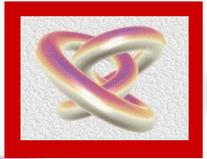
The background of the slide is white and filled with numerous spheres of varying sizes. Some spheres are a deep purple color, while others are white with a textured, crater-like surface, resembling small planets or moons. The spheres are scattered across the entire page, creating a dynamic and scientific atmosphere.

Лекция

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Составители: д.т.н., профессор Симдянкин А.А., к.п.н., доцент Симдянкина Е.Е.



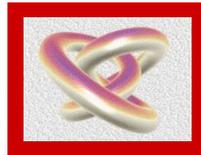
Основы МКТ

Левкип и *Демокрит* – 400 лет до н.э.

М.В. Ломоносов – XVIII век.

«О причине теплоты и холода» и

«О коловратном движении корпускул»



ОСНОВЫ МКТ

● Молекулярно-кинетической теорией

называют учение о строении и

свойствах вещества на основе

представления о существовании

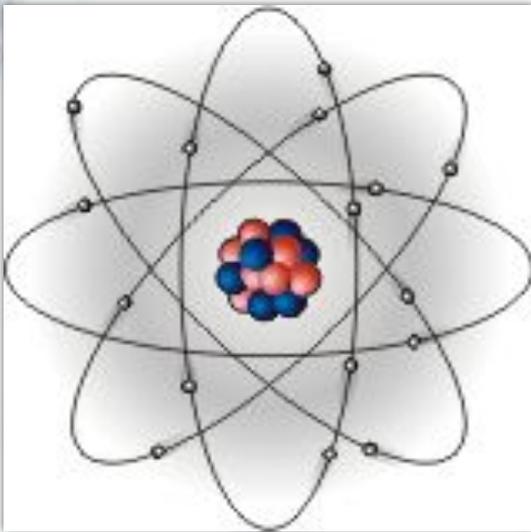
атомов и молекул как наименьших

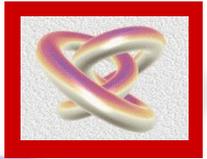
частиц химического вещества.



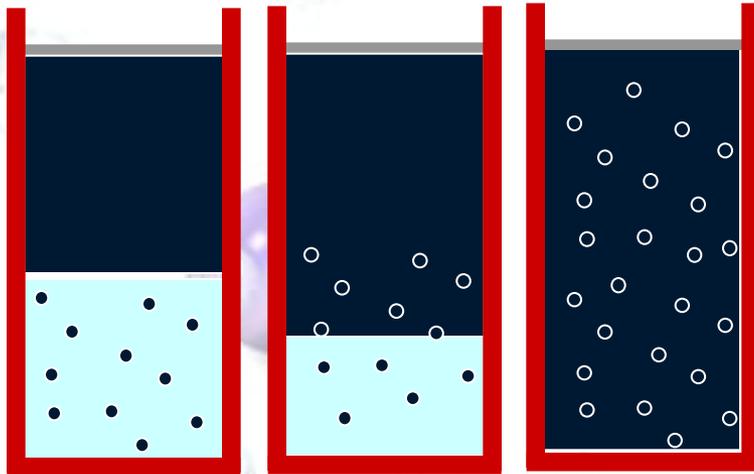
Основные положения МКТ

- 1. Все вещества – жидкие, твердые и газообразные – образованы из мельчайших частиц – молекул (атомов), которые сами состоят из более мелких элементарных частиц (электронов, протонов, нейтронов).**

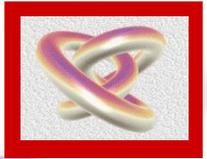




Основные положения МКТ

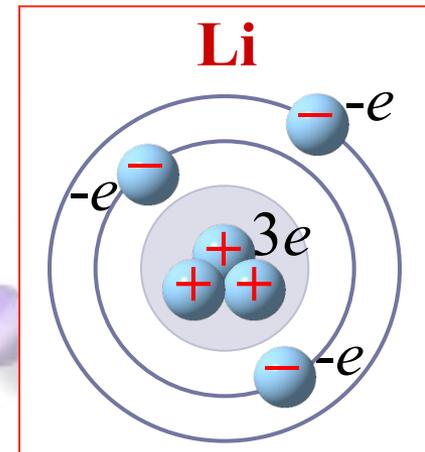
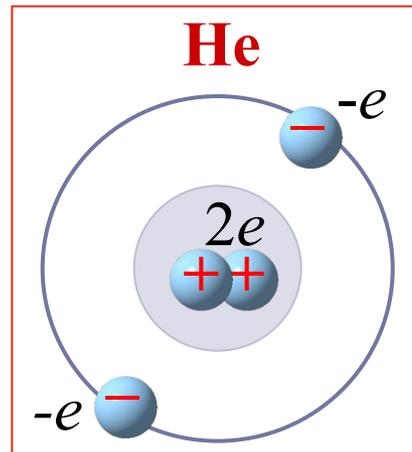
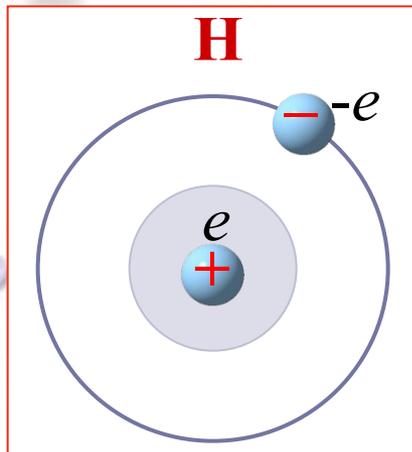


2. Атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении.

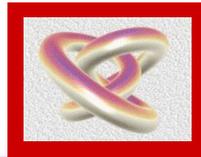


Основные положения МКТ

3. Частицы взаимодействуют друг с другом силами, имеющими электрическую природу.



Гравитационное взаимодействие между частицами пренебрежимо мало.



Опытные обоснования МКТ

Существование молекул

1. Закон кратных отношений:

при образовании из двух элементов различных веществ массы одного из элементов в разных соединениях находятся в кратных отношениях





Опытные обоснования МКТ

Существование молекул

7 г азота, соединяясь с **4 г** кислорода, образуют
11 г закиси азота N_2O ,

8 г » » » 15 г окиси азота NO ,

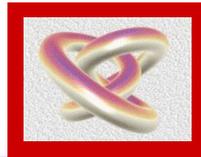
12 г » » » 19 г азотистого ангидрида N_2O_3 ,

16 г » » » 23 г двуокиси азота NO_2 ,

20 г » » » 27 г азотного ангидрида N_2O_5 .

Массы кислорода, приходящиеся на одну и ту же
массу азота (7 г), в этих соединениях относятся как

$$4 : 8 : 12 : 16 : 20 = 1 : 2 : 3 : 4 : 5.$$

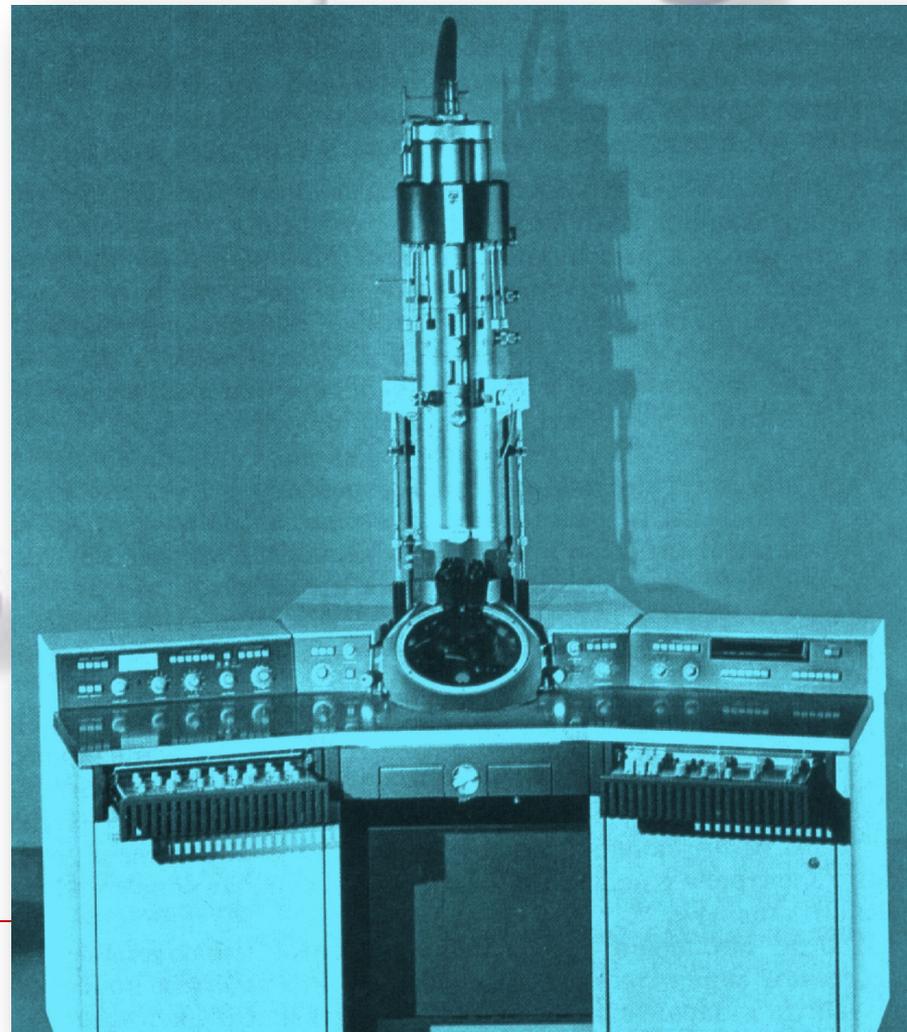


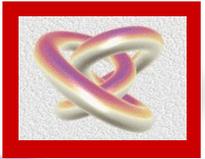
Опытные обоснования МКТ

Существование молекул

**2. Молекулы
наблюдаются с
помощью ионного
проектора,
электронного
микроскопа**

Современный электронный
микроскоп

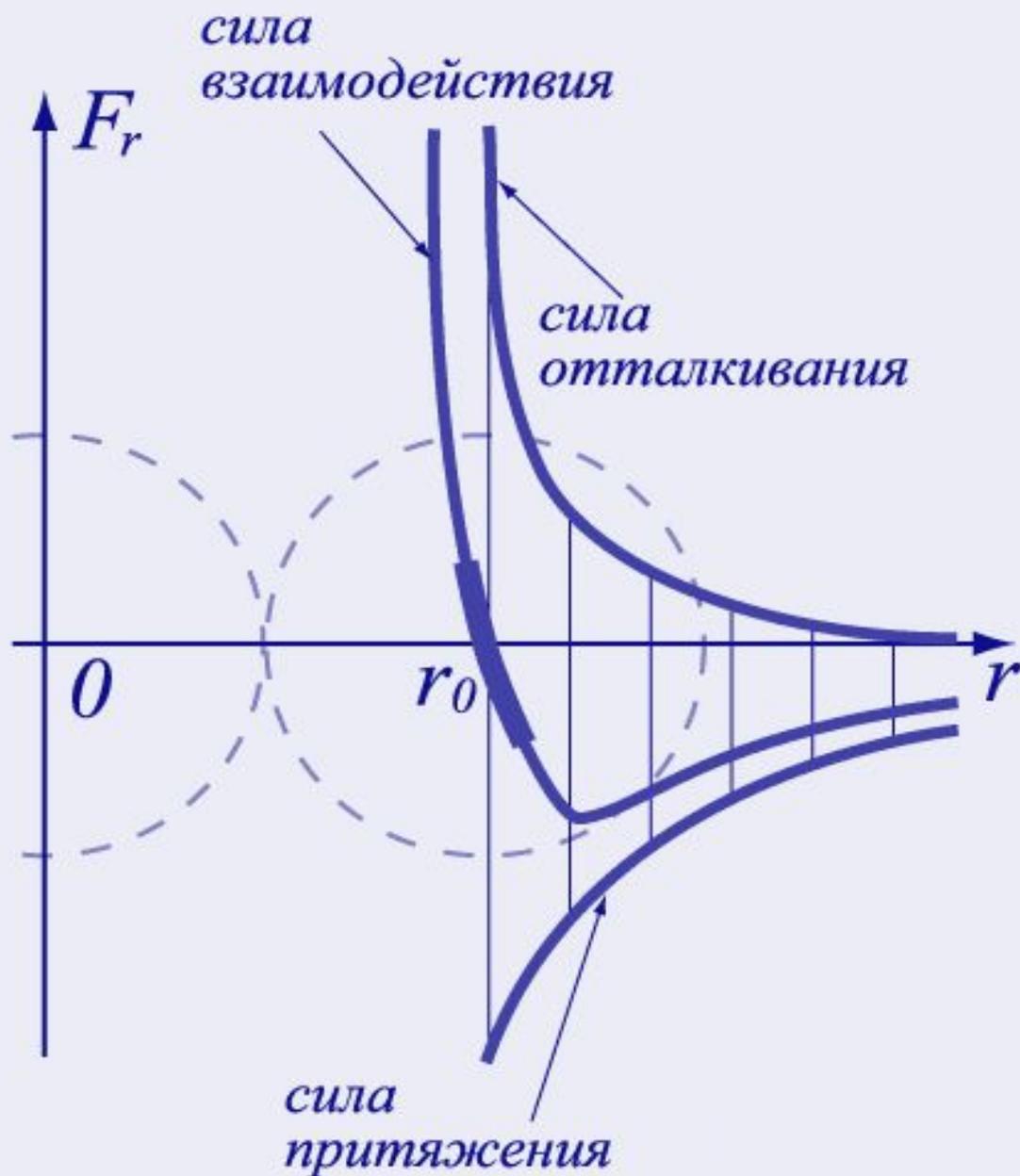
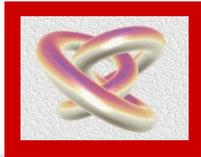




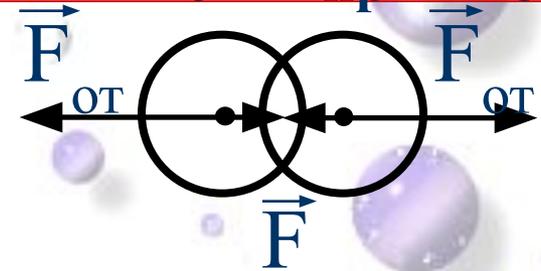
Опытные обоснования МКТ

Взаимодействие молекул

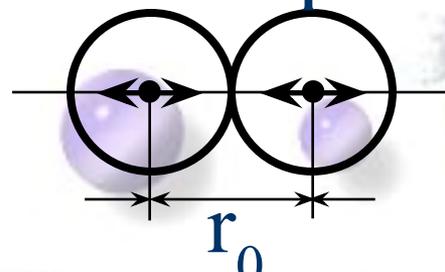
- Силы притяжения и отталкивания действуют одновременно.
 - Силы электромагнитной природы.
-



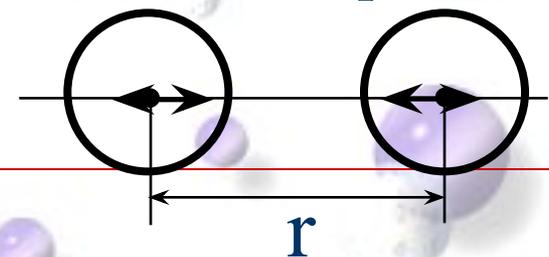
$r < r_0 \quad F_{\text{пр}} < F_{\text{от}}$

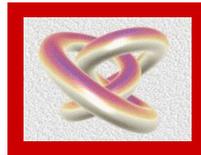


$r = r_0 \quad F_{\text{пр}} = F_{\text{от}}$



$r > r_0 \quad F_{\text{пр}} > F_{\text{от}}$

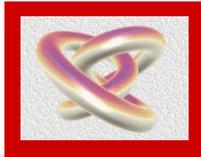




Опытные обоснования МКТ

Хаотическое движение молекул

Наиболее ярким экспериментальным подтверждением представлений молекулярно-кинетической теории о беспорядочном движении атомов и молекул является *броуновское движение*.

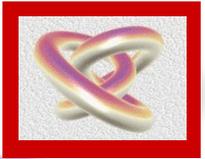


Опытные обоснования МКТ

Хаотическое движение молекул



Фотография броуновского движения



Опытные обоснования МКТ

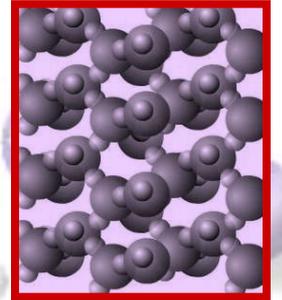
Хаотическое движение молекул

- 1. Броуновское движение.**
 - 2. Диффузия.**
 - 3. Давление газа на стенки сосуда.**
 - 4. Стремление газа занять любой объем.**
-

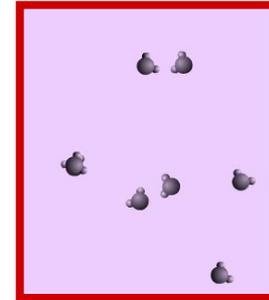


ОСНОВЫ МКТ

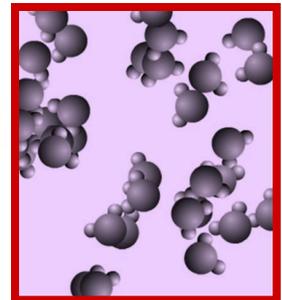
Беспорядочное хаотическое движение молекул называется *тепловым движением*.



Кинетическая энергия теплового движения растет с возрастанием *температуры*.



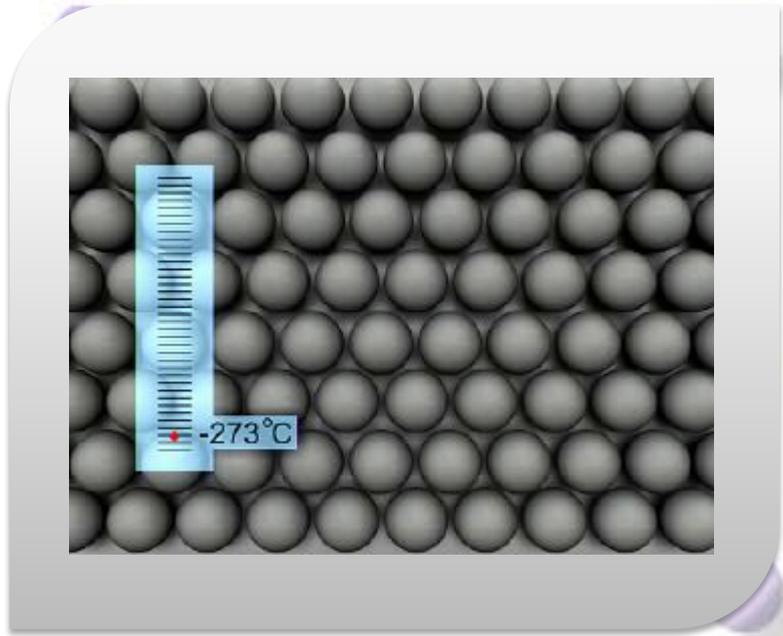
Внутренняя энергия — это сумма энергий молекулярных взаимодействий и энергии теплового движения молекул.

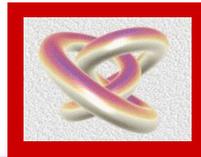


Понятие энергии относится всегда к системе тел.

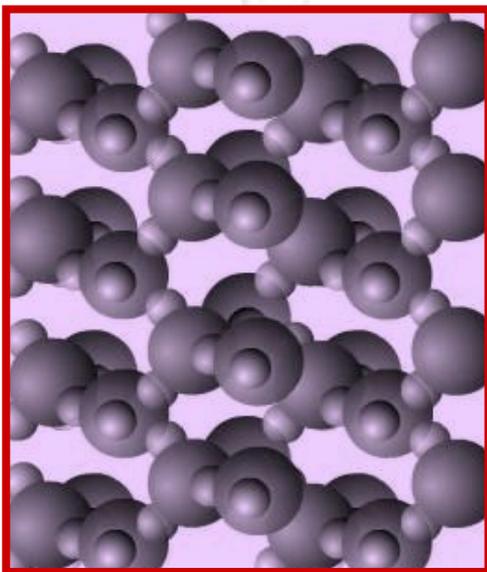


ОСНОВЫ МКТ

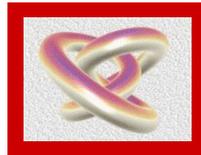




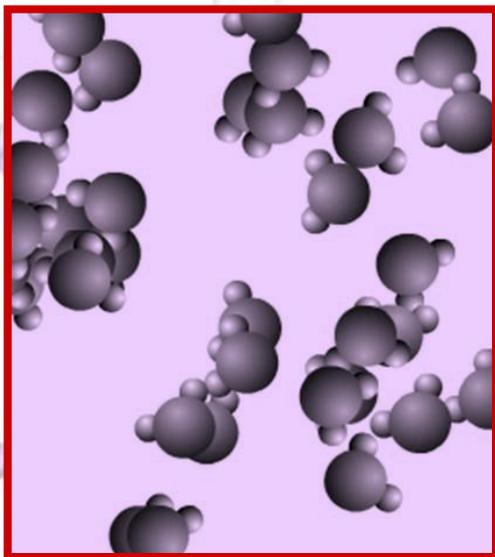
ОСНОВЫ МКТ



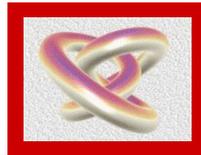
В *твердых телах* молекулы совершают беспорядочные колебания около фиксированных центров (положений равновесия). Эти центры могут быть расположены в пространстве нерегулярным образом (**аморфные тела**) или образовывать упорядоченные объемные структуры (**кристаллические тела**).



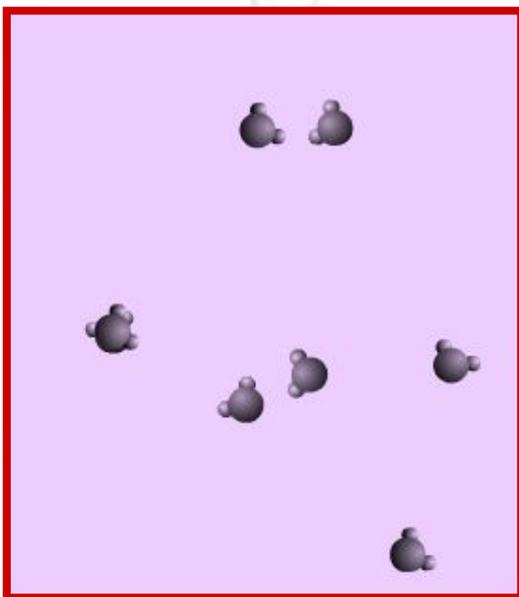
ОСНОВЫ МКТ



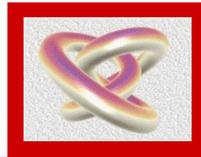
В *жидкостях* молекулы имеют значительно большую свободу для теплового движения. Они не привязаны к определенным центрам и могут перемещаться по всему объему жидкости. Этим объясняется текучесть жидкостей.



Основы МКТ



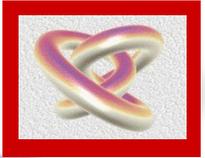
В *газах* расстояния между молекулами обычно значительно больше их размеров. Силы взаимодействия между молекулами на таких больших расстояниях малы, и каждая молекула движется вдоль прямой линии до очередного столкновения с другой молекулой или со стенкой сосуда.



Идеальный газ

Простейшей моделью молекулярно-кинетической теории является модель *идеального газа*.

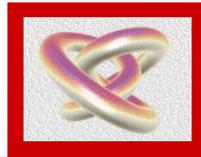
В кинетической модели идеального газа молекулы рассматриваются как идеально упругие шарики, взаимодействующие между собой и со стенками только во время упругих столкновений.



Идеальный газ

Суммарный объем всех молекул предполагается малым по сравнению с объемом сосуда, в котором находится газ.

Модель *идеального газа* достаточно хорошо описывает поведение реальных газов в широком диапазоне давлений и температур.



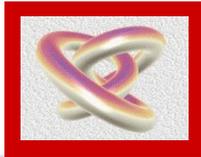
Температура

Температурная шкала Кельвина называется *абсолютной (термодинамической) шкалой температур*.

$$T = t + 273,15$$

В СИ единицей измерения температуры является **кельвин - К**.

Комнатная температура $T_C = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ по шкале Кельвина равна $T_K = 293,15 \text{ К}$.



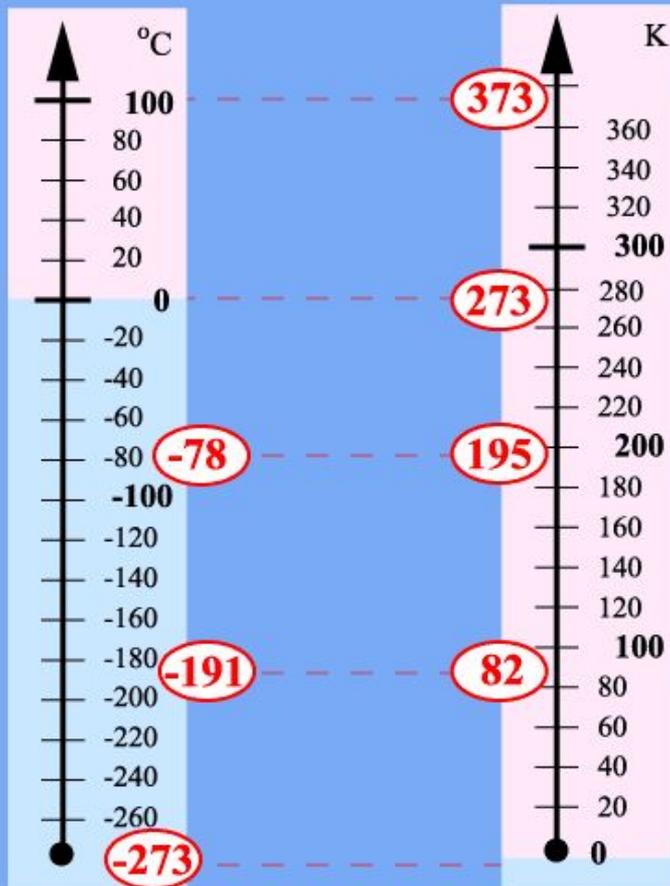
Температура

Шкала Цельсия

Термодинамическая
шкала

$$t = T - 273$$

$$T = t + 273$$



кипение воды



плавление льда



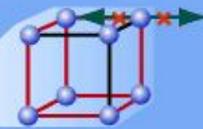
сухой лед (CO_2)

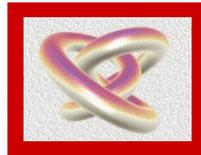


жидкий воздух



абсолютный ноль





Температура

Понятие *температуры* тесно связано с понятием теплового равновесия.

Тепловое равновесие – это такое состояние системы тел, находящихся в тепловом контакте, при котором не происходит теплопередачи от одного тела к другому, и все макроскопические параметры тел остаются неизменными. Температура – это физический параметр, одинаковый для всех тел, находящихся в тепловом равновесии.



ОСНОВЫ МКТ

Макроскопические параметры:

- ◆ **давление,**
- ◆ **объем,**
- ◆ **температура.**

p V T

?

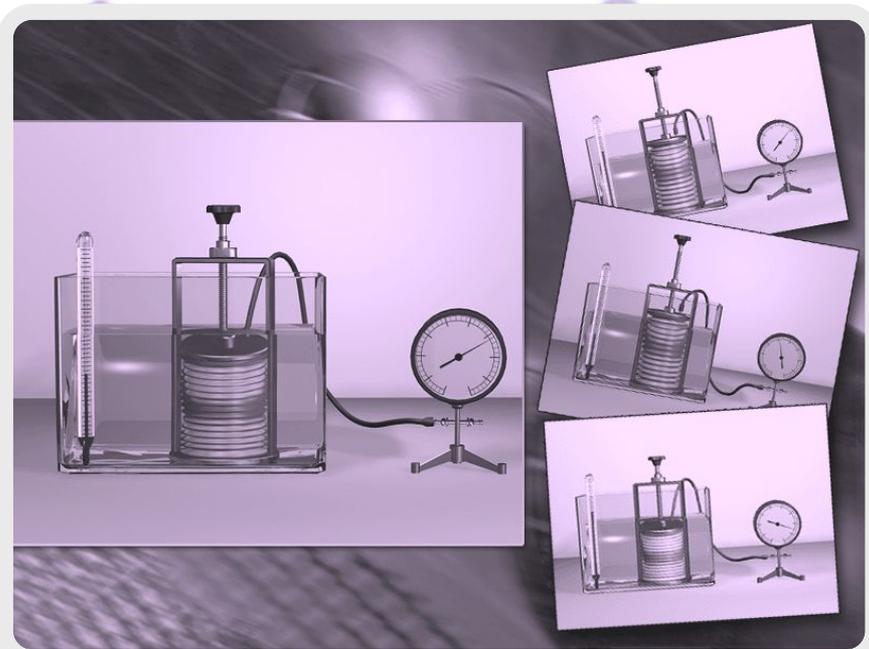
The background of the slide is filled with numerous spheres of varying sizes and colors. The colors are primarily purple and light blue. Some spheres are solid, while others have a textured, cratered surface, resembling planets or moons. The spheres are scattered across the white background, creating a sense of depth and movement.

ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

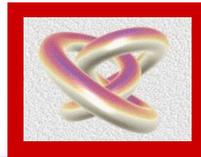


ИЗОПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ

(ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ)



Процессы,
протекающие при
неизменном значении
одного из параметров
(p , V , T) для данной
массы газа, называют
изопроцессами.



Изотермический процесс (закон Бойля-Мариотта)

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

1662 г.

Бойль (англ.)

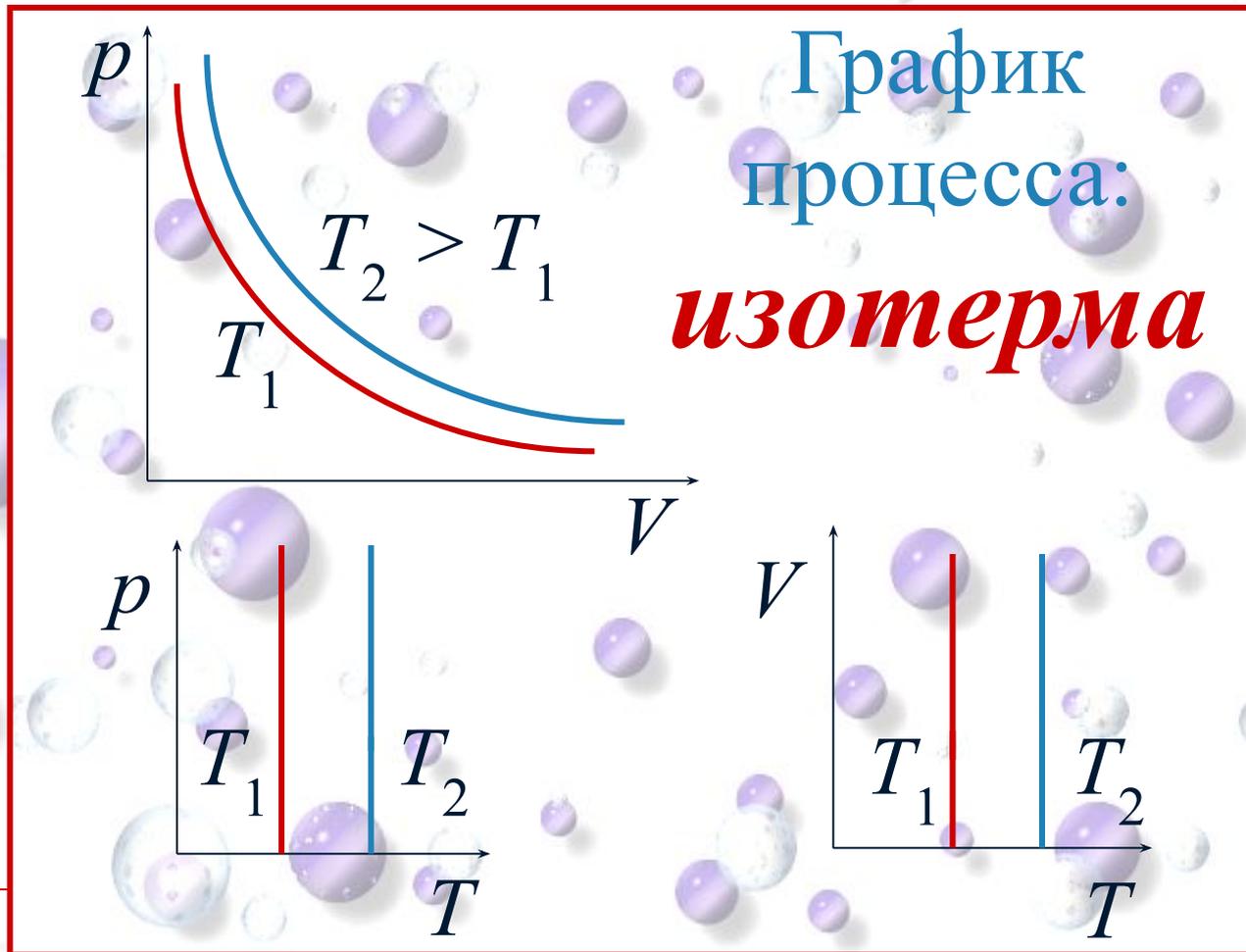
1676 г. Мариотт(фр.)

При $T = \text{const}; m = \text{const}$

$$pV = \text{const} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$



Изотермический процесс (закон Бойля-Мариотта)



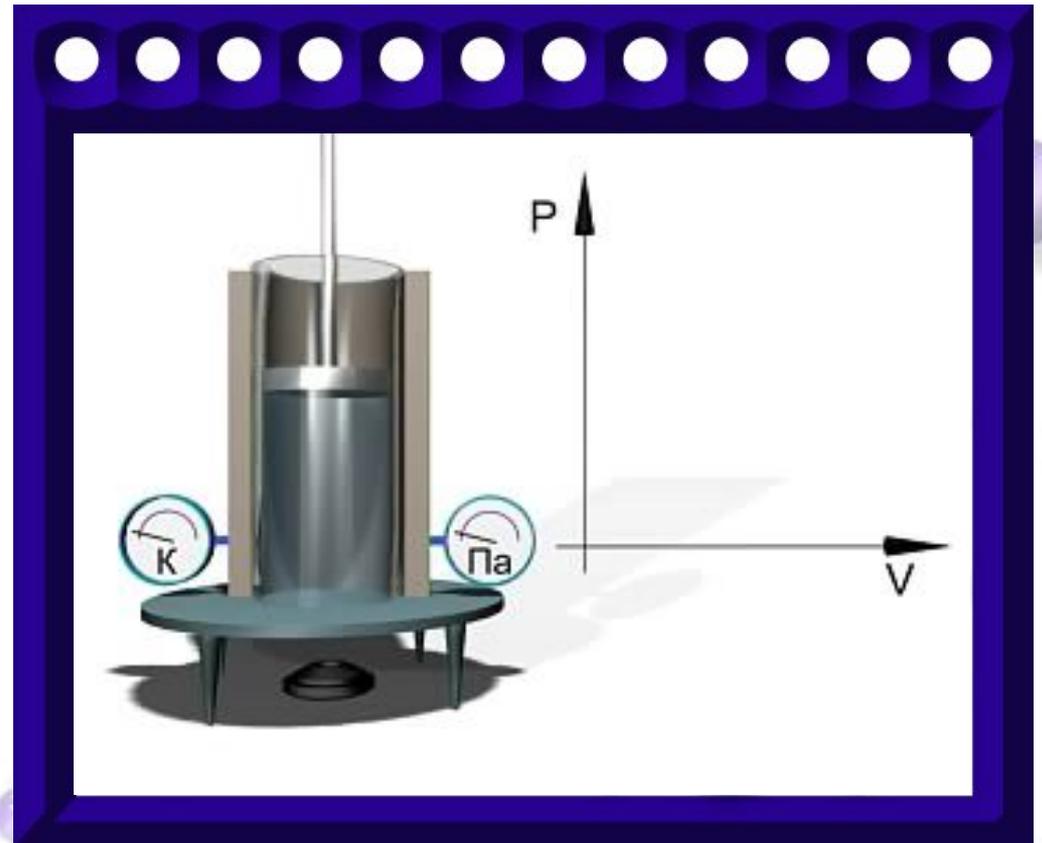


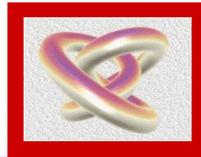
Прикольный процесс (закон Бойля-Мариотта)

При $T = \text{const};$
 $m = \text{const}$

$$pV = \text{const}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$





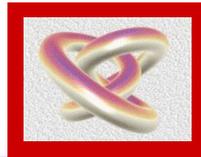
Изобарный процесс (закон Гей-Люссака)

Объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой:

При $p = \text{const}; m = \text{const}$

$$V = V_0 (1 + \alpha t)$$

Изобарным процессом называют процесс, протекающий при неизменном давлении p .



Изобарный процесс
(закон Гей-Люссака)

$$V = V_0 (1 + \alpha t)$$

где V_0 – объем газа при температуре $0\text{ }^\circ\text{C}$.

Коэффициент α равен $(1/273,15)\text{ K}^{-1}$.

Его называют *температурным коэффициентом объемного расширения газов*.

В термодинамической
форме:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$



Изобарный процесс (закон Гей-Люссака)

**Условие
процесса**

$$p = \text{const}$$

$$m = \text{const}$$

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

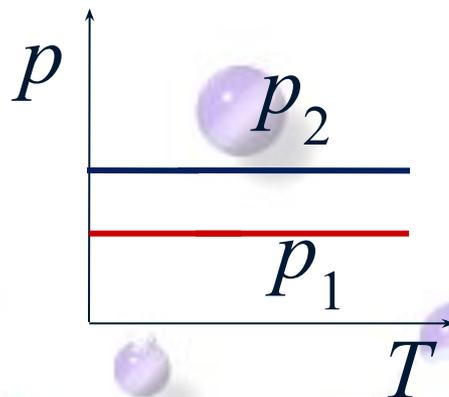
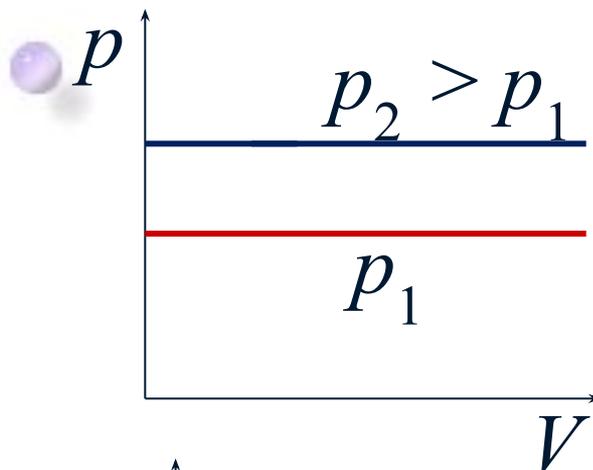
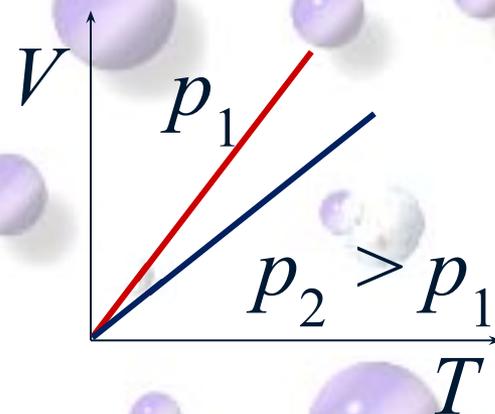
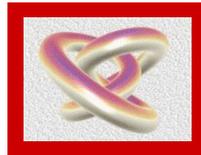


График
процесса:
изобара





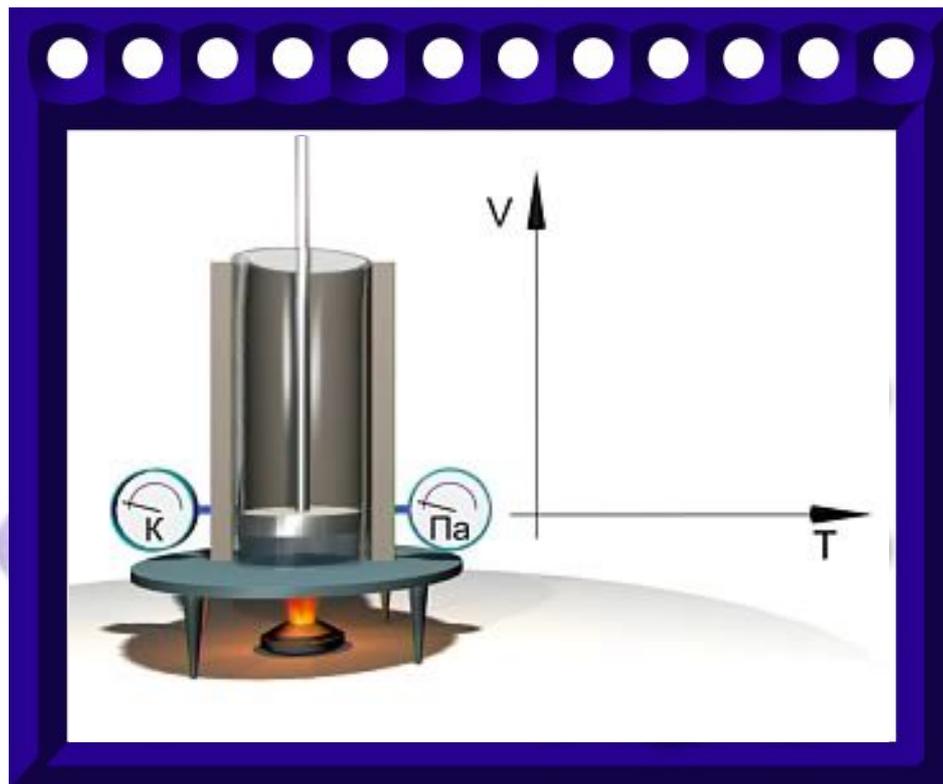
Изобарный процесс (закон Гей-Люссака)

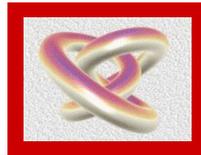
Условие
процесса

$$p = \text{const}$$

$$m = \text{const}$$

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





Изохорный процесс (закон Гей-Люссака – Шарля)

Давление газа p изменяется прямо пропорционально его абсолютной температуре:

При $V = \text{const}; m = \text{const}$

$$p = p_0 (1 + \alpha t)$$

Изохорный процесс – это процесс протекающий при постоянном объеме V .



Изохорный процесс
(закон Гей-Люссака – Шарля)

$$p = p_0 (1 + \alpha t)$$

где p_0 – давление газа при температуре 0°C .
Коэффициент α равен $(1/273,15) \text{ K}^{-1}$.

Его называют *температурным коэффициентом давления*.

В термодинамической
форме:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$



Изохорный процесс (закон Гей-Люссака – Шарля)

Условие
процесса

$$V = \text{const}$$

$$m = \text{const}$$

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

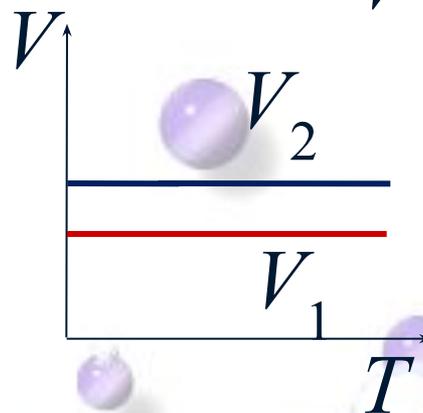
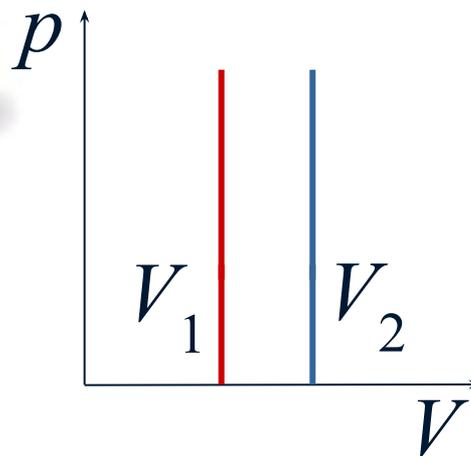
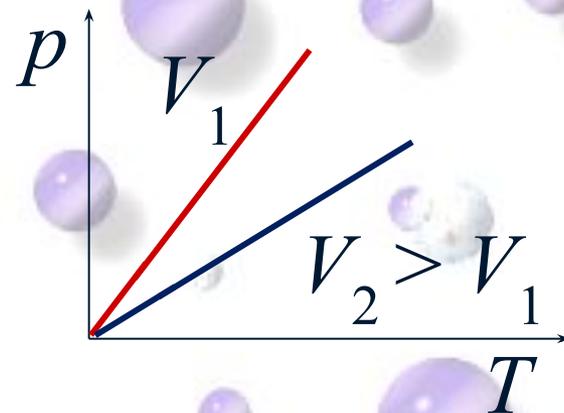
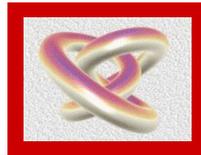


График
процесса:
изохора





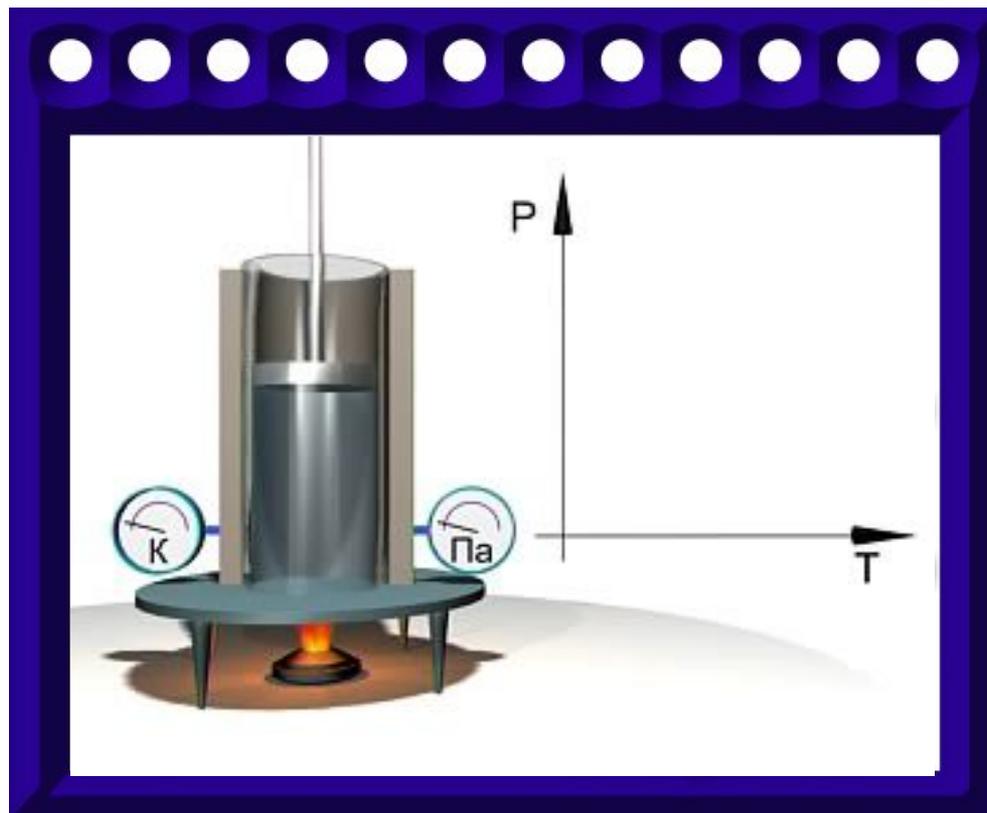
Изохорный процесс (закон Гей-Люссака – Шарля)

Условие
процесса

$$V = \text{const}$$

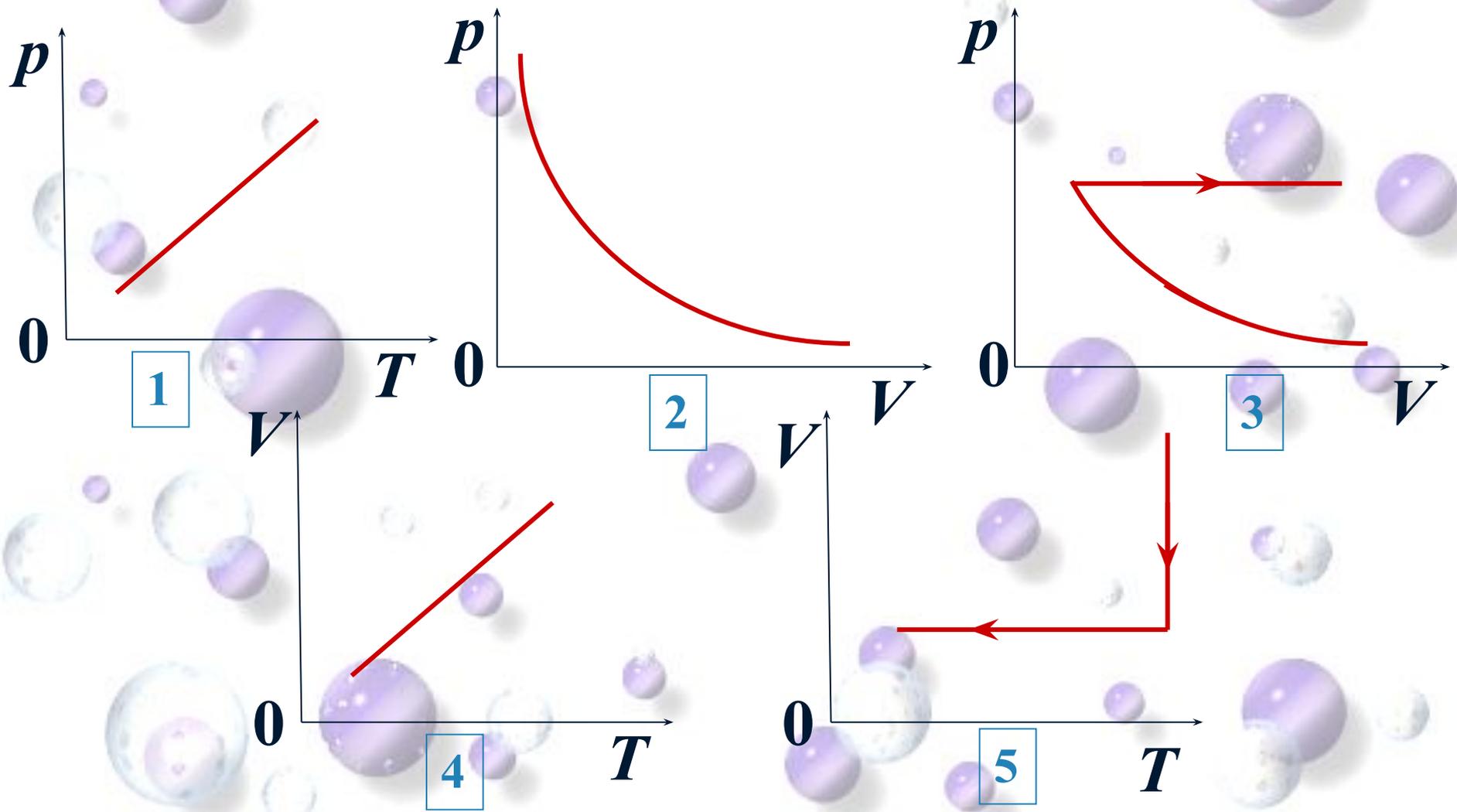
$$m = \text{const}$$

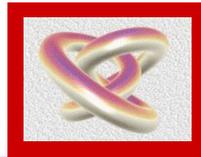
$$\frac{p}{T} = \text{const}$$



Задание

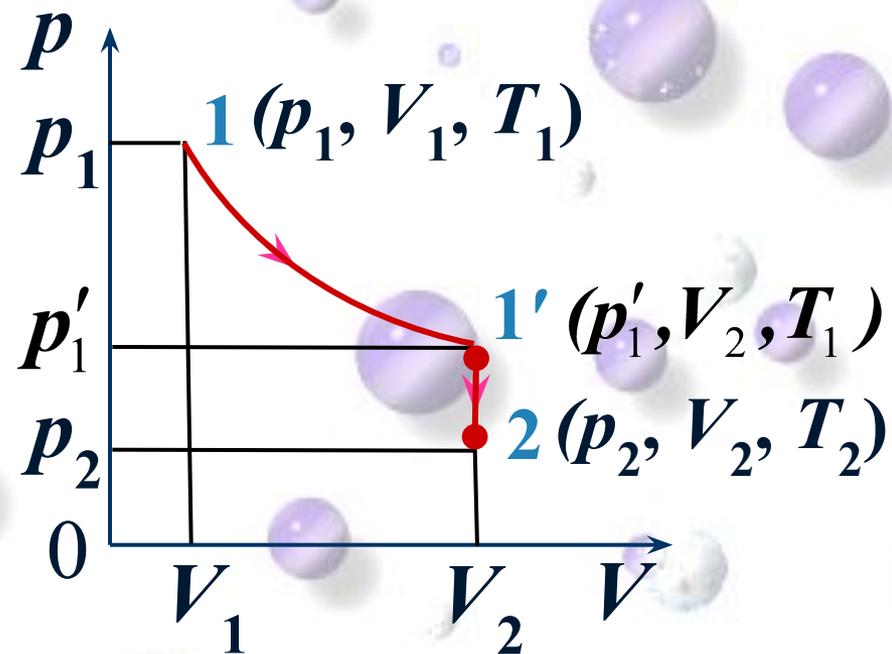
Назовите процессы, изображенные на рисунках 1 – 5.

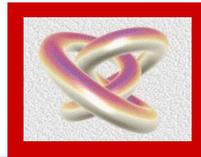




Уравнение Клапейрона

*Клапейрон (фр.)
вывел уравнение
состояния
идеального газа,
объединив законы
Бойля-Мариотта и
закон Гей-Люссака –
Шарля.*



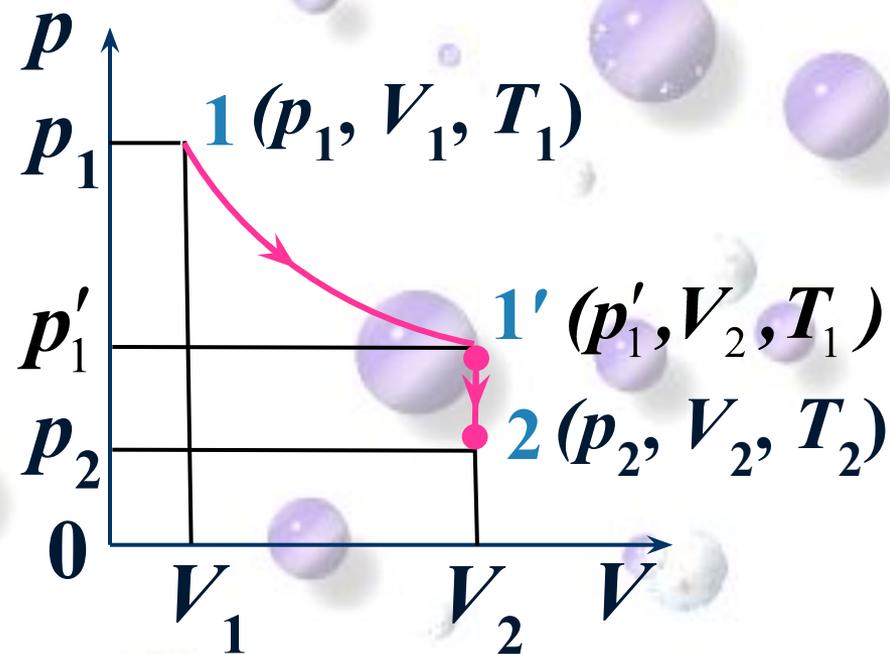


Уравнение Клапейрона

Из рис. видим:

$$p_1 V_1 = p'_1 V_2$$

$$\frac{p'_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$



Исключим p'_1 .



Уравнение Клапейрона

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

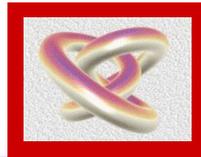
уравнение Клапейрона



Уравнение Клапейрона

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad (1)$$

p – давление идеального газа
 V – объем идеального газа
 T – абсолютная температура
идеального газа



Уравнение Менделеева-Клапейрона

Менделеев объединил уравнение Клапейрона с законом Авогадро.

Согласно закону Авогадро:

Один моль любого газа при нормальных условиях ($T = 273$ К и $p = 1,013 \cdot 10^5$ Па) занимает один и тот же объем (молярный)

V_m , равный:

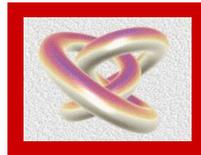
$$V_m = 0,0224 \text{ м}^3/\text{моль} = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}.$$

Подставим эти данные в (1):



Уравнение Менделеева-Клапейрона

$$const = R = \frac{pV_m}{T} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$



Уравнение Менделеева-Клапейрона

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

R – универсальная газовая постоянная
(молярная газовая постоянная)



Уравнение Менделеева-Клапейрона

Тогда для 1 моль газа уравнение (1) можно записать в виде:

$$pV_m = RT \quad (2)$$

m

Уравнение Менделеева-Клапейрона для 1 моль газа



Уравнение Менделеева-Клапейрона

Тогда для любой массы газа m :

$$pV = \frac{m}{M} RT = \nu RT$$

Учтено, что:

$$V = \frac{m}{M} V_m$$

ν – (количество вещества) число молей газа.



Уравнение Менделеева-Клапейрона

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

p – давление идеального газа

V – объем идеального газа

m – масса газа

M – молярная масса газа

R – универсальная газовая постоянная

T – абсолютная температура

идеального газа



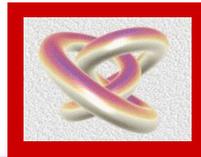
Основы МКТ

Задача молекулярно-кинетической теории состоит в том, чтобы установить связь между ***микроскопическими*** (масса, скорость, кинетическая энергия молекул) и ***макроскопическими параметрами*** (давление, объем, температура).

m v E_k

?

p V T



Газ, состоящий из отдельных атомов, а не молекул, называют одноатомным.

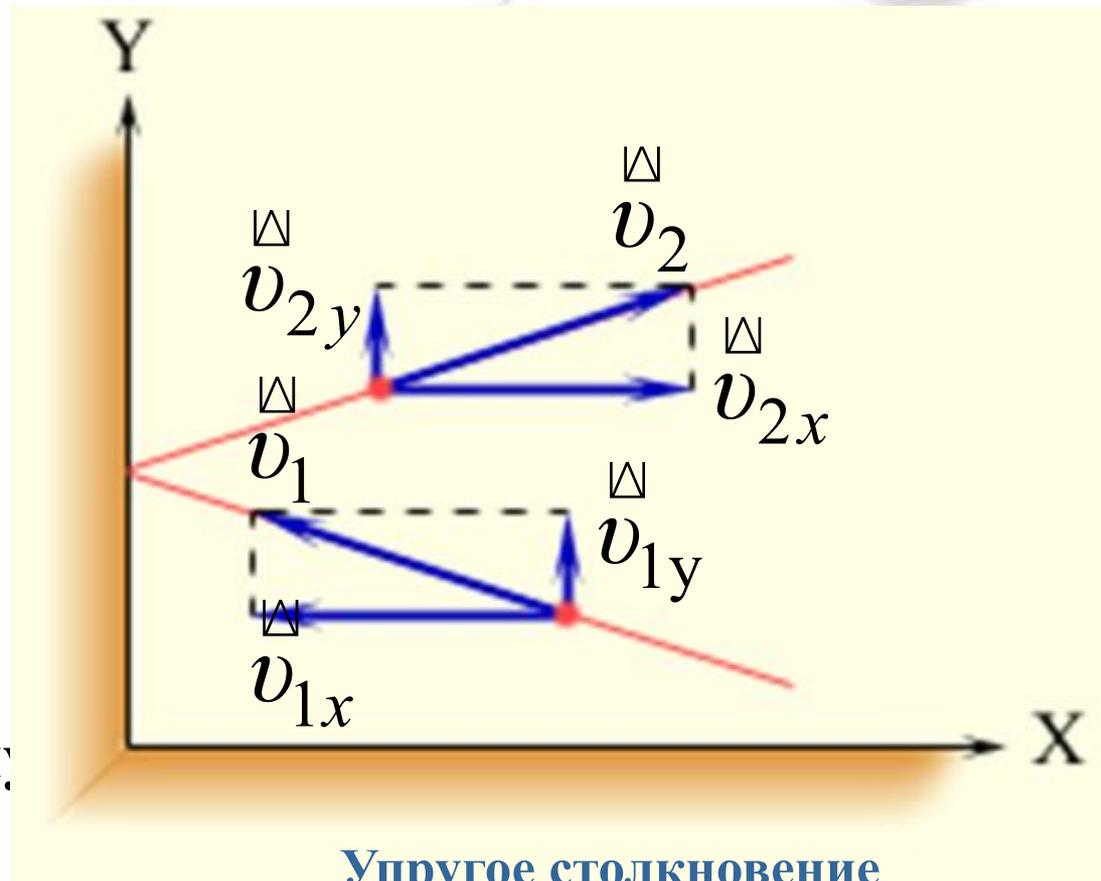
К одноатомным газам относят инертные газы — гелий, неон, аргон. В случае идеальных газов пренебрегают силами взаимодействия молекул, т. е. их потенциальная энергия полагается равной нулю, поэтому **внутренняя энергия идеального газа представляет собой кинетическую энергию теплового движения молекул.**



Основное уравнение МКТ газов

Используя модель идеального газа, вычислим *давление газа на стенку сосуда*.

В процессе взаимодействия молекулы со стенкой сосуда между ними возникают силы, подчиняющиеся третьему закону Ньютона.

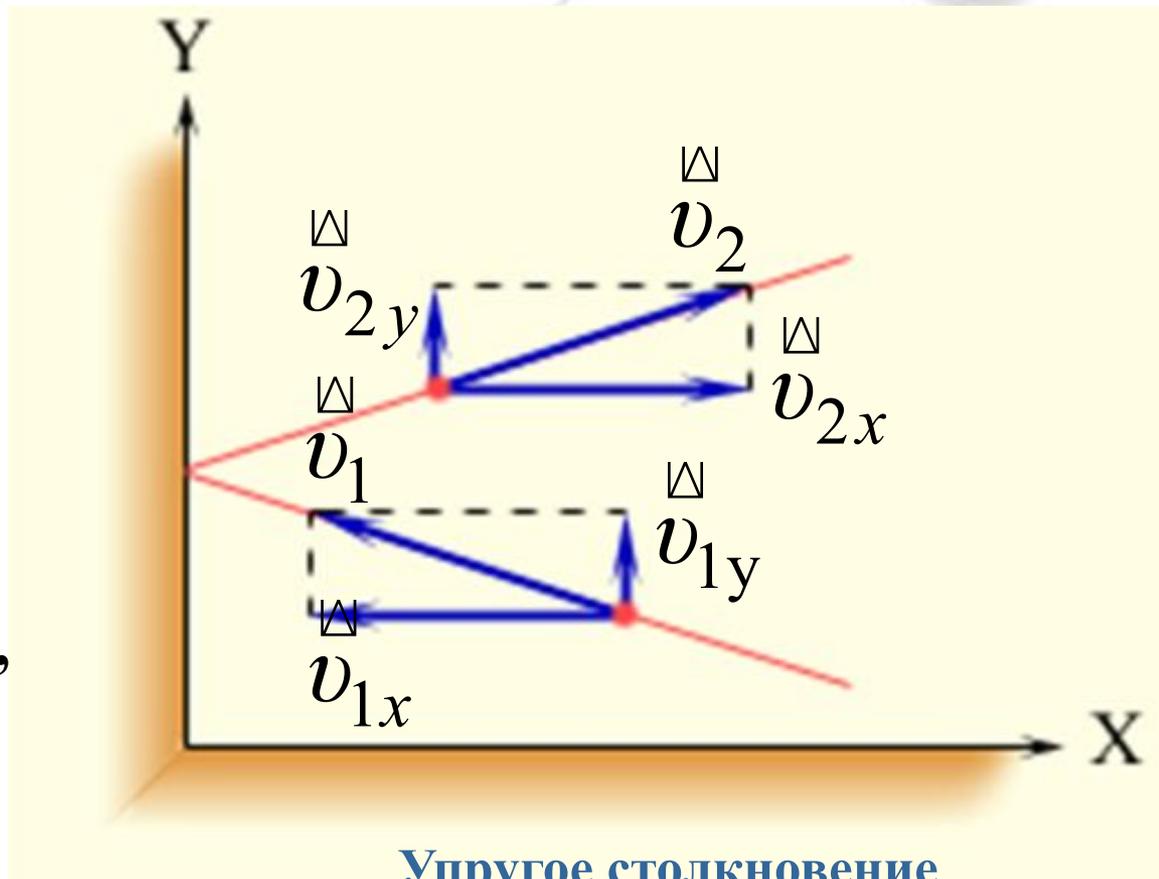


Упругое столкновение молекулы со стенкой

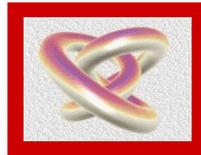


Основное уравнение МКТ газов

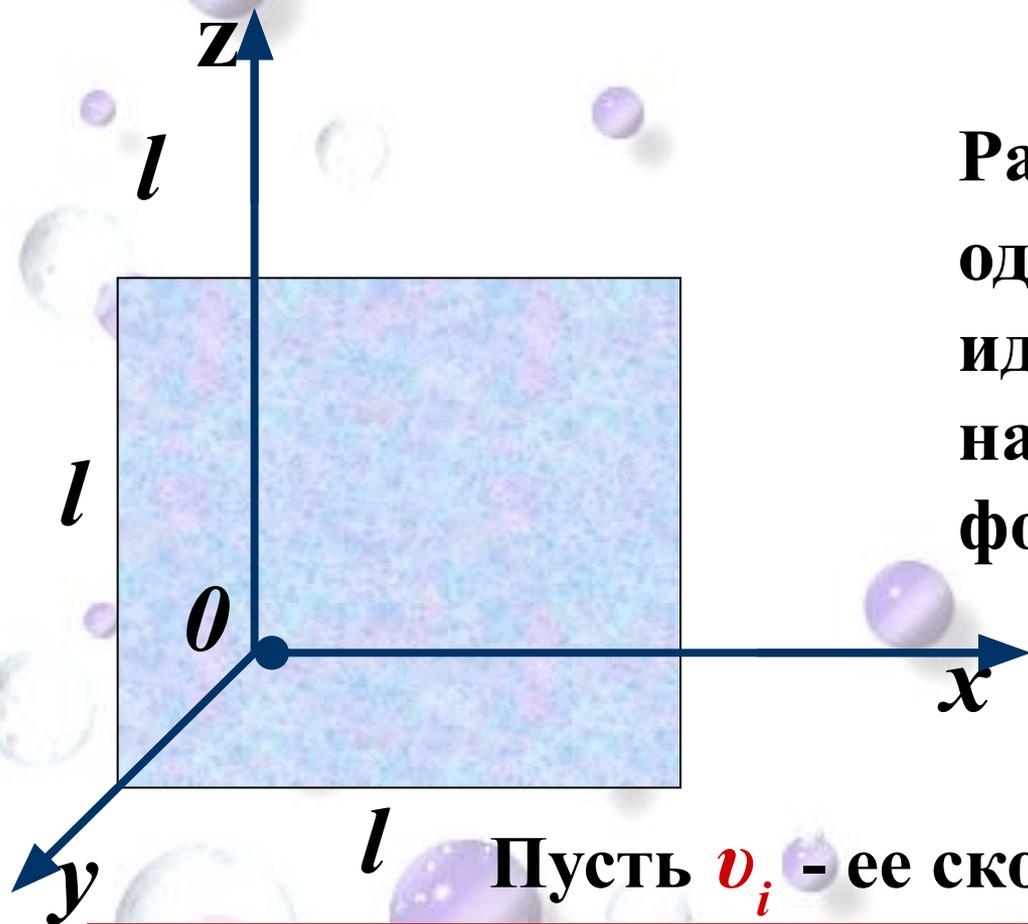
В результате проекция v_x скорости молекулы, перпендикулярная стенке, изменяет свой знак на противоположный, а проекция v_y скорости, параллельная стенке, остается неизменной.



Упругое столкновение молекулы со стенкой

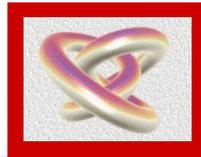


Основное уравнение МКТ газов

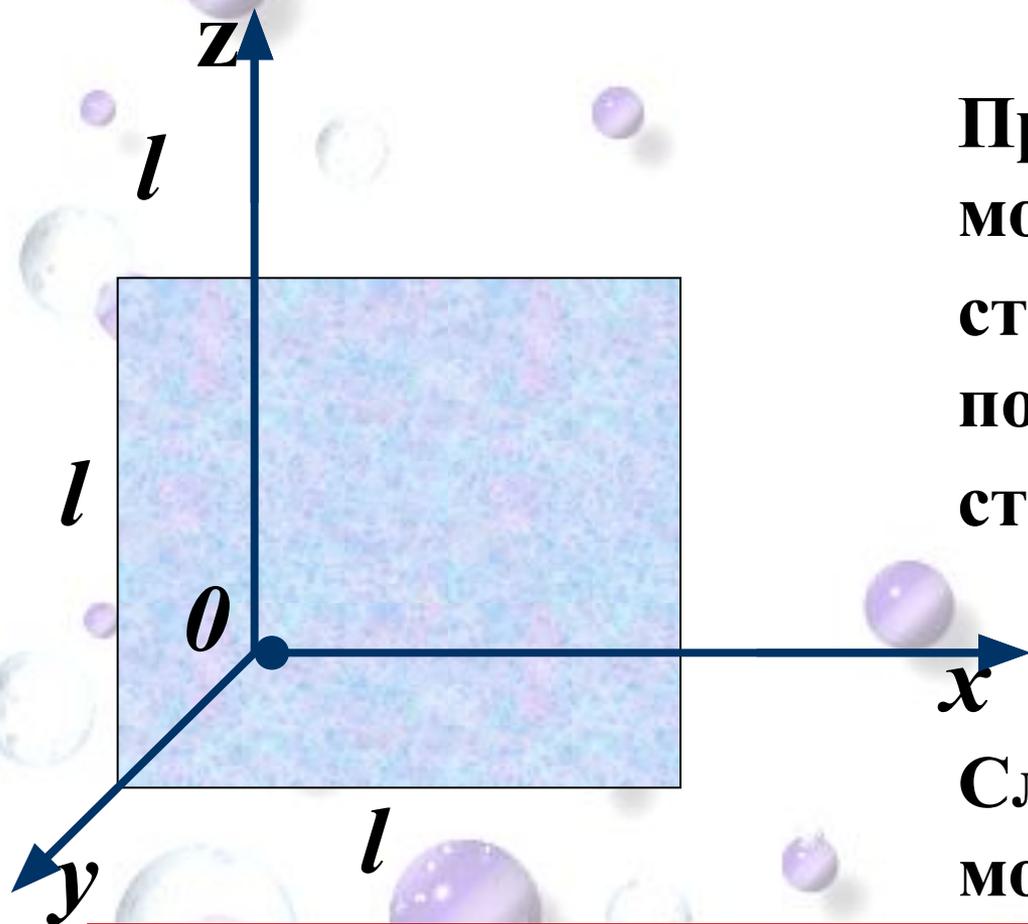


Рассмотрим поведение одной молекулы i идеального газа, находящегося в сосуде в форме куба.

Пусть v_i - ее скорость, направленная \perp стенке сосуда, а m_i - ее масса.



Основное уравнение МКТ газов



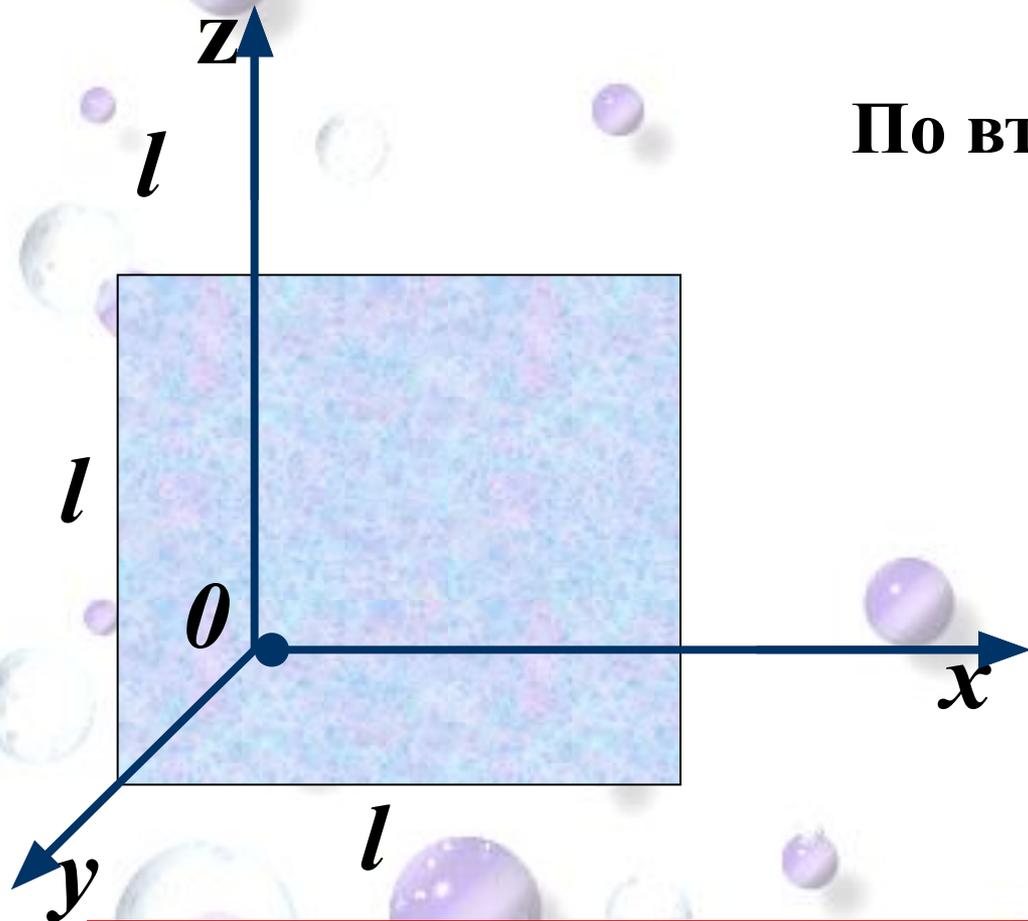
При упругом ударе молекула сообщает стенке импульс $m_i v_i$, после удара ее импульс станет равным $(-m_i v_i)$.

Следовательно, импульс молекулы изменится на

$$m_i v_i - (-m_i v_i) = 2m_i v_i$$



Основное уравнение МКТ газов



По второму закону Ньютона:

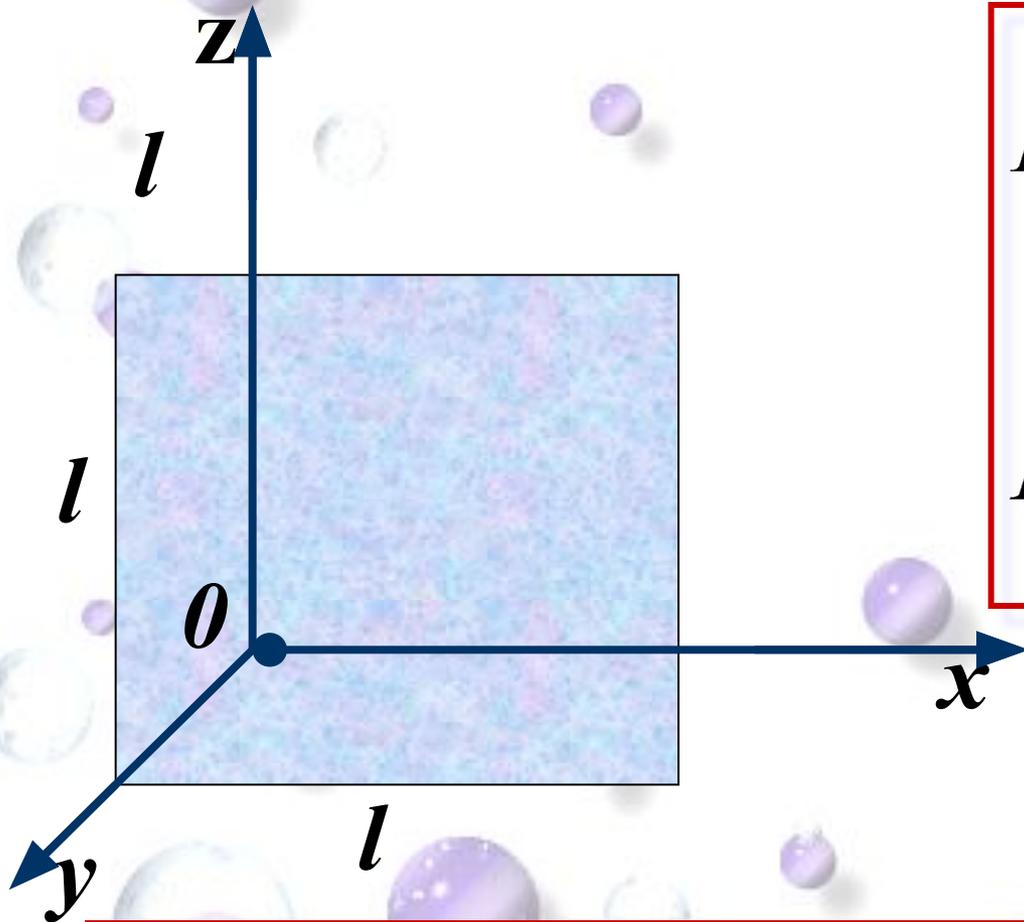
$$F_i t_i = 2m_i v_i \quad (3)$$

$$t_i = \frac{2l}{v_i} \quad (4)$$

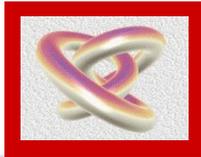
(4)  (3)



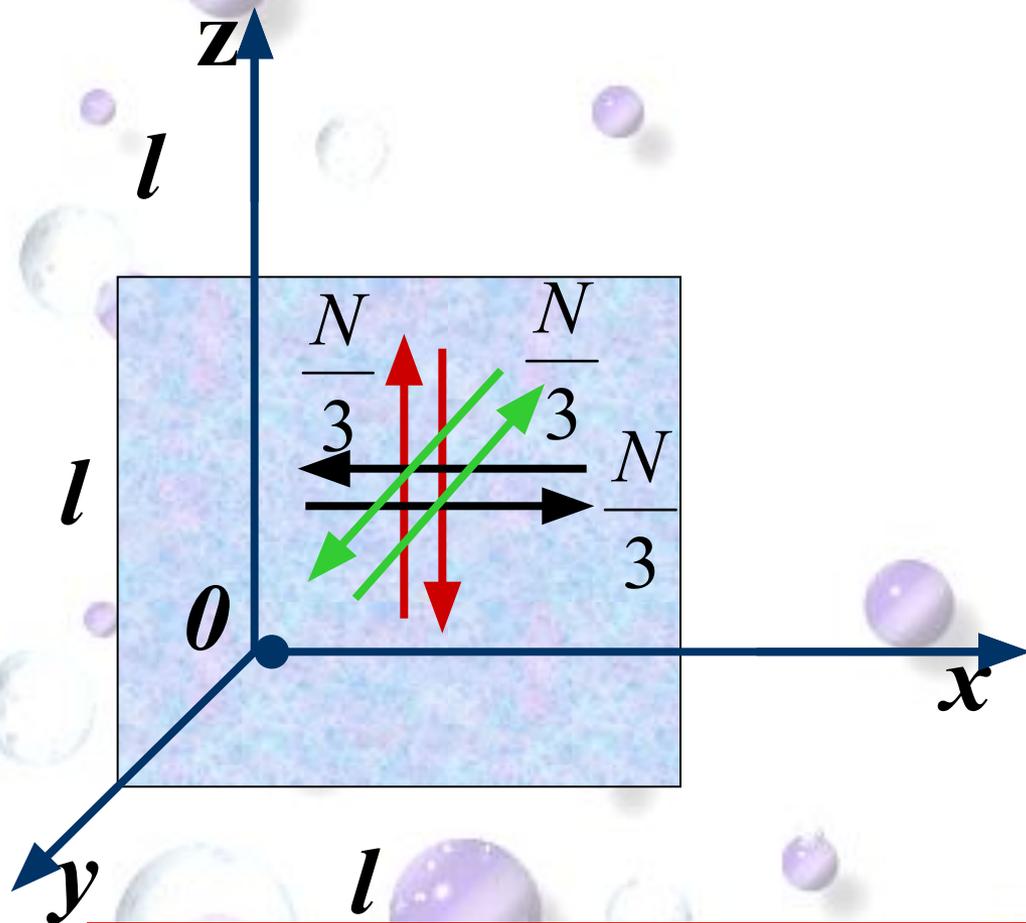
Основное уравнение МКТ газов



$$F_i \frac{2l}{v_i} = 2m_i v_i \Rightarrow$$
$$F_i = \frac{2m_i v_i^2}{2l} = \frac{m_i v_i^2}{l}$$



Основное уравнение МКТ газов



Между двумя противоположными гранями куба в направлении оси x движется **$\frac{1}{3}$** всех молекул.



Основное уравнение МКТ газов

Суммарная сила ударов об одну грань:

$$F = \frac{1}{3} \left(\frac{m_1 v_1^2}{l} + \frac{m_2 v_2^2}{l} + \dots + \frac{m_n v_n^2}{l} \right)$$



Основное уравнение МКТ газов

Для идеального газа ($m_1 = m_2 = \dots = m_n = m_0$):

$$F = \frac{1}{3} \frac{m_0}{l} (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2)$$

или $F = \frac{1}{3} \frac{m_0 N}{l} \left(\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{N} \right)$

$$\langle v_{кв} \rangle^2$$



Основное уравнение МКТ газов

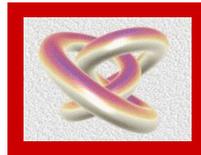
$$F = \frac{1}{3} \frac{m_0 N}{l} \langle v_{кв} \rangle^2$$

С другой стороны, сила F , действующая со стороны газа в направлении, перпендикулярном к поверхности S стенки сосуда:

$$F = pS$$

$$[p] = 1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

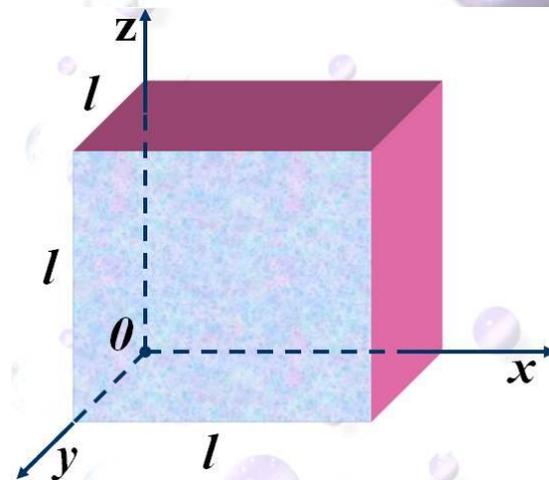
p – **давление** газа на стенку сосуда.



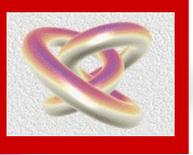
Основное уравнение МКТ газов

В нашем случае $S = l^2$

Следовательно,



$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{l^2} = \frac{1}{3} \frac{m_0 N}{l^3} \langle v_{кв} \rangle^2$$



Основное уравнение МКТ газов

Или

$$p = \frac{1}{3} \frac{m_0 N}{V} \langle v_{кв} \rangle^2 = \frac{1}{3} m_0 n \langle v_{кв} \rangle^2 \quad (5)$$

Основное уравнение МКТ

$n = \frac{N}{V}$ — концентрация молекул



Основное уравнение МКТ газов

Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа

$$\langle E \rangle = \frac{1}{2} m_0 \langle v_{кв} \rangle^2$$

Откуда

$$\langle v_{кв} \rangle^2 = \frac{2 \langle E \rangle}{m_0}$$



(5)



Основное уравнение МКТ газов

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{1}{3} m_0 n \frac{2 \langle E \rangle}{m_0} = \frac{2}{3} n \langle E \rangle$$

(6)

Основное уравнение МКТ



Основное уравнение МКТ газов

Согласно уравнению Менделеева-Клапейрона:

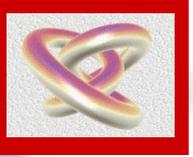
$$pV = \nu RT$$



$$p = \frac{\nu RT}{V}$$

Или

$$p = \frac{\nu RT}{V} = \frac{NRT}{N_A V} = \frac{nRT}{N_A}$$



Основное уравнение МКТ газов

С другой стороны:

$$p = \frac{2}{3} n \langle E \rangle$$

Тогда:

$$\frac{2}{3} n \langle E \rangle = \frac{nRT}{N_A}$$

Откуда:

$$\langle E \rangle = \frac{nRT}{N_A} \frac{3}{2n} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T$$



Основное уравнение МКТ газов

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

$$k = \frac{R}{N_A}$$

k – постоянная Больцмана



Основное уравнение МКТ газов

Тогда:

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT \quad (7)$$

Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа прямо пропорциональна абсолютной температуре.

Температура есть мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул.



Основное уравнение МКТ газов

(7)  (6)

$$p = \frac{2}{3} n \langle E \rangle = \frac{2}{3} n \frac{3}{2} kT$$

Или

$$p = nkT$$



Лекцию подготовили д.т.н.,
профессор Симдянкин А.А., к.п.н.,
доцент Симдянкина Е.Е.
