Молекулярная физика.
Лекция 02 (05)

10 марта 2021
Идеальный газ.

Лектор: доцент НИЯУ МИФИ,
Андрей Станиславович ОЛЬЧАК

Предмет молекулярной физики

Мы знаем, что :
на микроскопическом уровне все вещество - твердые тела, жидкости, газы, любые биологические объекты и мы сами – все дискретно – то тесть, состоит из частиц (***молекул и атомов***) настолько малых, что ***видеть*** *мы их не можем*.

Но: на ***макроскопическом*** уровне (в масштабах, доступных нашим органам чувств) тела, состоящие из огромного множества частиц, часто воспринимаются как сплошная непрерывная среда (твердое тело, жидкость, газ), характеризующаяся макроскопическими измеряемыми параметрами (***плотность[кг/м^3] , давление [Н/м^2], температура [^{0}К или ^{0}С***] и некоторые другие, о которых по ходу дела расскажем...)

Термодинамика и стат. физика занимаются явлениями и процессами, наблюдаемыми на ***макроскопическом*** уровне, но объясняющимися именно молекулярной, дискретной ***микро-структурой*** вещества

Предмет молекулярной физики

О каких конкретно явлениях и процессах идет речь?

- **Тепловые явления и макроскопические параметры вещества**
  - нагревание и охлаждение, температура, давление
- **Агрегатные состояния вещества**
  - взаимопревращения твердого тела, жидкости и газа
- **Связь тепловых явлений и механического движения** –
  - теплота, работа и энергия, тепловые двигатели
- **Явления переноса**
  - теплопроводность, вязкость, звук

Свойства веществ, связанные с их атомно-молекулярным составом и структурой составляющих их молекул, а также ***взаимопревращение*** *веществ по причинам изменения структуры составляющих их молекул,* ***НЕ*** *являются предметом молекулярной физики.*
Этим пусть занимается отдельная наука - ***химия****….*

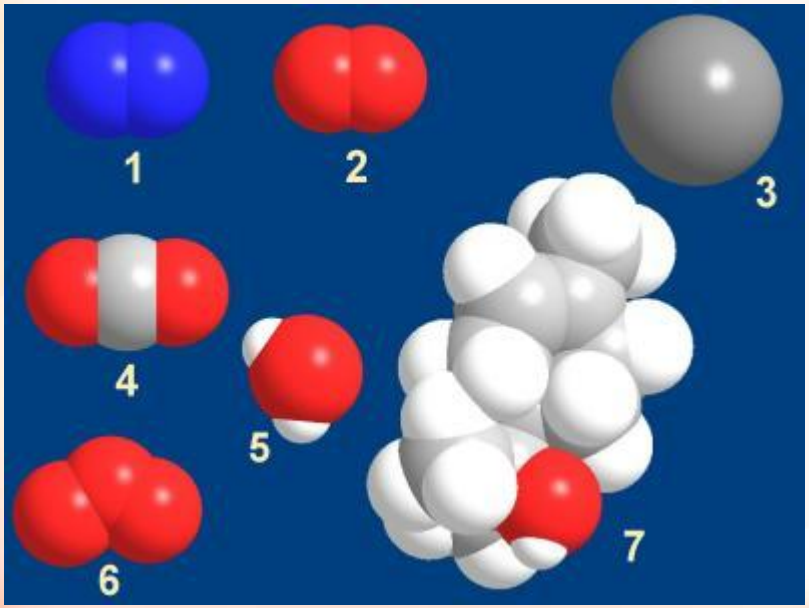
Повторение:

Что мы знаем про атомы и молекулы?
(параметры и характеристики)

Молекула - *наименьшая частица вещества, определяющая его свойства и способная к самостоятельному существованию***.**

Молекулы построены из атомов.

Атом *— наименьшая частица* ***простого*** *вещества (химического элемента), входящая в состав и простых, и сложных веществ***.**



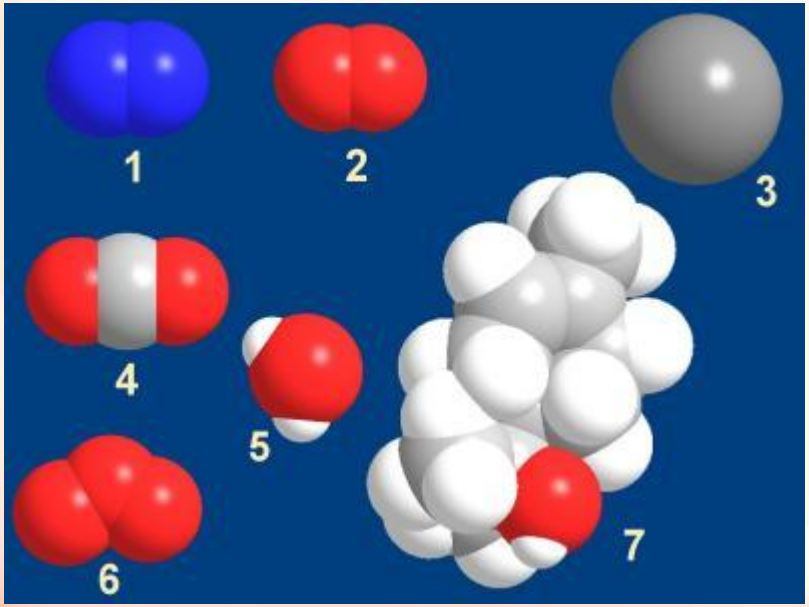
Молекулы состоят из атомов как слова из букв. И как из нескольких десятков букв можно составить сотни тысяч разных слов, так и из нескольких десятков . Встречающихся в природе атомов можно составить сотни тысяч разных молекул, образующих разные вещества с разными физическими и химическими свойствами.

Размеры молекул и атомов

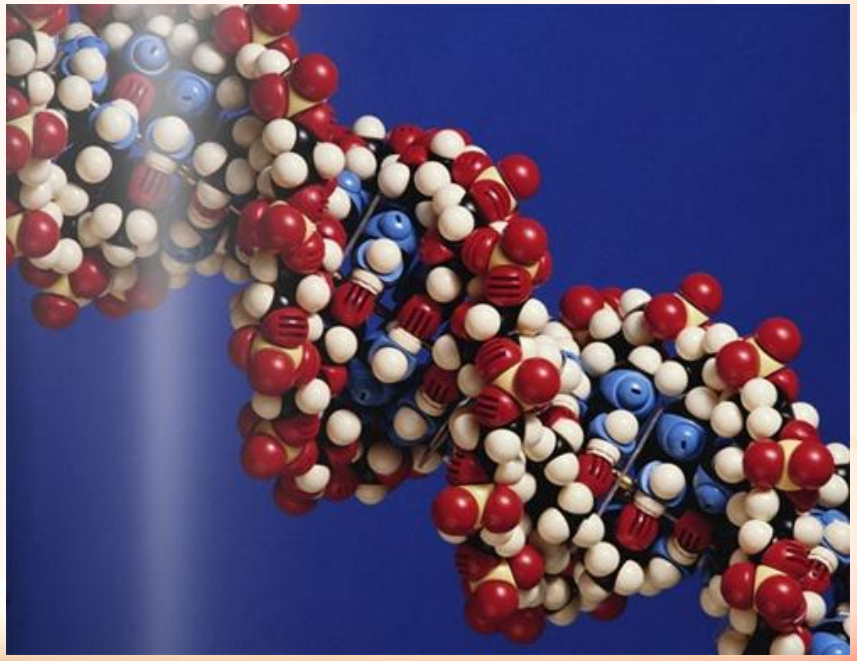
Типичный размер **атомов: d ~ 10^{-10} м** ; молекул ~>10^{-10-7} м

Единица измерения атомных расстояний: 1 Ангстрем = 10^{-10} м

1Å



5Å



Масса молекул и атомов

Атомная единица массы (1 а.е.м. = 1 Дальтон (Да)) приблизительно равна массе самого легкого в природе атома водорода (протия):

$$1 \text{ а.е.м.} = 1\text{Да} = \sim M_{\text{Н}} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Массу других атомов и молекул определяют их массовые числа (А), которые для каждого хим. элемента указаны в таблице Менделеева:

- Для водорода H_1: $A_{H1} = 1$
- Для молекулярного водорода H2: $A_{H2} = 2$
- Для воды H_2O: $A_{H2O} = 18$
- Для углекислого газа CO_2: $A_{CO2} = 44$

и т.д.

Пример: масса молекулы азота N_2: $M_{N2} = 28\text{Да} = 4{,}67 \cdot 10^{-26}\text{кг}$

Количество вещества

Количество вещества - это число составляющих его атомов и/или молекул. Для любых макроскопически заметных количеств это число огромно.

Считать молекулы штуками – не удобно. Их считают *молями*. Один моль = N_A **штук** молекул: $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ ***штук = 1 моль*** = число Авогадро

Выбор этого числа привязан к системе SI:

1 моль атомарного водорода имеет массу равную 1 грамм.

1 моль ***любого*** вещества имеет массу, равную его ***молярному числу*** в граммах.

Масса одного моля вещества = молярная масса: $\mu = M / \nu$

Amadeo Avogadro
1776-1856

Точное значение числа Авогадро, рекомендованное CODATA в 2015 году (с погрешностью):

$N_A = 6{,}02214082(11) \cdot 10^{23}$ **моль$^{-1}$.**

Предполагается, что в новой версии системы SI (в 2018 году) число Авогадро будет установлено точно (без привязки к физико-химическим измерениям)

Конденсированное и разреженное вещество

Вещество, с которым мы имеем дело при обычных земных условиях, может находиться в двух принципиально разных состояниях:

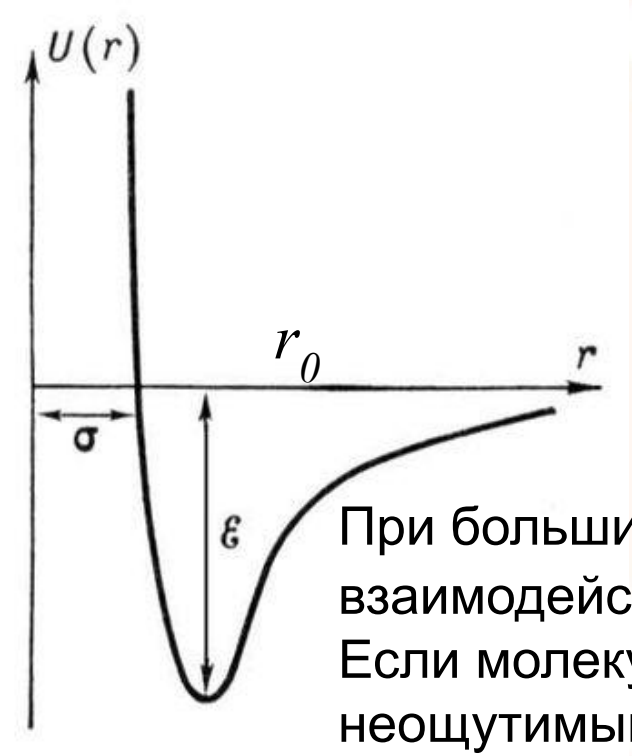
- **Плотноупакованном** (**конденсированном**), когда молекулы (атомы) прижаты вплотную к друг-другу (твердые тела, жидкости, *био-объекты*). Сильное межмолекулярное взаимодействие при этом удерживает их вместе, но дальнейшее сжатие практически не возможно и возможности движения частиц очень ограничены
- **Разреженное** (газ). Когда молекулы находятся в беспрестанном, действительно хаотическом движении и (в среднем) достаточно далеко друг от друга, взаимодействуя только при столкновениях

В первую очередь для газа формулировалась изначально МКТ.:

- Вещество состоит из микрочастиц – атомов и/или молекул
- Атомы и молекулы (очевидно) взаимодействуют друг с другом и…
- ..находятся в состоянии беспрестанного хаотического движения

Потенциальная энергия взаимодействия молекул

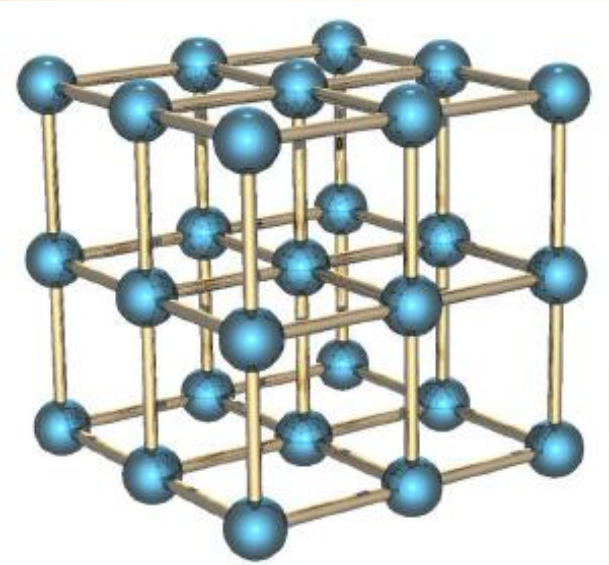
Существование двух существенно разно-плотных состояний вещества - газообразного и конденсированного – качественно объясняется тем, что потенциальная энергия взаимодействия молекул имеет зависимость от расстояния между ними, похожую на показанную на рисунке.

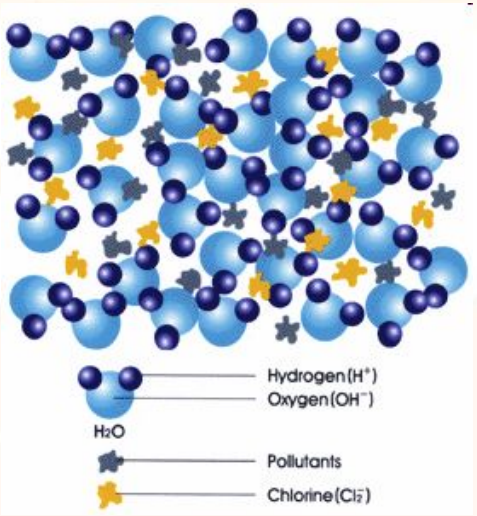


Очевидно, что состояние со средними межмолекулярными состояниями близкими к минимуму функции $U(r \sim r_0)$ устойчиво, а при попытке еще больше сжать вещество $r \sim > a$ будут возникать значительные силы отталкивания, препятствующие этому.

При больших $r >> r_0$ расстояниях между молекулами силы взаимодействия имеют характер притяжения, но слабого. Если молекулы быстро движутся, это взаимодействие будет неощутимым и молекулы будут двигаться каждая сама по себе, лишь изредка сталкиваясь друг с другом (это газ!)

Конденсированное вещество





В плотноупакованном состоянии молекулы (атомы) находятся вплотную друг к другу. Дальнейшее сжатие практически не возможно.

Исходя из предположения о типичных размерах a ~ (1 - 5) •10^{-10}м (для тяжелых атомов с большими A – больше) и массах m ~ A • 10^{-27} кг атомов можно оценить типичную плотность конденсированного вещества: $\rho \sim A \cdot 10^{-27} кг/(10^{-30} - 10^{-29}) м^3 \sim 10^3 – 10^4\ кг/м^3$

Заглянув в справочники можно убедиться, что практически для всех известных твердых и жидких веществ так оно и есть.

Разреженное состояние вещества: газ

Оценим теперь типичные межмолекулярные расстояния d в самом распространенном газе – атмосферном воздухе при нормальных атмосферных условиях.

Известен экспериментальный факт (закон Авогадро): при нормальных условиях (давление равно давлению в земной атмосферы на уровне моря, температура равна 0^0С) один моль газа занимает объем V_A =~ 22,4 л.

Оценка концентрации молекул в воздухе $n = N_A / V_A \sim 1/d^3$ = 3,7· 10^{25} $м^{-3}$

, Откуда $d \sim 3 \cdot 10^{-9}$ м ~ 10*а*. Расстояния d между молекулами газа примерно в 10 и более раз больше, чем в жидкостях и твердых телах, а их плотности должны различаться в 1000 и более раз, что так и есть.

ПРИМЕР: плотность воздуха = 1,3 кг/$м^3$, а плотность воды (вещество с меньшей молекулярной массой, чем воздух) - 10^3 кг/$м^3$

Идеальный газ – самая простая модель самого простого состояния вещества.

Лектор: доцент НИЯУ МИФИ,
Андрей Станиславович ОЛЬЧАК

Разреженное состояние вещества: газ

***Газ*:** расстояние между молекулами много больше размера молекул (d>>r ~ в 10 раз в нормальных условиях и более).

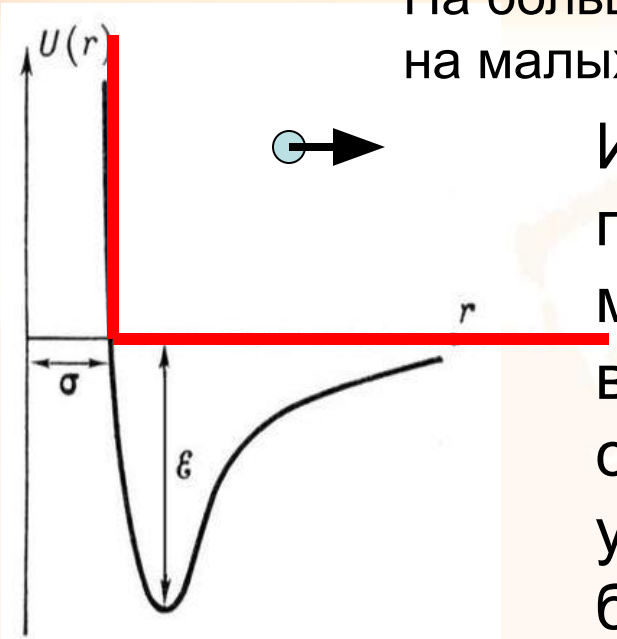
ПРИМЕР: плотность воздуха = 1,3 кг/м^3

Газ может неограниченно расширяться, не сохраняя ни объема, ни формы. Газ занимает весь предоставленный ему объем.

Взаимодействие молекул газа - столкновения.
Удары молекул газа о стенки сосуда или о поверхность помещенного в газ тела создают ***давление*** газа

Идеальный газ

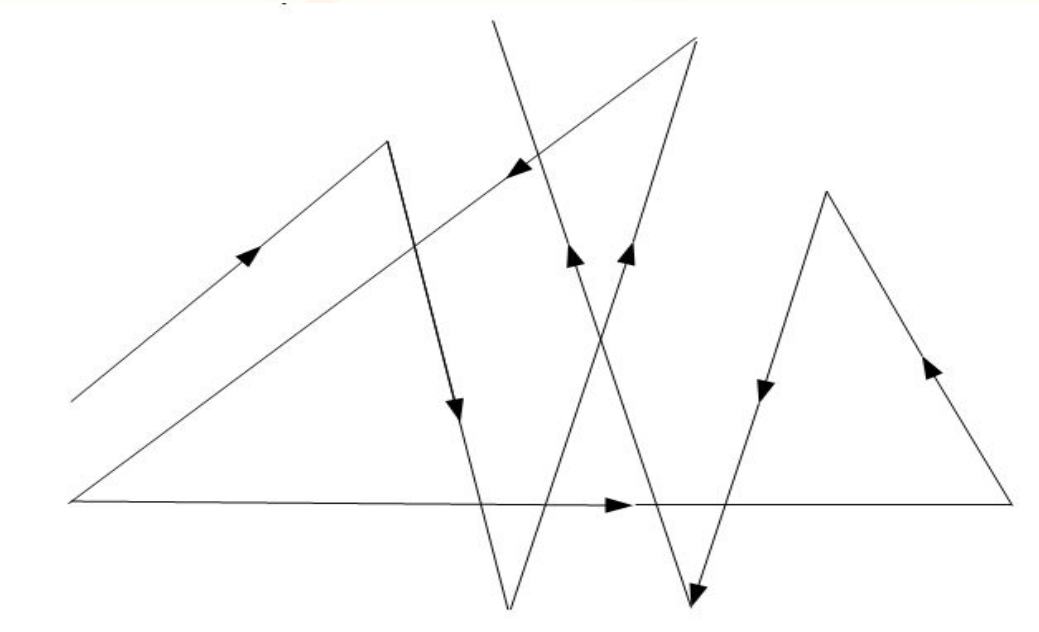
На больших расстояниях молекулы притягиваются, на малых расстояниях – отталкиваются.



Вещество находится в *газообразном состоянии* если суммарная кинетическая энергия молекул много больше абсолютного значения суммарной потенциальной энергии их взаимного притяжения

Идеальный газ - модель реального газа, в которой он рассматривается как множество свободных молекул, взаимодействие между которыми сводится к относительно редким упругим столкновениям (подобно бильярдным шарам). Потенциальной энергией взаимодействия молекул в модели идеального газа пренебрегают. Реальные газы (воздух) при достаточно больших температурах действительно ведут себя подобно идеальному газу.

Идеальный газ



Траектория движения молекулы в случае газообразного состояния вещества

Макропараметры

Для практического описания состояний разреженных газов, близких к идеальному, используется всего несколько усредненных макро-параметров:

V [м^3] – объем

M [кг] - масса; ρ[кг/м^3] = M/V – плотность вещества

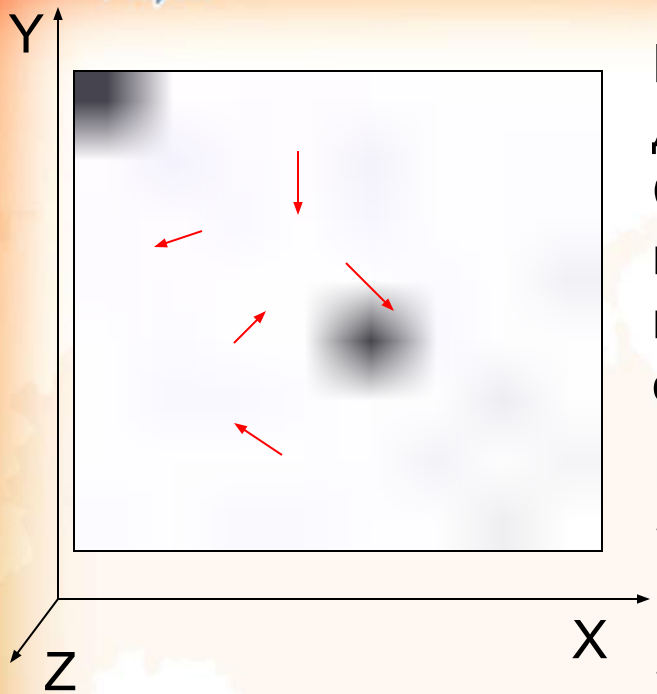
P [Н/м^2] – давление

T [К] – температура

μ [г/моль] – молярная масса; ν [моль] = M/μ = количество вещества

S [Дж/К] - *энтропия*

Среднее значение квадрата скорости молекул



Бессмысленно пытаться проследить за движением всех молекул - их слишком много. Скорости разных молекул могут быть любыми, но ***среднее значение*** скорости, или, что важнее, ***квадрата скорости*** - вполне определенное и устойчивое:

$\langle \vec{V} \rangle = 0$ (в среднем газ покоится)

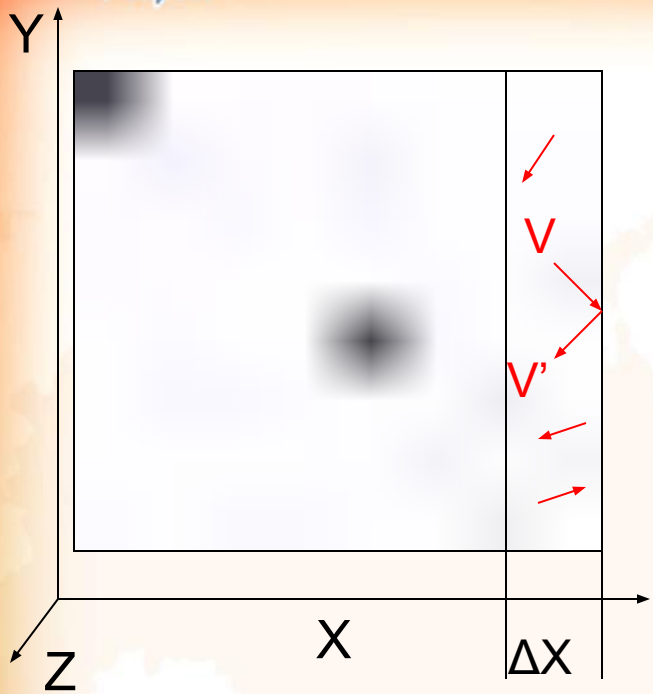
$$\langle V^2 \rangle = (V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + .. + V_N^2)/N > 0$$

Движение молекул хаотично изотропно => средние значения квадратов проекций скоростей на оси X, Y, Z одинаковы:

$$\langle V^2 \rangle = \langle V_x^2 \rangle + \langle V_y^2 \rangle + \langle V_z^2 \rangle;$$

$$\langle V_x^2 \rangle = \langle V_y^2 \rangle = \langle V_z^2 \rangle = \langle V^2 \rangle / 3$$

Давление идеального газа



После упругого удара о стенку молекулы массы **m**, она отлетает , сменив знак компоненты скорости, перпендикулярной стенке и передав ей импульс

$$\Delta p_x = 2m<|V_x|>.$$

За время Δt о стенку ударятся ***половина*** молекул из слоя $\Delta X = <|V_x|>\Delta t$. Суммарный переданный импульс составит:

$$\Delta P = m<|V_x|>\, n <|V_x|>\Delta t\, S = nm<V_x^2>\Delta t S$$

где n[1/м^3] - число молекул в единице объема, S [м^2] - площадь стенки.

Средняя сила действующая на единицу площади стенки называется давлением газа: $P = (\Delta P/\Delta t)/S = nm<V^2>/3 = 2n<E_k>/3$

Это и есть основное уравнение МКТ для идеального газа.

Температура.

Основное уравнение МКТ для идеального газа:

$$P = 2/3n\langle E_k\rangle = n\Theta = nkT$$

$\Theta = 2/3\langle E_k\rangle$ - абсолютная температура, измеряемая в энергетических единицах [Дж]

Температура – мера средней кинетической энергии движения молекул

$T = \Theta/k$ - абсолютная температура, измеряемая в градусах Кельвина [K]

$k = 1{,}38 \times 10^{-23}$ Дж/К - коэффициент пропорциональности, постоянная Больцмана.

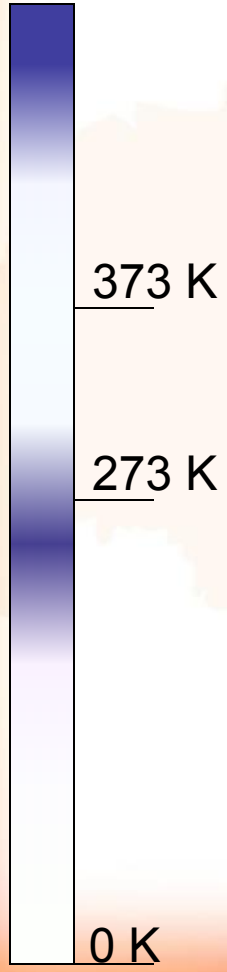
Комнатная температура T ~ 300K ~ 4 • 10^{-21} Дж

$$\langle E_k\rangle = 3kT/2 = m\langle v^2\rangle/2 \Rightarrow \langle v^2\rangle = 3kT/m$$

Температурные шкалы.

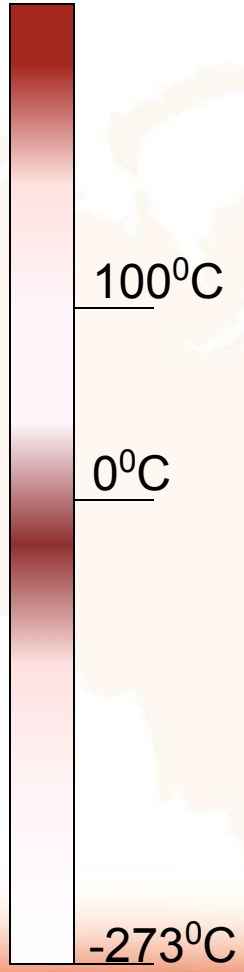
Шкала Кельвина

$1K = 1{,}38 \times 10^{-23}$ Дж



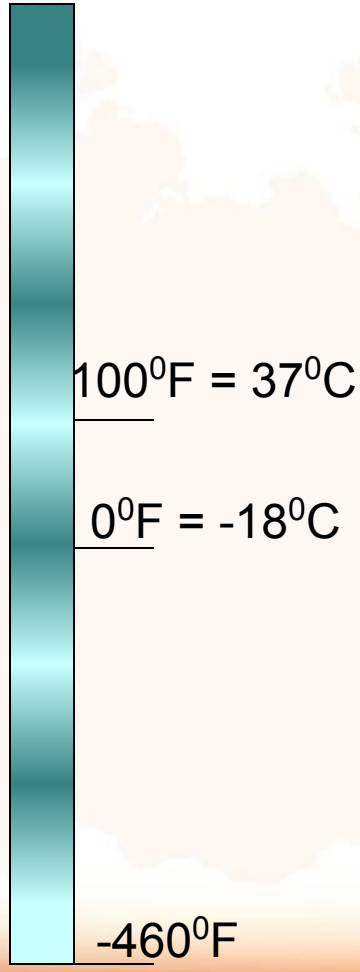
Шкала Цельсия

$1^0C = 1K$



Шкала Фаренгейта

$1^0F = 0{,}55^0C = 0{,}55K$



Макроскопическое уравнение идеального газа

Основное уравнение: $P = nkT$

Выразим n (число молекул в единице объема) через макроскопические величины:…

$$n = N/V = \nu[моль]N_A / V[м^3] = (M/\mu)(N_A/V)$$

…и подставим в уравнение состояния идеального газа. Получим уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$PV = nkTV = \nu RT = (M/\mu)RT$$

где $R = kN_A = 8{,}3\ Дж/моль{\bullet}К$ - универсальная газовая постоянная

Газовые законы

$$PV = (M/\mu)RT = \nu RT$$

Уравнение состояния идеального газа (Д.И.Менделеев(1874) – Б. Клапейрон (1834))

$$PV = Const \text{ если } T = Const \text{ (изотермический процесс)}$$

Для газа данной массы произведение давления газа на его объем постоянно, если постоянна температура. (Р. Бойль,1662, Э. Мариотт,1677)

$$P/T = Const \text{ если } V = Const \text{ (изохорный процесс)}$$

Для газа данной массы отношение давления газа к его температуре постоянно, если объем не меняется. (Ж. Шарль,1787)

$$V/T = Const \text{ если } P = Const \text{ (изобарный процесс)}$$

Для газа данной массы отношение объема газа к его температуре постоянно, если давление не меняется. (Ж. Гей-Люсак, 1802)

Основы молекулярной и статистической физики

Лекция 02
Идеальный газ

Спасибо за внимание!

…в следующей лекции поговорим про теплоемкость…