



Молекулярная физика.
Лекция 02 (05)

10 марта 2021
Идеальный газ.

Лектор: доцент НИЯУ МИФИ,
Андрей Станиславович ОЛЬЧАК



Мы знаем, что :

на микроскопическом уровне все вещество - твердые тела, жидкости, газы, любые биологические объекты и мы сами – все **дискретно** – то есть, 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 $[^{\circ}K$ или $^{\circ}C$**) 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



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:

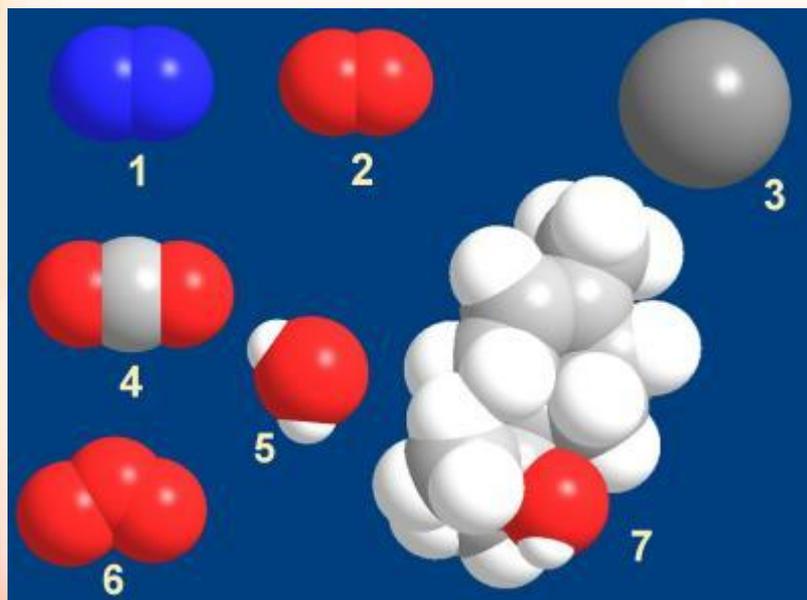
Что мы знаем про атомы и молекулы?
(параметры и характеристики)



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.



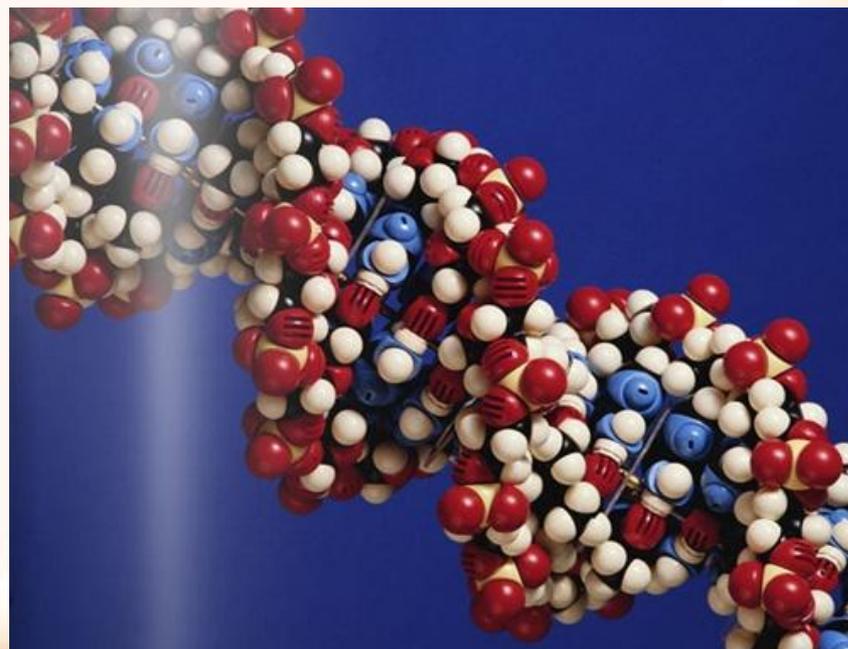
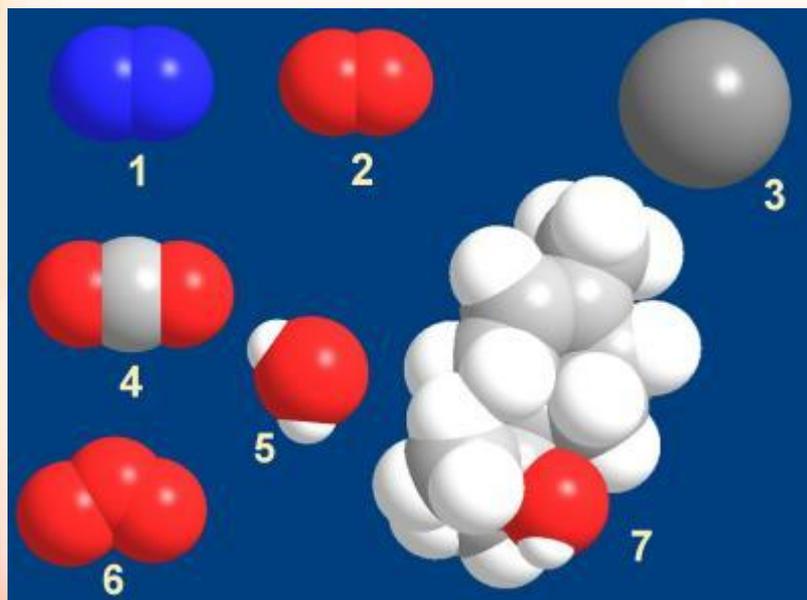
Типичный размер **атомов: $d \sim 10^{-10}$ м** ; молекул $\sim >10^{-10-7}$ м

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

1Å



5Å





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

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

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

- Для водорода H_1 : $A_{\text{H}_1} = 1$
 - Для молекулярного водорода H_2 : $A_{\text{H}_2} = 2$
 - Для воды H_2O : $A_{\text{H}_2\text{O}} = 18$
 - Для углекислого газа CO_2 : $A_{\text{CO}_2} = 44$
- и т.д.

Пример: масса молекулы азота N_2 : $M_{\text{N}_2} = 28 \text{ Да} = 4,67 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$



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
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:

- **Плотнупакованном (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

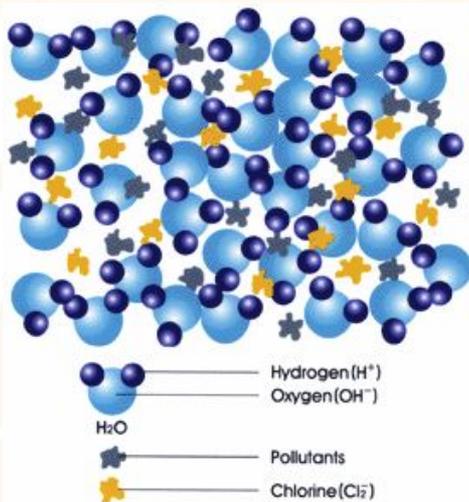
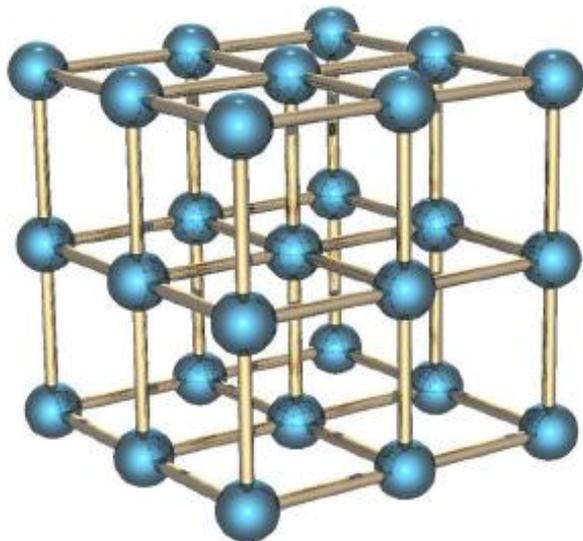


Существование двух существенно разно-плотных состояний вещества - газообразного и конденсированного – качественно объясняется тем, что потенциальная энергия взаимодействия молекул имеет зависимость от расстояния между ними, похожую на показанную на рисунке.



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 $r \gg r_0$ 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!)



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

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

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°C) один моль газа занимает объем $V_A \approx 22,4$ л.

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

, Откуда $d \sim 3 \cdot 10^{-9} \text{ м} \sim 10\text{а}$. 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 = $1,3 \text{ кг/м}^3$, 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



Газ: расстояние между молекулами много больше размера молекул ($d \gg r \sim$ в 10 раз в нормальных условиях и более).

ПРИМЕР: плотность воздуха = $1,3 \text{ кг/м}^3$

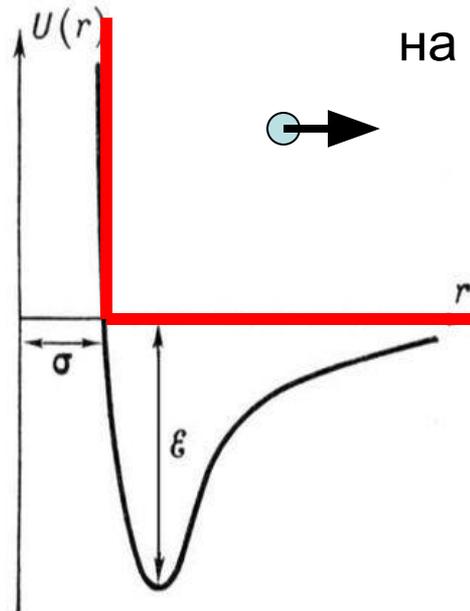
Газ может неограниченно расширяться, не сохраняя ни объема, ни формы. Газ занимает весь предоставленный ему объем.

Взаимодействие молекул газа - столкновения.

Удары молекул газа о стенки сосуда или о поверхность помещенного в газ тела создают **давление** газа

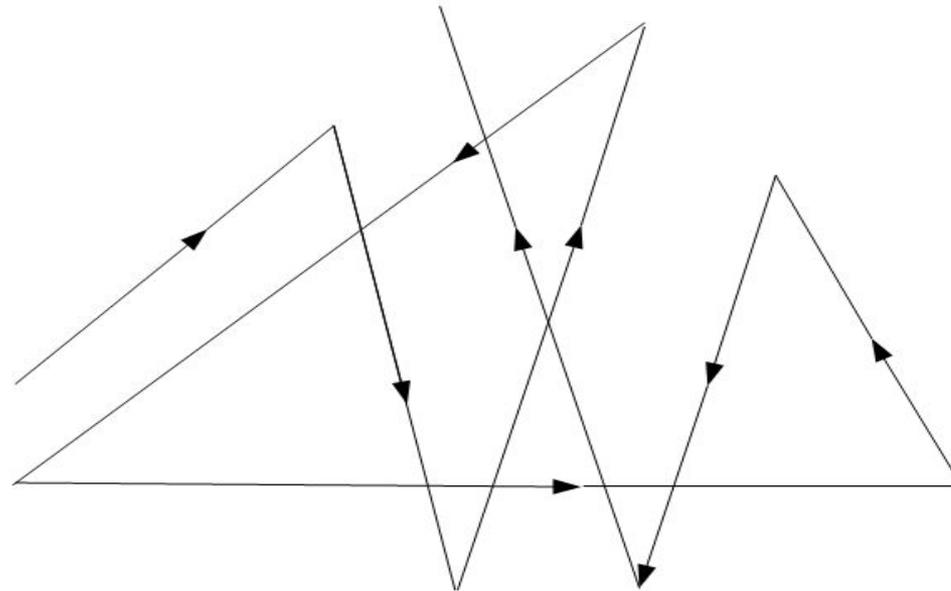


На больших расстояниях молекулы притягиваются, на малых расстояниях – отталкиваются.



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.



Траектория движения молекулы в случае газообразного состояния вещества



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

V [м^3] – объем

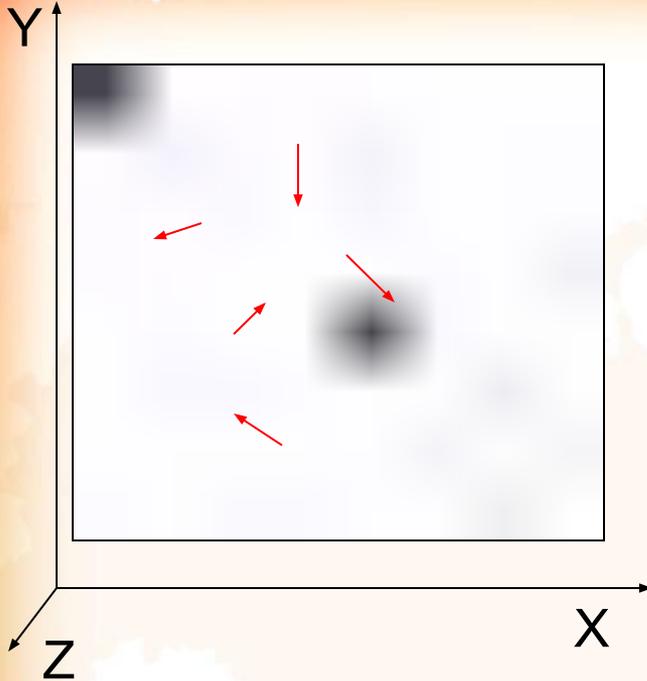
M [кг] - масса; ρ [$\text{кг}/\text{м}^3$] = M/V – плотность вещества

P [$\text{Н}/\text{м}^2$] – давление

T [К] – температура

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

S [Дж/К] - энтропия



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:

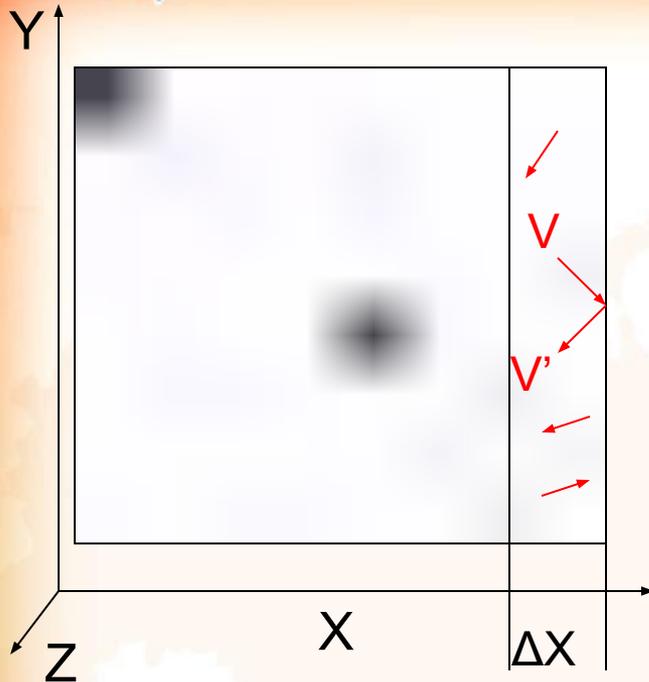
→
 $\langle V \rangle = 0$ (в среднем газ покоится)

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

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

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

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



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

$$\Delta p_x = 2m \langle |V_x| \rangle.$$

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

$$\Delta P = m \langle |V_x| \rangle n \langle |V_x| \rangle \Delta t S = nm \langle V_x^2 \rangle \Delta t S$$

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

Средняя сила действующая на единицу площади стенки называется давлением газа: $P = (\Delta P / \Delta t) / S = nm \langle V^2 \rangle / 3 = 2n \langle E_k \rangle / 3$
 Это и есть основное уравнение МКТ для идеального газа.



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 [К]

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

Комнатная температура $T \sim 300\text{К} \sim 4 \cdot 10^{-21}$ Дж

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



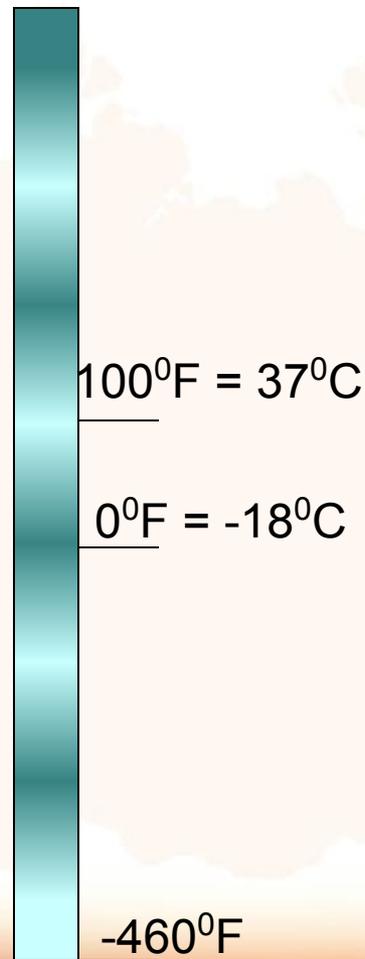
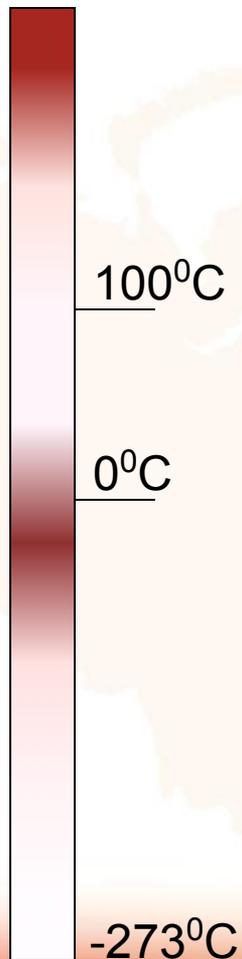
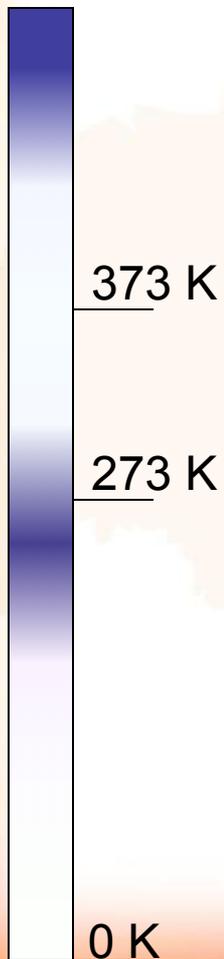
Температурные шкалы.



Шкала Кельвина
 $1\text{K} = 1,38 \times 10^{-23} \text{ Дж}$

Шкала Цельсия
 $1^\circ\text{C} = 1\text{K}$

Шкала Фаренгейта
 $1^\circ\text{F} = 0,55^\circ\text{C} = 0,55\text{K}$





Макроскопическое уравнение идеального газа

Основное уравнение: $P = nkT$

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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...