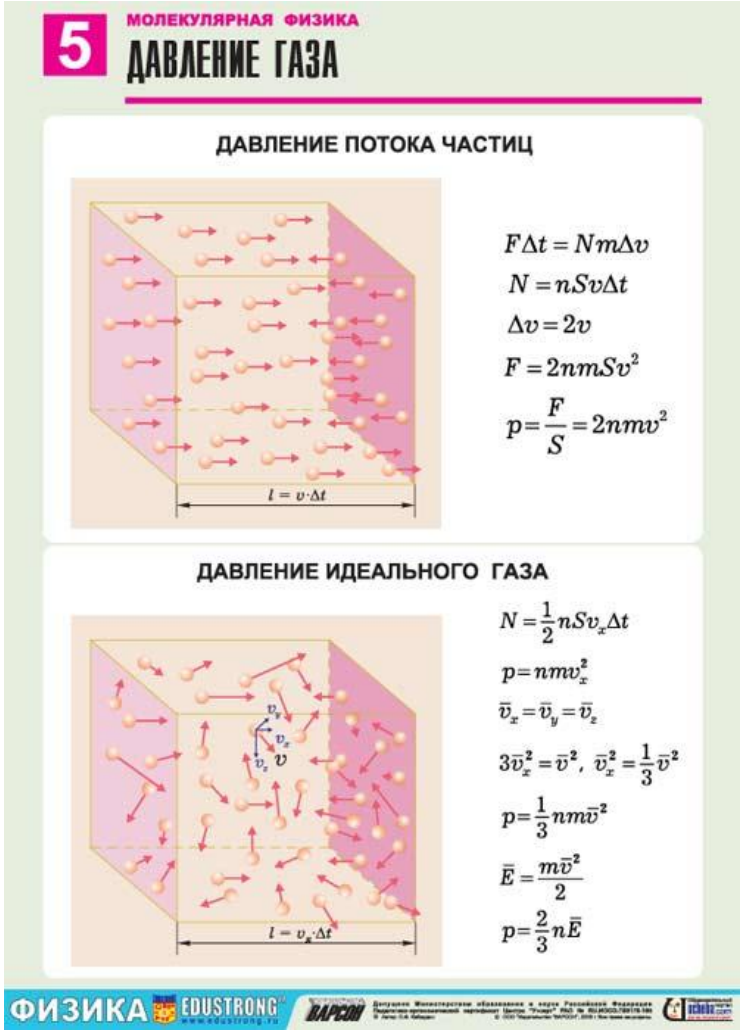
Проинтегрируем выражение для импульса по всем возможным скоростям и направлениям движения молекул:

$$\frac{dK}{dtdS}=\frac{m_0}{2\pi V_0}\int_0^{V_m}V^2dN_V\int_0^{\pi/2}\cos^2\theta\sin\theta d\theta\int_0^{2\pi}d\varphi\Rightarrow$$

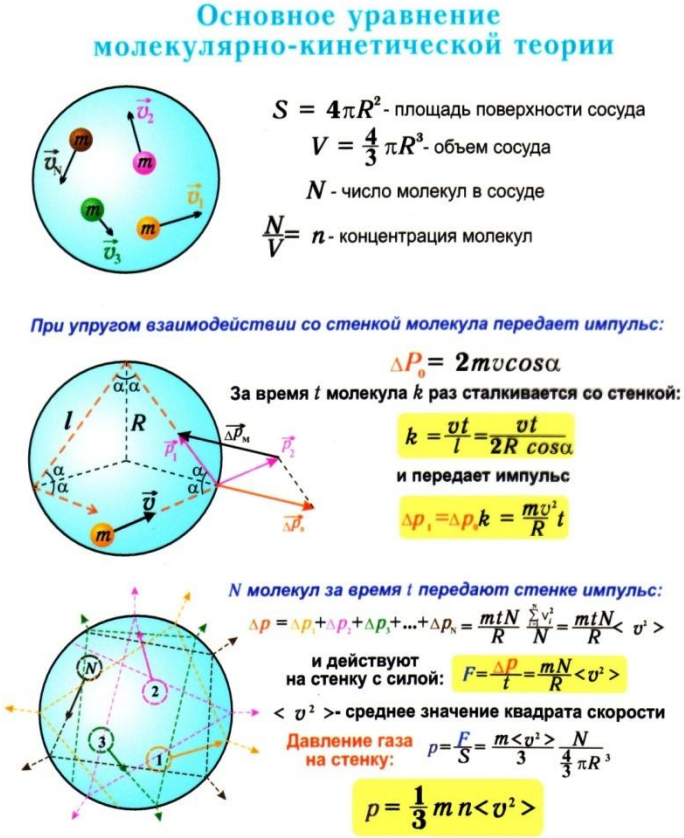
$$\frac{dF}{dS}=\frac{m_0}{2\pi}\frac{N}{V_0}\int_0^{V_m}V^2\frac{dN_V}{N}\int_0^{\pi/2}-\cos^2\theta d\left(\cos\theta\right)\cdot 2\pi\Rightarrow$$

$$p=m_0n\int_0^{V_m}V^2dP_V\left(-\frac{\cos^3\theta}{3}\right)_0^{\pi/2};$$

$$\int_0^{V_m}V^2dP_V\equiv\left(V^2\right)_{cp}\Rightarrow\quad p=\frac{1}{3}m_0n\left(V^2\right)_{cp}.$$



# 6. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МКТ




$$p = \frac{1}{3}m_0 n\left(V^2\right)_{cp}; \quad m_0 n = \rho \Rightarrow$$

$$p = \frac{1}{3}\rho\left(V^2\right)_{cp}.$$

$$p = \frac{1}{3}nm_0\left(V^2\right)_{cp} \Rightarrow p = \frac{2}{3}n\left(\frac{m_0 V^2}{2}\right)_{cp};$$

$$\left(\frac{m_0 V^2}{2}\right)_{cp} \equiv E_{ncp} \Rightarrow \quad p = \frac{2}{3}nE_{ncp}.$$

# 7. СРЕДНЯЯ ЭНЕРГИЯ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

$$pV = \frac{m}{M}RT; \qquad \frac{m}{M} = \nu \Rightarrow \qquad pV = \nu N_A kT;$$

$$\nu N_A = N \Rightarrow \qquad pV = NkT \Rightarrow \qquad p = \frac{N}{V}kT;$$

$$\frac{N}{V} = n \Rightarrow \qquad p = nkT.$$

$$p = \frac{2}{3}nE_{пср} \Rightarrow \qquad \frac{2}{3}nE_{пср} = nkT \Rightarrow \qquad E_{пср} = \frac{3}{2}kT.$$

Температура есть величина, пропорциональная средней кинетической энергии поступательного движения молекул. Отметим, что эта энергия не зависит от массы молекул.

# 8. СРЕДНЯЯ КВАДРАТИЧНАЯ СКОРОСТЬ

$$E_{пср} = \frac{3}{2}kT; \qquad k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\,\frac{Дж}{K}; \qquad E_{пср} = \frac{m_0}{2}\left(V^2\right)_{ср} \Rightarrow$$

$$\frac{m_0}{2}\left(V^2\right)_{ср} = \frac{3}{2}kT \Rightarrow \qquad \left(V^2\right)_{ср} = \frac{3kT}{m_0} = \frac{3kN_AT}{m_0N_A} = \frac{3RT}{M}.$$

$$\sqrt{\left(V^2\right)_{ср}} \equiv V_{кв} \Rightarrow \qquad V_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}.$$

# 9. ЗАКОН РАВНОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

$$E_{пср} = \frac{m_0}{2}\left(V^2\right)_{ср}; \quad V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 \Rightarrow \left(V^2\right)_{ср} = \left(V_x^2\right)_{ср} + \left(V_y^2\right)_{ср} + \left(V_z^2\right)_{ср};$$

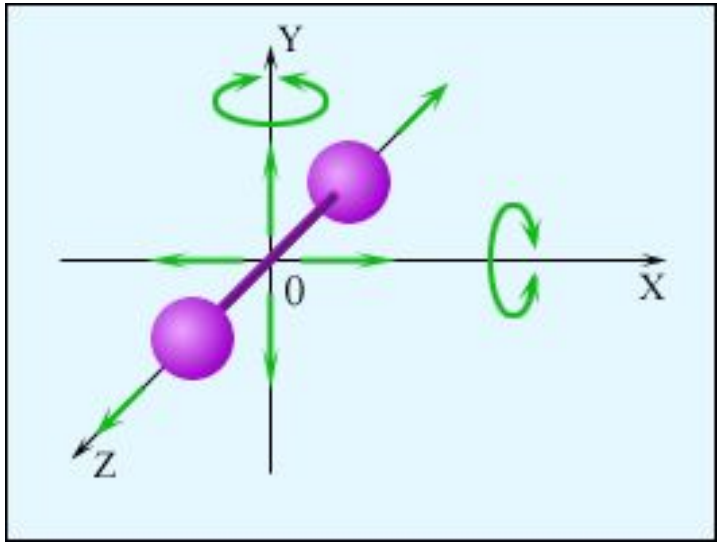
$$\left(V_x^2\right)_{ср} = \left(V_y^2\right)_{ср} = \left(V_z^2\right)_{ср} \Rightarrow \quad \left(V^2\right)_{ср} = 3\left(V_x^2\right)_{ср} \Rightarrow \quad E_{пср} = \frac{3}{2} m_0 \left(V_x^2\right)_{ср}.$$

$$E_{пср} = \frac{3}{2}kT \Rightarrow \qquad \frac{3}{2}kT = 3\frac{m_0\left(V_x^2\right)_{ср}}{2} \Rightarrow \qquad \frac{m_0\left(V_x^2\right)_{ср}}{2} = \frac{kT}{2}.$$

В классической статистической физике вводится закон равнораспределения энергии по степеням свободы, согласно которому в состоянии термодинамического равновесия на каждую степень свободы молекулы приходится в среднем энергия, равная kT/2.

# 10. ЧИСЛО СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ

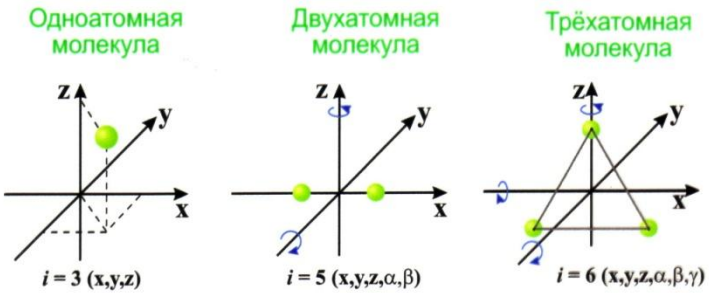
$$E_{ср} = \frac{i}{2}kT.$$




$$E_{п} = \frac{3}{2}kT; \qquad E_{вр} = \frac{2}{2}kT;$$

## Число степеней свободы молекулы

Число степеней свободы молекулы *i* - число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве




x, y, z - координаты центра масс молекулы,

α,β,γ - углы поворота молекулы относительно трех взаимно-перпендикулярных осей

$$i = i_{пост} + i_{вр} + 2i_{колеб}$$

| МОЛЕКУЛА | Характер связи между атомами | Число степеней свободы | | | $i$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | | поступательное движение | вращательное движение | колебательное движение | |
| Одноатомная | | 3 | | | 3 |
| Двухатомная | *жесткая* | 3 | 2 | | 5 |
| Двухатомная | *упругая* | 3 | 2 | 1 | 7 |
| С числом атомов три и выше | *жесткая* | 3 | 3 | | 6 |

# 11. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

ФИЗИКА 75

## Внутренняя энергия идеального одноатомного газа

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА $U$

суммарная кинетическая энергия теплового движения молекул

$U = N\langle\varepsilon\rangle$,

$N = \nu N_A$ - число молекул

$\langle\varepsilon\rangle = \frac{3}{2}kT$ - средняя кинетическая энергия одной молекулы

$E_п = mgh$ $h$ $E_к = \frac{mv^2}{2}$

Потенциальная энергия газа во внешних полях

Кинетическая энергия движения газа как целого

Не входят в состав внутренней энергии

$U = \frac{3}{2}\nu RT$

$\Delta U = \frac{3}{2}\nu R\Delta T$

**ЗАДАНИЕ:**

Сравните приращение внутренней энергии при переходах 1→3 и 1→2→3

$\Delta U_{13} = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R(T_3 - T_1)$

$\Delta U_{123} = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R(T_3 - T_1)$

$\rightarrow \Delta U_{13} = \Delta U_{123}$

**ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ - функция состояния системы, ее приращение не зависит от вида процесса, происходящего в системе**

Для газов с более сложными молекулами

$\langle\varepsilon\rangle = \frac{i}{2}kT$ $U = \frac{i}{2}\nu RT$ $i$-число степеней свободы

РНПО Росучприбор Южно-Уральский государственный университет

# 12. МОЛЯРНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА



МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

## Молярная теплоемкость

Молярная теплоемкость $C$ есть величина, равна количеству тепла, необходимого для нагревания одного моля на 1 Кельвин

$$C = \frac{\delta Q}{\nu dT}$$

Молярная теплоемкость зависит от строения молекулы и вида процесса

Первое начало термодинамики для одного моля:

$$CdT = dU + PdV$$

При постоянном объеме

$$PdV = 0 \rightarrow C_V = \frac{dU}{dT}$$

При постоянном давлении

$$PdV = RdT \rightarrow C_P = \frac{dU}{dT} + R$$

$$C_P = C_V + R$$

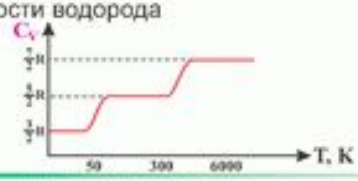
формула Майера

Для одного моля идеального газа, согласно закону равнораспределения энергии по степеням свободы:

$$U = N_A\left(\frac{i}{2}kT\right) = \frac{i}{2}RT \rightarrow C_V = \frac{i}{2}R, \quad C_P = \frac{i+2}{R}$$

**Задание**

Объясните температурную зависимость молярной теплоемкости водорода




РНПО Росучприбор Южно-Уральский государственный университет