

Концепции и модели физики

Кузьмичев Сергей Дмитриевич



Содержание лекции №1

1. Большие системы. Предмет термодинамики и молекулярно-кинетической теории (статистической физики).
2. Уравнение состояния термодинамической системы.
3. Газообразное состояние вещества. Модель идеального газа в молекулярно-кинетической теории.
4. Изопроцессы. Газовые законы. Уравнение Менделеева-Клапейрона. Закон Дальтона.
5. Идеальный газ во внешнем силовом поле. Барометрическая формула и её вероятностная трактовка. Распределение Больцмана.
6. Распределение Максвелла. Характерные скорости.
7. Распределение Гиббса.

7 вопросов пока кипит чайник.



1. Большие системы. Предмет термодинамики и молекулярно-кинетической теории (статистической физики).

Термодинамика - наука о наиболее общих свойствах макроскопических физических систем, находящихся в состоянии **термодинамического равновесия**, и о процессах перехода между этими состояниями.

Термодинамика является наукой феноменологической и строится на основе фундаментальных принципов (**начал**), которые являются обобщением многочисленных наблюдений и выполняются независимо от конкретной природы образующих систему тел. Поэтому **закономерности** и соотношения между физическими величинами, к которым приводит термодинамика, **имеют универсальный характер**.

Термодинамика оперирует только с **макроскопическими величинами** (давление, температура, объём и т.п.), которые вводятся на основе физического эксперимента.

Обоснование законов термодинамики, их связь с законами движения отдельных частиц, из которых построены тела, даётся статистической физикой.

Статистическая физика - раздел физики, посвящённый изучению свойств **макроскопических тел**, т. е. систем, состоящих из очень большого числа частиц (молекул, атомов, электронов и т. д.), опираясь на сведения о **«микроскопическом» строении** тел (исходя из свойств этих частиц и взаимодействий между ними).

Статистическая физика позволяет, по крайней мере в принципе, а часто и фактически, вычислить макроскопические параметры веществ, если известны силы взаимодействия между атомами и молекулами.

В основе **молекулярно кинетической теории (МКТ)** лежат три основных положения:

1. Все вещества – жидкие, твердые и газообразные – образованы из мельчайших частиц – молекул, которые сами состоят из атомов («элементарных молекул»).
2. Атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении.
3. Частицы взаимодействуют друг с другом силами, имеющими электрическую природу. Гравитационное взаимодействие между частицами пренебрежимо мало.

Экспериментальные доказательства основных положений МКТ: диффузия, броуновское движение, изменение агрегатных состояний вещества.

Молекулярная физика является статистической теорией, т. е. теорией, которая рассматривает поведение систем, состоящих из огромного числа частиц (атомов, молекул), на основе ***вероятностных моделей***.

Она стремится на основе статистического подхода установить **связь между** экспериментально измеренными

макроскопическими величинами

(давление, объем, температура и т.д.) и

микроскопическими характеристиками

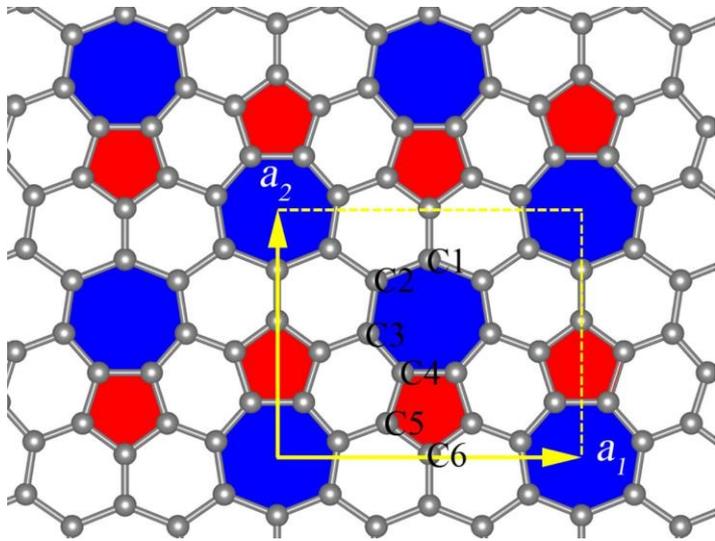
частиц, входящих в состав системы (масса, импульс, энергия и т.д.).











Открыт «родственник» графена —
фаграфен.
31.08.2015

Группа ученых из России, США и Китая под руководством **Артема Оганова** из МФТИ с помощью компьютерного моделирования предсказала существование нового углеродного двумерного материала, «лоскутного» аналога графена, который они назвали «фаграфен». В отличие от графена, который образован шестиугольными «сота́ми» с атомами углерода в узлах, фаграфен состоит из пяти-, шести- и семиугольных углеродных колец. Отсюда и его название, сокращение от Penta-Hepta-heptA-graphene», — говорит Оганов, руководитель **лаборатории компьютерного дизайна материалов МФТИ.**

2. Уравнение состояния термодинамической системы.

Системой называется совокупность рассматриваемых тел (частиц), которые могут взаимодействовать между собой и с другими телами (внешней средой) посредством **обмена веществом и энергией**. В термодинамике рассматриваются большие системы, называемые термодинамическими системами.

Примером термодинамической системы может служить газ, в 1 см^3 которого при **нормальных условиях** содержится

$$2,687 \cdot 10^{19}$$

молекул (число Лошмидта).

Нормальные условия:

давление: **101325 Па**

температура: **$273,15 \text{ К} (0^\circ \text{ C})$**

Микроскопическое состояние (или микросостояние) — это состояние системы, определяемое заданием координат и импульсов всех составляющих систему частиц.

Макроскопическое состояние (или макросостояние) — это состояние системы, характеризуемое небольшим числом величин. Например,

- давление P ,
- объём V ,
- температура T .

Величины, характеризующие макросостояние, называются **макроскопическими параметрами состояния**.

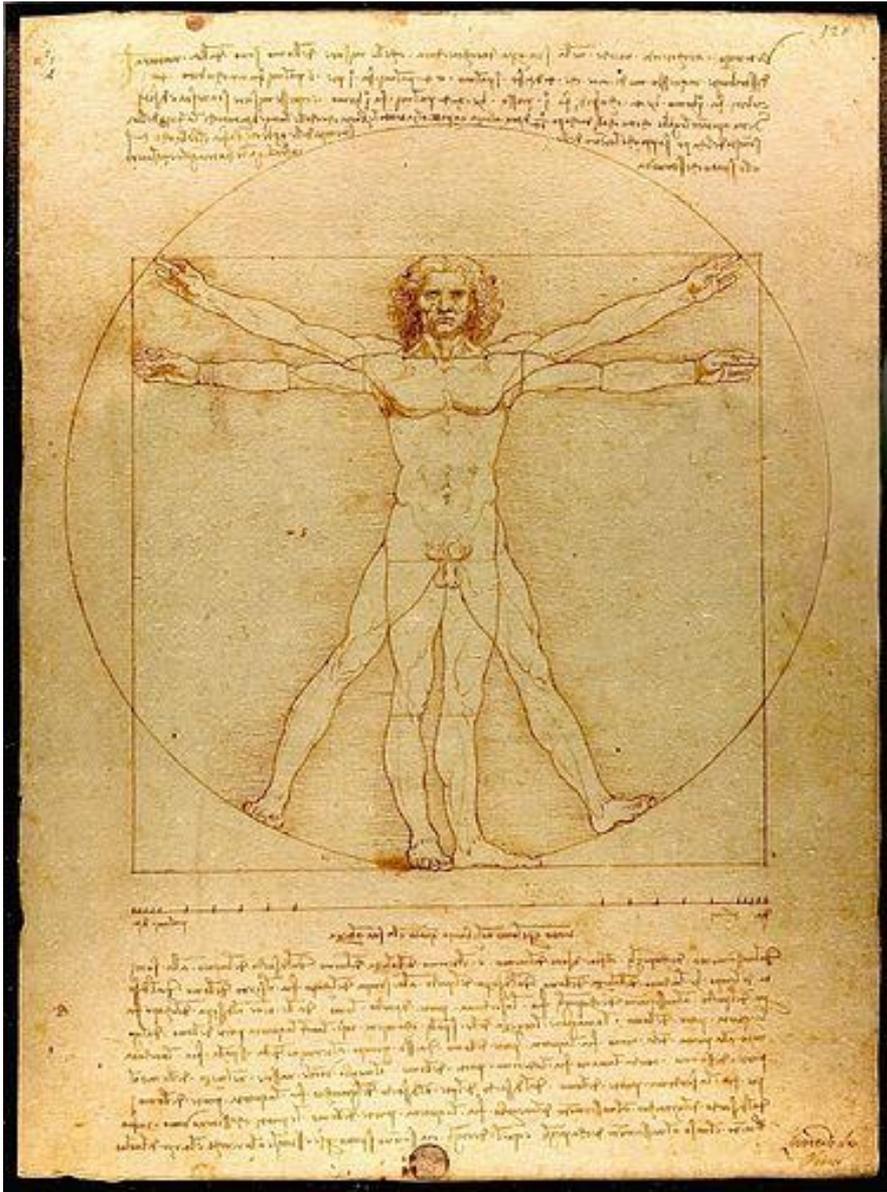
Здоровье человека

Здоровье человека является качественной характеристикой, складывающейся из набора количественных параметров:

- антропометрических (рост, вес, объём грудной клетки, геометрическая форма органов и тканей);
- физических (частота пульса, артериальное давление, температура тела);
- биохимических (содержание химических элементов в организме, эритроцитов, лейкоцитов, гормонов и пр.);
- биологических (состав кишечной флоры, наличие вирусных и инфекционных болезней) и других биомаркеров.

Общий анализ крови (норма)		
Показатель	Взрослые женщины	Взрослые мужчины
Гемоглобин	120—140 г/л	130—160 г/л
Эритроциты	$3,7—4,7 \times 10^{12}$	$4—5,1 \times 10^{12}$
Цветовой показатель	0,85—1,15	0,85—1,15
Ретикулоциты	0,2—1,2%	0,2—1,2%
Тромбоциты	$180—320 \times 10^9$	$180—320 \times 10^9$
СОЭ	2—15 мм/ч	1—10 мм/ч
Лейкоциты	$4—9 \times 10^9$	$4—9 \times 10^9$
Палочкоядерные	1—6%	1—6%
Сегментоядерные	47—72%	47—72%
Эозинофилы	0—5%	0—5%
Базофилы	0—1%	0—1%
Лимфоциты	18—40%	18—40%
Моноциты	2—9%	2—9%

Леонардо да Винчи Номо vitruviano, 1490 Галерея Академии, Венеция



- высота человека составляет четыре локтя от кончиков пальцев
- размах человеческих рук равен его росту
- максимум ширины плеч составляет $\frac{1}{4}$ его высоты
- длина руки составляет $\frac{2}{5}$ его высоты
- расстояние от подбородка до носа составляет $\frac{1}{3}$ длины его лица
- расстояние от линии волос до бровей $\frac{1}{3}$ длины его лица
- длина ушей $\frac{1}{3}$ длины лица
- пупок является центром окружности

Предоставленная самой себе, изолированная система приходит в **состояние термодинамического равновесия**, характеризуемое тем, что в нем все макроскопические процессы прекращаются, скорости прямых и обратных реакций сравниваются, давление и температура принимают постоянные по объему системы значения.

Сформулированное утверждение есть обобщение опыта, и принимается в качестве постулата — основного или **общего начала термодинамики**.

Состояние равновесия является **динамическим**: на молекулярном (микроскопическом) уровне непрерывно происходят сложные движения, а на макроскопическом уровне — никаких видимых изменений.

Равновесие



Стационарным состоянием системы называется такое состояние, в котором определяющие его параметры не изменяются со временем. В замкнутой системе стационарным является состояние термодинамического равновесия.

Всякое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из макроскопических параметров, называется **термодинамическим процессом**.

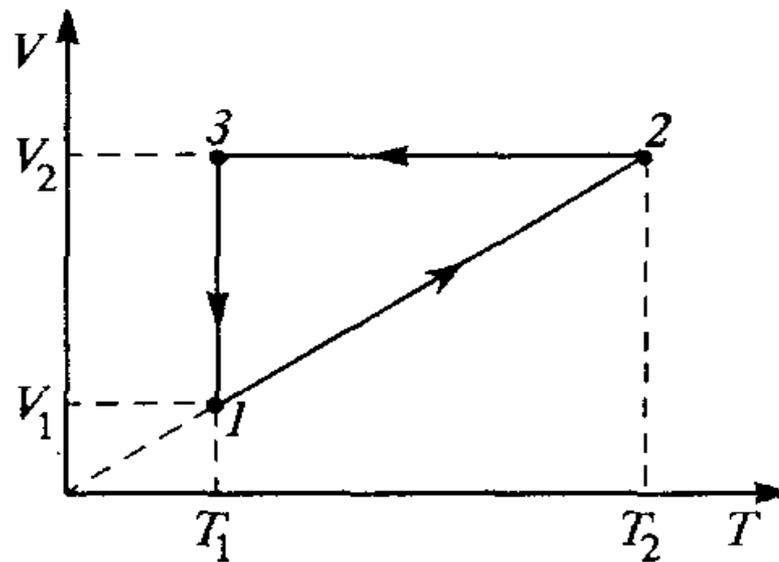
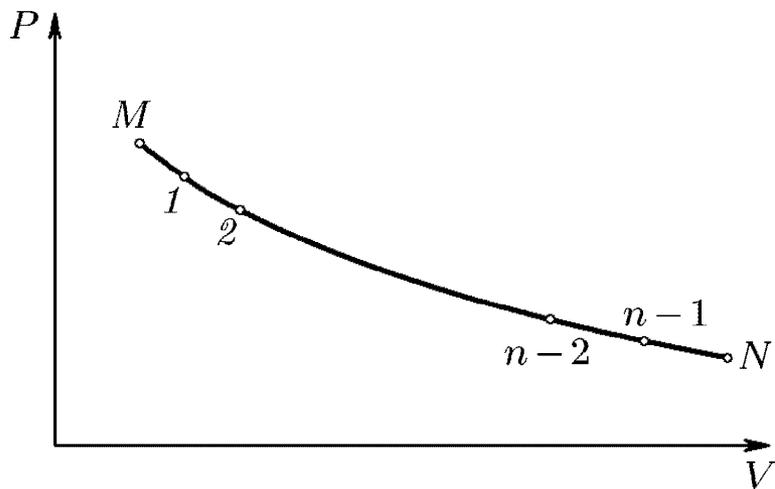
Пусть в результате внешнего воздействия (например, изменения объёма, давления, добавления энергии или частиц) система выведена из состояния равновесия. Тогда с течением времени она переходит в новое равновесное состояние. Этот переход называется **релаксацией**. Время, необходимое для установления нового равновесного состояния, называется временем релаксации.

Если по ходу процесса рассматриваемая система в каждый момент находится вблизи некоторого состояния термодинамического равновесия, отвечающего суммарному результату произведенного на нее воздействия, то такой процесс называется **квазистатическим или равновесным**.

Поскольку равновесное состояние системы характеризуется небольшим числом параметров, то описание равновесного процесса сводится к установлению закона изменения тех же параметров состояния.

$$P(V), \quad V(T), \quad T(P)$$

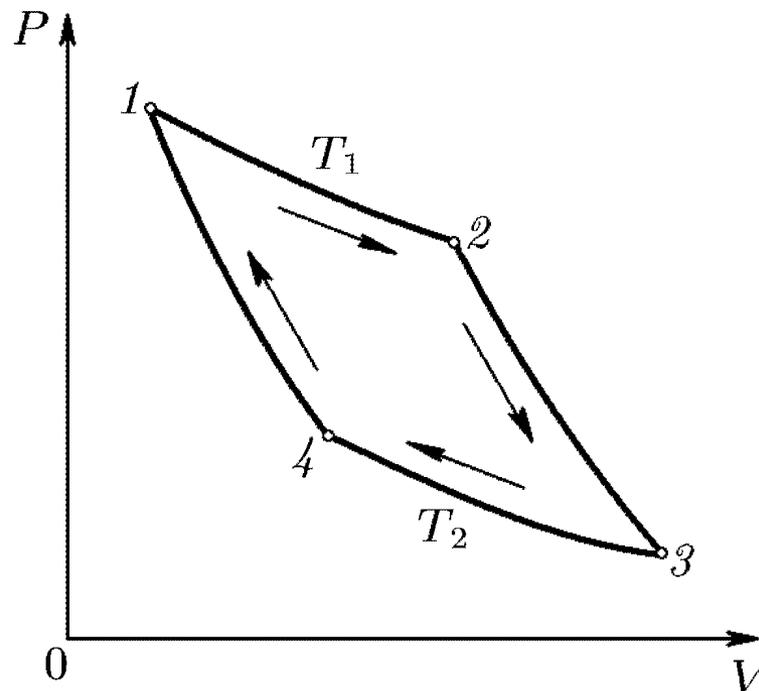
Графическое изображение процессов.



Процесс называется **обратимым**, если он может быть проведен в обратном направлении через те же промежуточные состояния, что и прямой процесс, причем во всех остальных телах никаких изменений произойти не должно. Если же это осуществить невозможно, то процесс называется необратимым. Равновесный процесс всегда обратим.

Необратимые процессы возникают благодаря трению, теплообмену при наличии конечных скачков температуры и давления, за счет процессов диффузии и т. д. Примеры необратимых процессов: вытекание газа из сосуда в вакуум, нагрев холодного тела при его контакте с горячим и т. д.

Круговой процесс (**цикл**). Круговым процессом или циклом называется процесс, заканчивающийся в той же точке (том же состоянии), в которой он начинался (т. е. его траектория замкнута).



Давлением P называют отношение модуля силы F , действующей перпендикулярно выделенной площадке, к её площади S

$$P = \frac{F}{S}$$

Единицы измерения давления

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / \text{м}^2,$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Н} / \text{м}^2$$

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм.рт.ст.} = 101325 \text{ Па},$$

$$1 \text{ мм.рт.ст.} = 1 \text{ торр} = 133 \text{ Па}.$$

Нормальное атмосферное давление – 760 мм.рт.ст.

Температура.

Любой совокупности атомов или молекул присуща **внутренняя энергия**, связанная с хаотическим **тепловым движением** образующих систему частиц и их **взаимодействием** друг с другом.

Внутренняя энергия зависит от «интенсивности» теплового движения. Для количественного описания интенсивности теплового движения вводится **температура.**

Температура и тепловое равновесие. **Термоскоп** и **термометр** (термометрическое тело и термометрическая величина).

Эмпирическая температурная шкала. Градуировка термометра по **реперным** температурным точкам.

Реперные точки - температуры **фазового равновесия** (точка плавления, точка кипения) при нормальном атмосферном давлении, температура тройной точки воды.

Характерные температуры некоторых веществ

Вещество	$T_{\text{отв}}, \text{K}$	$T_{\text{кип}}, \text{K}$	$T\text{T}, \text{K}$
Вода	273,15	373,15	273,16
Водород	14	20,28	13,81
Азот	63	77,34	63,14
Метан	90	115,76	91
Олово	504	1998	
Вольфрам	3410	5640	
Карбид тантала- гафния	4489		

$T_{\text{отв}}$ - температура отвердевания

$T_{\text{кип}}$ - температура кипения

$T\text{T}$ - тройная точка

Уравнение состояния вещества – соотношение, связывающее параметры состояния термодинамического равновесия.

Уравнение состояния упругого стержня

$$F = ES \left(\frac{L}{L_0 (1 + \alpha \cdot (T - T_0))} - 1 \right)$$

Уравнение состояния резинового стержня

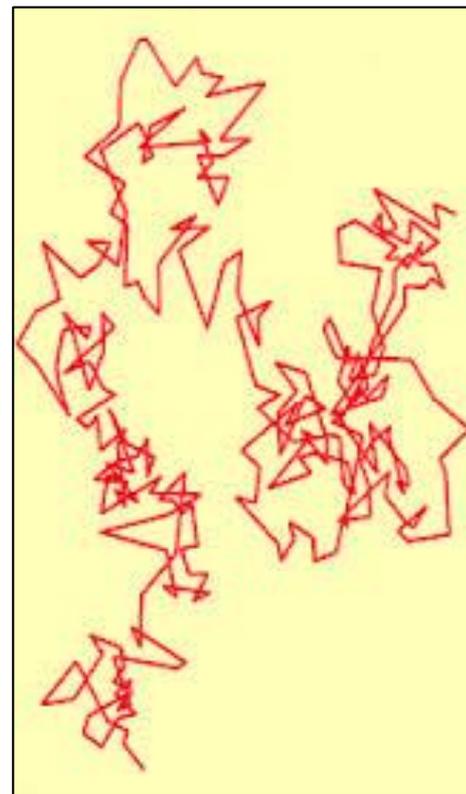
$$F = \frac{E(T)S}{3} \left(\frac{L}{L_0} - \left(\frac{L_0}{L} \right)^2 (1 + 3\alpha \cdot (T - T_0)) \right)$$

Уравнение состояния равновесного теплового излучения

$$P = \frac{1}{3} a T^4$$

3. Газообразное состояние вещества. Модель идеального газа в молекулярно-кинетической теории.

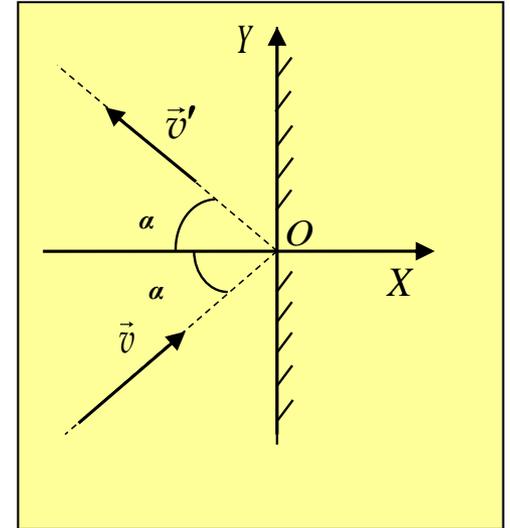
Газ (газообразное состояние) (от нидерландского **gas**, восходит к древнегреческому $\chi\alpha\omicron\varsigma$) — одно из четырёх агрегатных состояний вещества, характеризующееся очень слабыми связями между составляющими его частицами (молекулами, атомами или ионами), а также их большой подвижностью. Частицы газа почти свободно и хаотически движутся в промежутках между столкновениями. В результате столкновений скорость частиц беспорядочно изменяется по модулю и направлению.



Давление идеального газа в молекулярно-кинетической теории

Модель идеального газа:

- молекулы – упругие шарики;
- суммарный объём всех молекул мал по сравнению с объёмом сосуда, в котором они находятся;
- молекулы упруго взаимодействуют между собой и со стенками сосуда только во время столкновений.



$$\Delta p_x = -2m_0 v_x,$$

$$\Delta p_x = f_x \cdot \Delta t = -f_{cm,x} \cdot \Delta t$$

Давление идеального газа в молекулярно-кинетической теории

$$\Delta n(v_x), \quad dN = \Delta n(v_x) \cdot S v_x dt,$$

$$\sum_{v_x > 0} 2m_0 v_x \cdot dN = \sum_{v_x > 0} 2m_0 v_x \cdot \Delta n(v_x) S v_x dt = F_{cm,x} dt,$$

$$P = \frac{F_{cm,x}}{S} = 2m_0 \sum_{v_x > 0} v_x^2 \cdot \Delta n(v_x), \quad \Delta n(v_x) = \Delta n(-v_x),$$

$$P = \frac{F_{cm,x}}{S} = m_0 \sum_{v_x} v_x^2 \cdot \Delta n(v_x),$$

$$n = \sum_{v_x} \Delta n(v_x), \quad \overline{v_x^2} = \frac{\sum_{v_x} v_x^2 \cdot \Delta n(v_x)}{n},$$

Давление идеального газа в молекулярно-кинетической теории

$$\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = \overline{v^2}, \quad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2},$$

$$P = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$$

$$\overline{\varepsilon}_{\text{ном}} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$$

$$P = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon}_{\text{ном}} = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \overline{\varepsilon}_{\text{ном}}$$

$$PV = \frac{2}{3} \overline{E}_{\text{ном}}, \quad \overline{E}_{\text{ном}} = N \overline{\varepsilon}_{\text{ном}}$$

Среднее число ударов молекул о единицу поверхности
стенки в единицу времени

$$\Delta n(v), \quad d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta,$$

$$\Delta n(v) \frac{d\Omega}{4\pi} \quad - \text{число молекул, летящих в телесный угол } d\Omega$$

$$dN = \Delta n(v) \frac{d\Omega}{4\pi} \cdot v \cdot \cos \theta \cdot S \cdot dt,$$

$$dj = \frac{dN}{S \cdot dt} = \Delta n(v) \frac{d\Omega}{4\pi} \cdot v \cdot \cos \theta,$$

$$j = \sum_v \Delta n(v) \cdot v \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{2\pi \sin \theta d\theta}{4\pi} \cdot \cos \theta$$

$$n = \sum_v \Delta n(v), \quad \bar{v} = \frac{\sum_v v \cdot \Delta n(v)}{n}.$$

$$j = \frac{1}{4} n \bar{v}$$

4. Изопроцессы. Газовые законы. Уравнение Менделеева-Клапейрона. Закон Дальтона.

Моль – это количество вещества, содержащего столько же частиц (молекул), сколько содержится атомов в 12 г изотопа углерода ^{12}C . Это число называется постоянной Авогадро

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Атомная единица массы – это 1/12 массы атома изотопа углерода ^{12}C

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

Молярная (атомная) масса M вещества – масса одного моля. Она может быть определена по таблице Менделеева и химической формуле.

Молярная масса воды $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ г} / \text{моль}$.

Масса одной молекулы

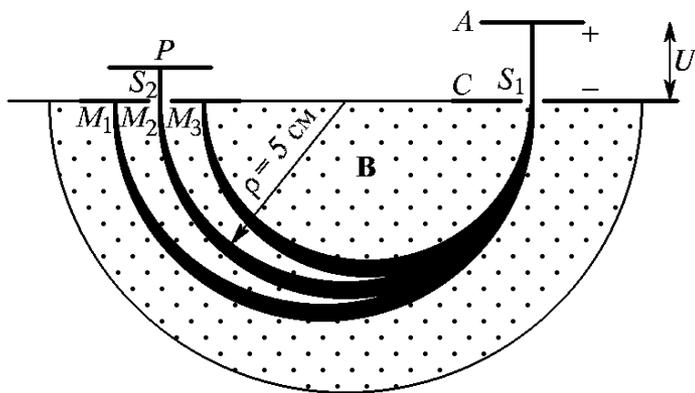
$$m_0 = \frac{M}{N_A}$$

Количество вещества

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m_0 N}{m_0 N_A} = \frac{m}{M}$$

Оценка «размера» молекулы

$$d \approx \sqrt[3]{V_0} = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}}$$
$$d \approx 10^{-10} \text{ м}$$



- схема масс-спектрометра

Изопроцессы – процессы, в которых один из параметров состояния остается неизменным.

Установленные опытным путем газовые законы:

Закон Бойля-Мариотта

$$PV = const \quad (t = const)$$

Закон Шарля

$$P = P_0 (1 + \alpha t) \quad (V = const)$$

Закон Гей-Люссака

$$V = V_0 (1 + \alpha t) \quad (P = const)$$

$$\alpha \approx \frac{1}{273} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Температурная шкала Кельвина

$$T = t + 273,15$$

$$V = \frac{V_0}{T_0} (273,15 + t) = \frac{V_0}{T_0} T, \quad \frac{V_0}{T_0} = \frac{V}{T}, \quad T_0 = 273,15$$

Уравнение Менделеева-Клапейрона

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

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

- универсальная газовая
постоянная

Закон Авогадро: *один моль любого газа при одинаковых условиях занимает одинаковый объём.*

При нормальных условиях (273,15 К и 101325 Па) объём одного моля газа равен **22,4 л.**

Закон Дальтона: *давление P смеси химически не взаимодействующих газов равно сумме их парциальных давлений P_i*

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$$

МКТ и уравнение Менделеева-Клапейрона

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

$$P = \frac{N}{V} \cdot \frac{R}{N_A} \cdot T = nkT = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_{\text{пост}}$$

$$\bar{\varepsilon}_{\text{пост}} = \frac{3}{2} kT$$

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

- постоянная
Больцмана

Воздух

В 1754 Джозеф Блэк экспериментально доказал, что воздух представляет собой смесь газов, а не однородное вещество.

Состав воздуха:

Вещество	Обозначение	По объёму, %	По массе, %
Азот	N_2	78,084	75,50
Кислород	O_2	20,9476	23,15
Аргон	Ar	0,934	1,292
Углекислый газ	CO_2	0,0314	0,046
Неон	Ne	0,001818	0,0014
Метан	CH_4	0,0002	0,000084
Гелий	He	0,000524	0,000073
Криптон	Kr	0,000114	0,003
Водород	H_2	0,00005	0,00008
Ксенон	Xe	0,0000087	0,00004

Физические свойства воздуха

Средняя относительная молярная масса 28,98 г/моль

Плотность сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении (101325 Па)

Температура, °С	-25	0	20	225
Значение плотности, кг/м ³	1,424	1,293	1,205	0,708

Средняя удельная теплоёмкость при постоянном давлении c_p
1,006 кДж/(кг·К)

Средняя удельная теплоёмкость при постоянном объёме c_v
0,717 кДж/(кг·К)

Скорость звука (при н.у.)
331 м/с (1193 км/ч)

Средний коэффициент теплового расширения в интервале температур 0 ÷ 100 °С

$3,67 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$

Средняя относительная молярная масса смеси газов

$$M = \frac{M_1 \nu_1 + M_2 \nu_2 + M_3 \nu_3 + \dots}{\nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \dots}$$

Плотность газа

$$\rho = \frac{PM}{RT}$$

Концентрация молекул азота при нормальных условиях

$$n = \frac{N}{V} = \frac{PN_A}{RT} = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

Среднее расстояние между молекулами

$$r = (n)^{-1/3} \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ см} \approx 10d$$

5. Барометрическая формула.

При наличии силового поля давления газа в разных пространственных точках может различаться.

$$P(z + dz)S + \rho S dz g = P(z)S$$

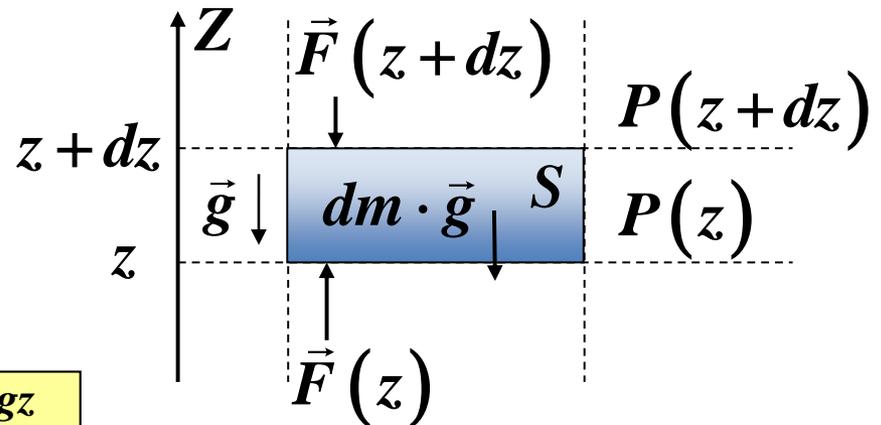
$$P(z + dz) \approx P(z) + \frac{dP}{dz} dz$$

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g$$

$$\rho = \frac{PM}{RT}$$

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{PMg}{RT}$$

$$P(z) = P_0 \cdot e^{-\frac{Mgz}{RT}}$$



Концентрация и
число частиц

$$n(z) = n_0 \cdot e^{-\frac{Mgz}{RT}} = n_0 \cdot e^{-\frac{m_0gz}{kT}},$$

$$dN = n \cdot dV = n_0 \cdot e^{-\frac{m_0gz}{kT}} \cdot dV$$

Вероятность обнаружить молекулу в объёме $dV = dx dy dz$ в произвольном силовом поле $U(x, y, z)$

$$dw = \frac{dN}{N} = A \cdot e^{-\frac{U(x, y, z)}{kT}} dV \quad - \text{распределение Больцмана}$$

Константа A определяется из условия нормировки

$$\int dw = A \int e^{-\frac{U(x, y, z)}{kT}} dV = 1, \quad A = \frac{1}{\int e^{-\frac{U(x, y, z)}{kT}} dV}$$

Средняя потенциальная энергия молекулы в однородном поле тяжести

$$\bar{\epsilon}_{pot} = m_0 g \bar{z} = \frac{\int_0^{\infty} m_0 g z n_0 \cdot e^{-\frac{m_0 g z}{kT}} \cdot S dz}{\int_0^{\infty} n_0 \cdot e^{-\frac{m_0 g z}{kT}} \cdot S dz} = kT$$

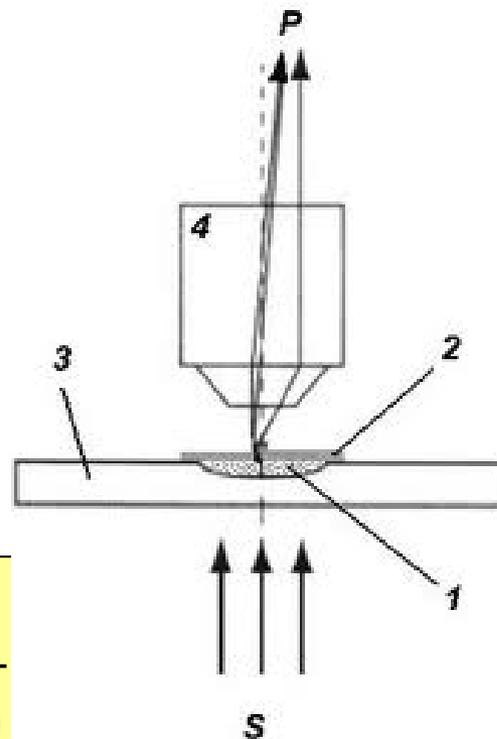
Опыт Перрена по определению числа Авогадро

$$n = n_0 \cdot e^{-\frac{(m - m_{\text{жс}})gz}{kT}}$$

$$k = \frac{(m - m_{\text{жс}})(z_2 - z_1)}{T \ln(n_1 / n_2)}$$

$$N_A = \frac{RT \ln(n_1 / n_2)}{mg \left(1 - \rho_{\text{жс}} / \rho_{\text{тв}}\right) (z_2 - z_1)}$$

$$N_A = (6,5 \div 7,2) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$



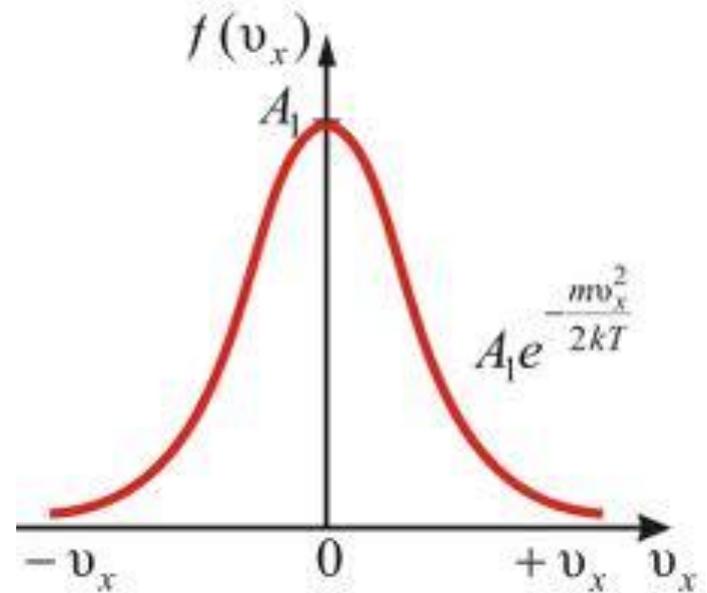
6. Распределение Максвелла

Гипотеза о молекулярном хаосе.

Распределение Максвелла для проекции скорости

$$f(v_x) = \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{1/2} \cdot e^{-\frac{m_0 v_x^2}{2kT}}$$

Роль столкновений между молекулами.



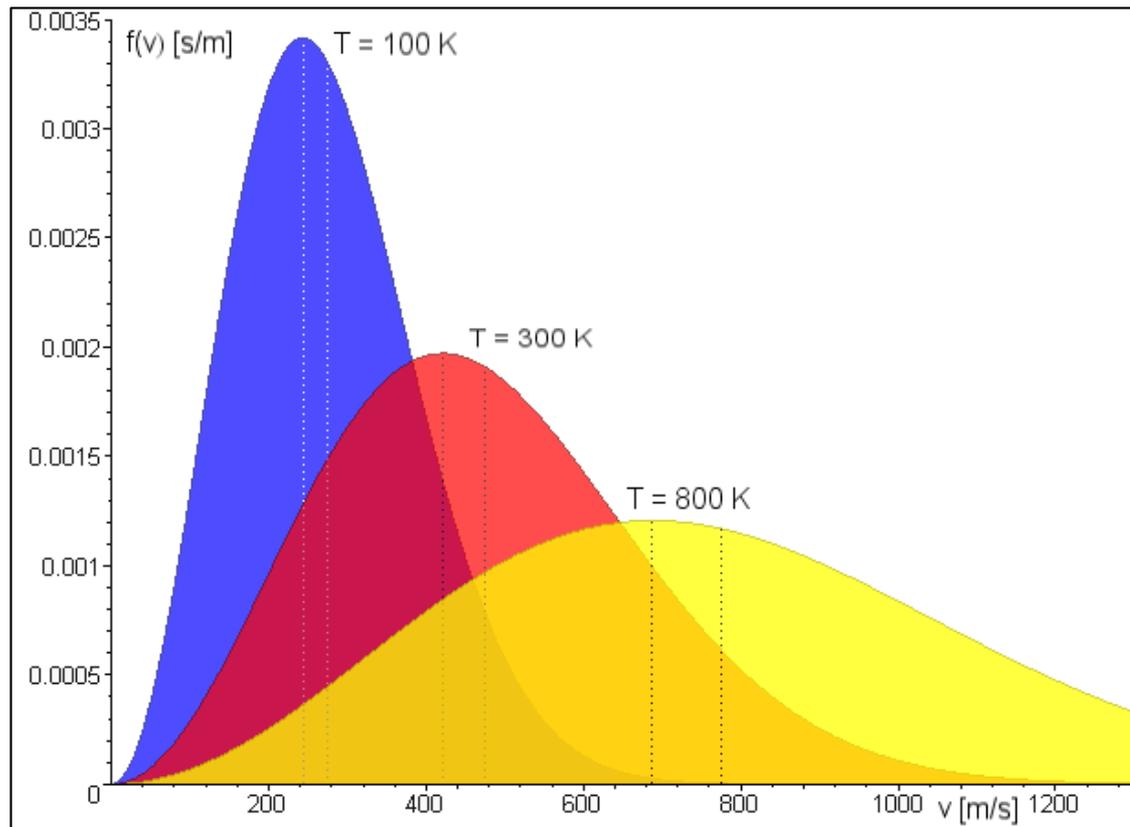
Распределение Максвелла для модуля скорости

$$F(v) = \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot 4\pi v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}$$

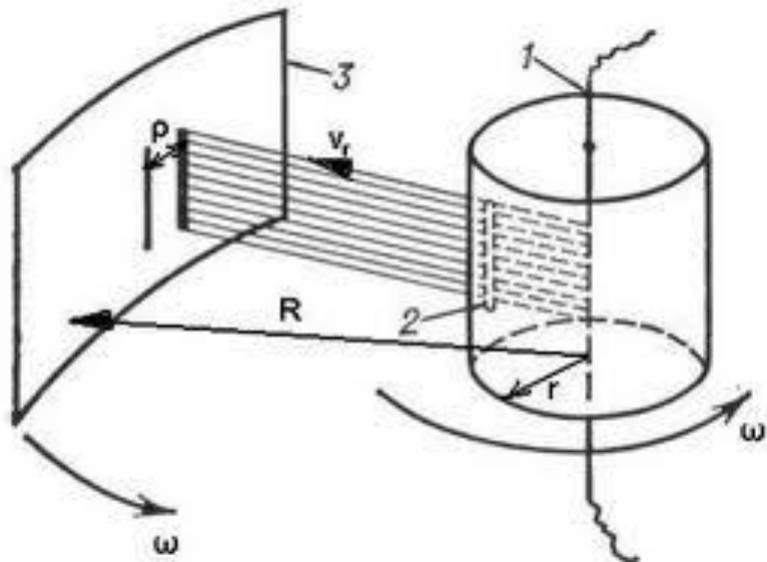
Число молекул со значением скорости от v до $v + dv$

$$dN = NF(v)dv = N \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot 4\pi v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} dv$$

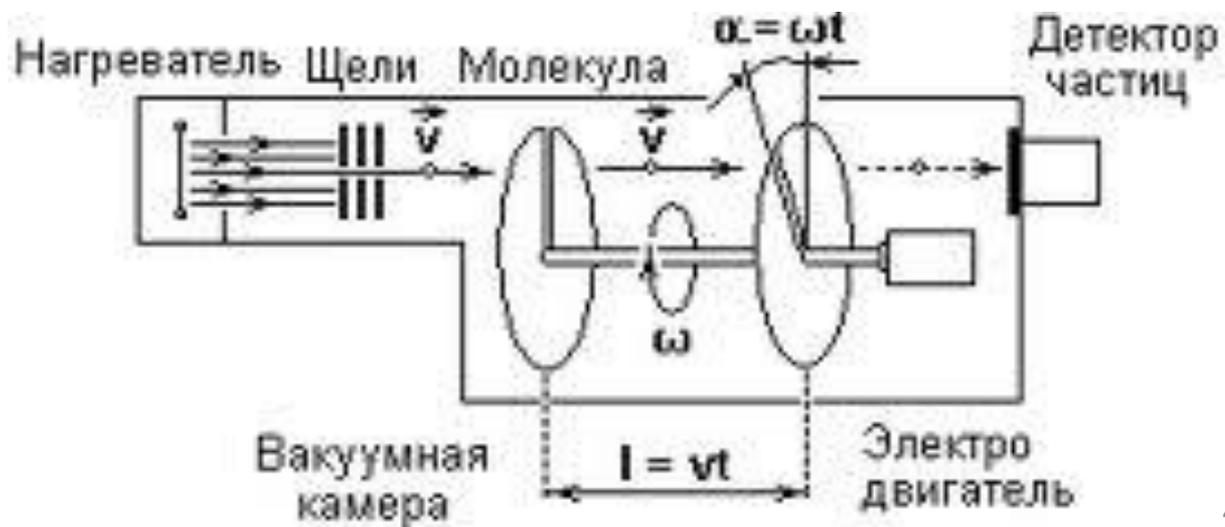
Распределение Максвелла для азота



Экспериментальная проверка распределения Максвелла



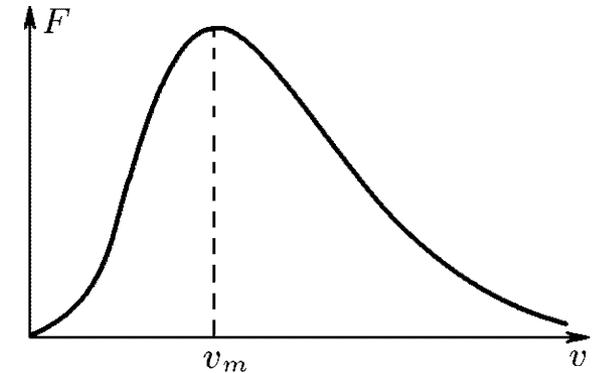
Опыты Штерна



Характерные скорости

Наиболее вероятная скорость

$$v_{н.в.} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$$



Средняя скорость

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \int v dN = \int v F(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}$$

Средняя квадратичная скорость

$$v_{кв} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\int v^2 F(v) dv} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

Средняя кинетическая энергия на одну степень свободы

$$\overline{\frac{m_0 v_x^2}{2}} = \frac{m_0}{2} \int v_x^2 \varphi(v_x) dv_x = \frac{kT}{2}$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения

$$\overline{\frac{m_0 v^2}{2}} = \frac{m_0}{2} \int v^2 \cdot 4\pi v^2 F(v) dv = \frac{3}{2} kT$$

7. Распределение Гиббса

$$N_i = A \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)$$

Константа A определяется из условия нормировки

$$\sum_{i=1}^m N_i = N, \quad A = N \left(\sum_{i=1}^m \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \right)^{-1}$$