

# Концепции и модели физики

Кузьмичев Сергей Дмитриевич



# Содержание лекции №1

1. Термодинамика и молекулярно-кинетическая теория (статистическая физика).
2. Система, микро- и макроскопическое состояние, термодинамическое равновесие, квазистатический процесс, обратимые и необратимые процессы, циклы.
3. Параметры состояния. Температура. Уравнение состояния термодинамической системы.
4. Уравнение Менделеева-Клапейрона. Закон Дальтона.
5. Модель идеального газа в МКТ.
6. Идеальный газ во внешнем поле. Барометрическая формула и её вероятностная трактовка. Распределение Больцмана.
7. Распределение Максвелла. Характерные скорости.
8. Распределение Гиббса.
9. Закон равномерного распределения кинетической энергии по степеням свободы.

***7 вопросов пока кипит чайник.***



**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 одинаковых 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** 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.

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.).









**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  $1 \text{ см}^3$  которого при **нормальных условиях** содержится

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

молекул (число Лошмидта).

**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 (давление  $P$ , объём  $V$ , температура  $T$  и, быть может, еще некоторыми другими).

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

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.

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** на плоский участок поверхности называют отношение силы давления, действующей на этот участок, к площади участка

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

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**.

Характеризует степень «нагретости» тел.

Температура и тепловое равновесие.

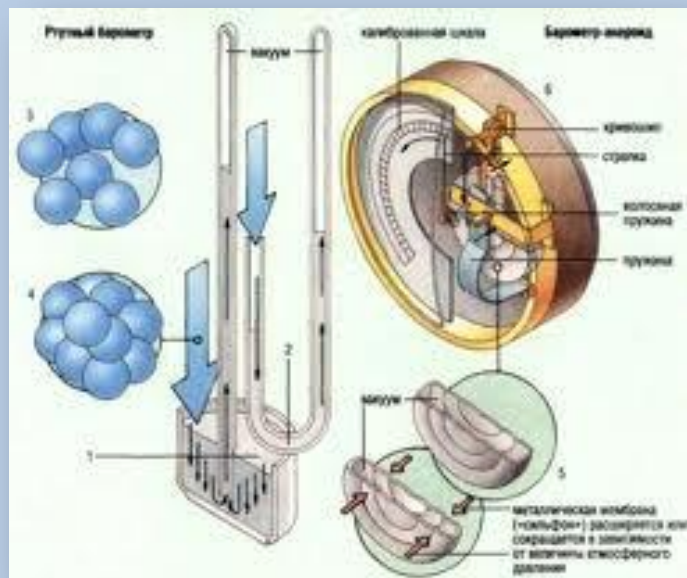
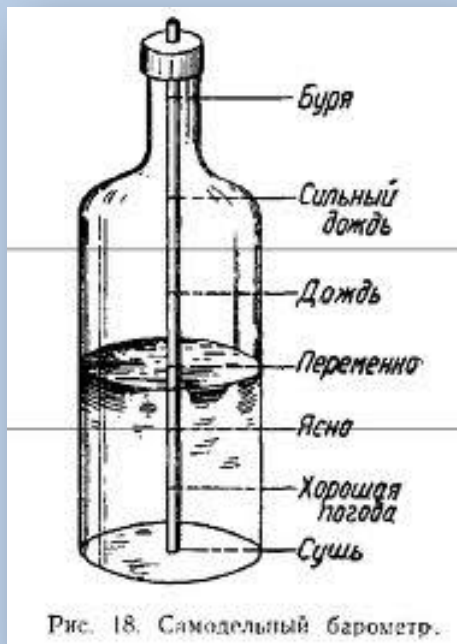
**Термоскоп** и **термометр** (термометрическое тело и термометрическая величина).

**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 <sub>3</sub> , К	T <sub>К</sub> , К	T <sub>Т</sub> , К
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		



**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

$$F = \frac{E T \sigma_0}{3} \left( \frac{L}{L_0} - \left( \frac{L_0}{L} \right)^2 (1 + 3\alpha \cdot T - T_0) \right)$$

Уравнение состояния равновесного теплового излучения

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

**Моль** – это количество вещества, содержащего столько же частиц (молекул), сколько содержится атомов в 12 г изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ . 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  $^{12}\text{C}$

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

**Молярная (атомная) масса  $M$  вещества** – масса одного моля. Может быть определена по таблице Менделеева и химической формуле (молярная масса воды  $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ г / моль}$ ).

**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**

$$r \approx \sqrt[3]{V_0} = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}}$$



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

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

Температурная шкала Кельвина  $T = t + 273,15$

**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 равен **22,4 л.**

**Газовый термометр.**

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

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

## 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

## Символы Воздуха



**Первый символ – изображение стихии воздух.**

**Второе – алхимический символ воздуха.**

**Третье изображение – триграмма воздуха в Книге Перемен**

# Физические свойства воздуха

Средняя относительная молярная масса 28,98 г/моль

Плотность сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении (101325 Па)

Температура, °C

-25      0      20      225

Значение плотности, кг/м<sup>3</sup>

1,424   1,2929   1,2047   0,7083

Средняя удельная теплоёмкость при постоянном давлении  $c_p$

1,006 кДж/(кг·K)

Средняя удельная теплоёмкость при постоянном объёме  $c_v$

0,717 кДж/(кг·K)

Скорость звука (при н.у.)

331 м/с (1193 км/ч)

Средний коэффициент теплового расширения в интервале температур 0—100 °C

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

**Средняя относительная молярная масса воздуха как 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**

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

**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**

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

# Давление идеального газа в молекулярно-кинетической теории

**Модель идеального газа:** малость суммарного объёма всех молекул по сравнению с объёмом сосуда, в котором они находятся; энергией взаимодействия можно пренебречь по сравнению с кинетической энергией.

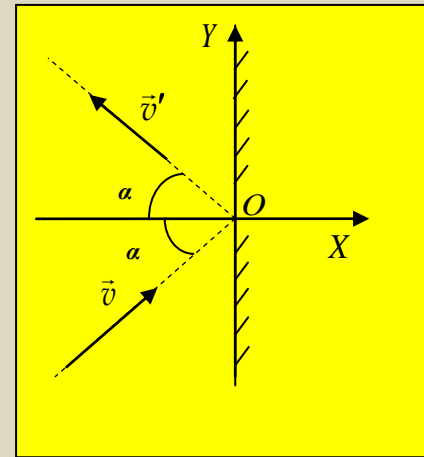
$$\Delta p_x = 2m v_x, \quad \Delta n \quad v_x, \quad dN = \Delta n \quad v_x \quad S v_x dt$$

$$\sum_{v_x > 0} 2m v_x \cdot \Delta n \quad v_x \quad S v_x dt = F_x dt,$$

$$P = \frac{F_x}{S} = 2m \sum_{v_x > 0} v_x^2 \cdot \Delta n \quad v_x, \quad \Delta n \quad v_x = \Delta n \quad -v_x,$$

$$P = \frac{F_x}{S} = m \sum_{v_x} v_x^2 \cdot \Delta n \quad v_x,$$

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



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

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

$$\varepsilon_{nocm} = \frac{m \overline{v^2}}{2}$$

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

$$PV = \frac{2}{3} \overline{E}_{nocm}$$

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

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

$$\bar{\epsilon}_{\text{посм}} = \frac{3}{2} kT$$

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



## Среднее число ударов молекул о стенку

$$\Delta n_v, \quad d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta,$$

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

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

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

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

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

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

# Барометрическая формула.

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

$$P_{z+dz} S + \rho S dz g = P_z S$$

$$P_{z+dz} \approx P_z + \frac{dP}{dz} dz$$

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

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

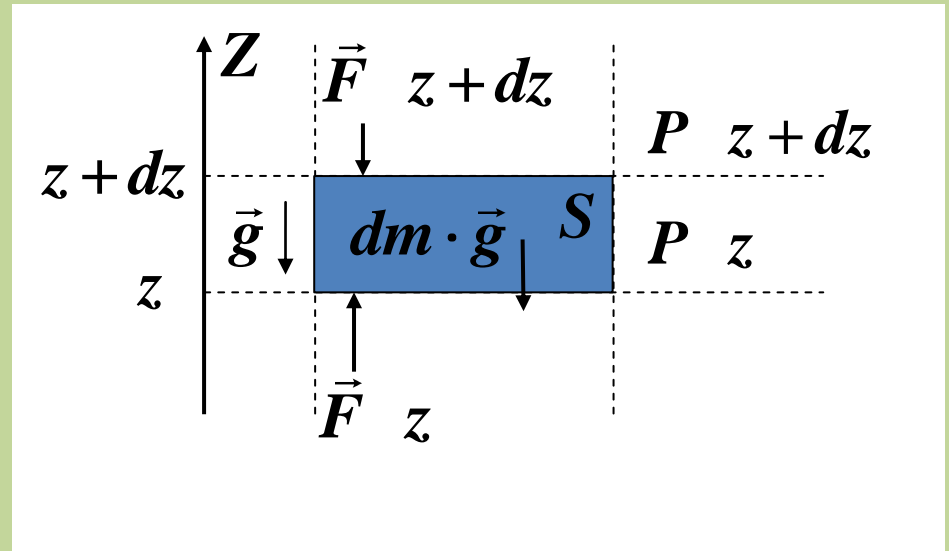
$$\frac{dP}{dz} = -\frac{PMg}{RT}$$

$$P_z = P_0 \cdot e^{-\frac{Mgz}{RT}}$$

Для концентрации и числа частиц

$$n_z = n_0 \cdot e^{-\frac{Mgz}{RT}} = n_0 \cdot e^{-\frac{m_0gz}{kT}},$$

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



В произвольном силовом поле  $U(x, y, z)$  вероятность молекулы находиться в объеме  $dV = dxdydz$

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

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

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

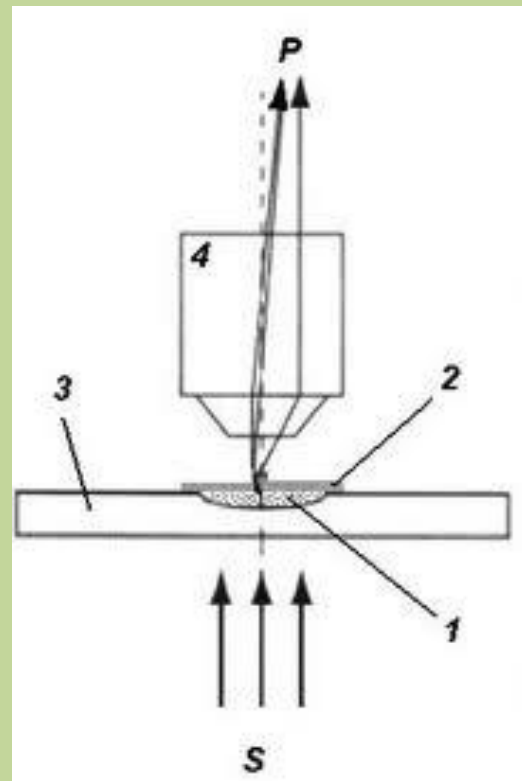
# Опыт Перрена по определению числа Авогадро

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

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

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

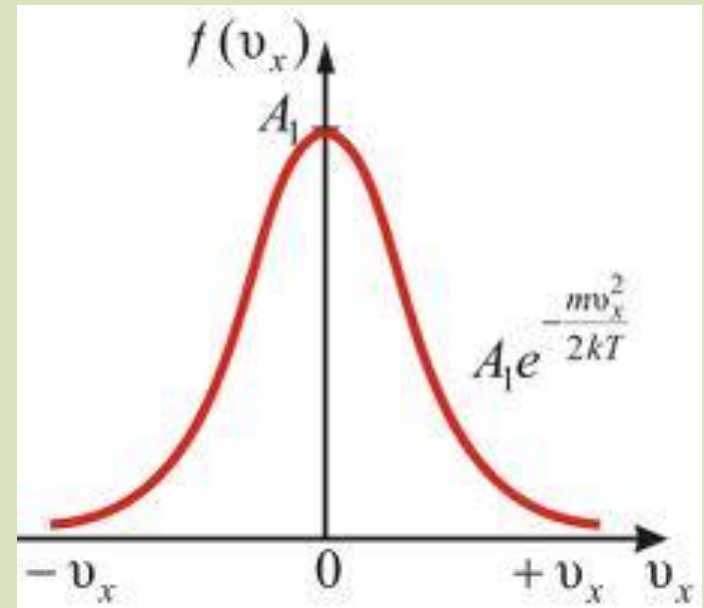
$$N_A = 6,5 \div 7,2 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$



# Распределение Максвелла

Распределение Максвелла  
для проекции скорости

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



# Распределение Максвелла

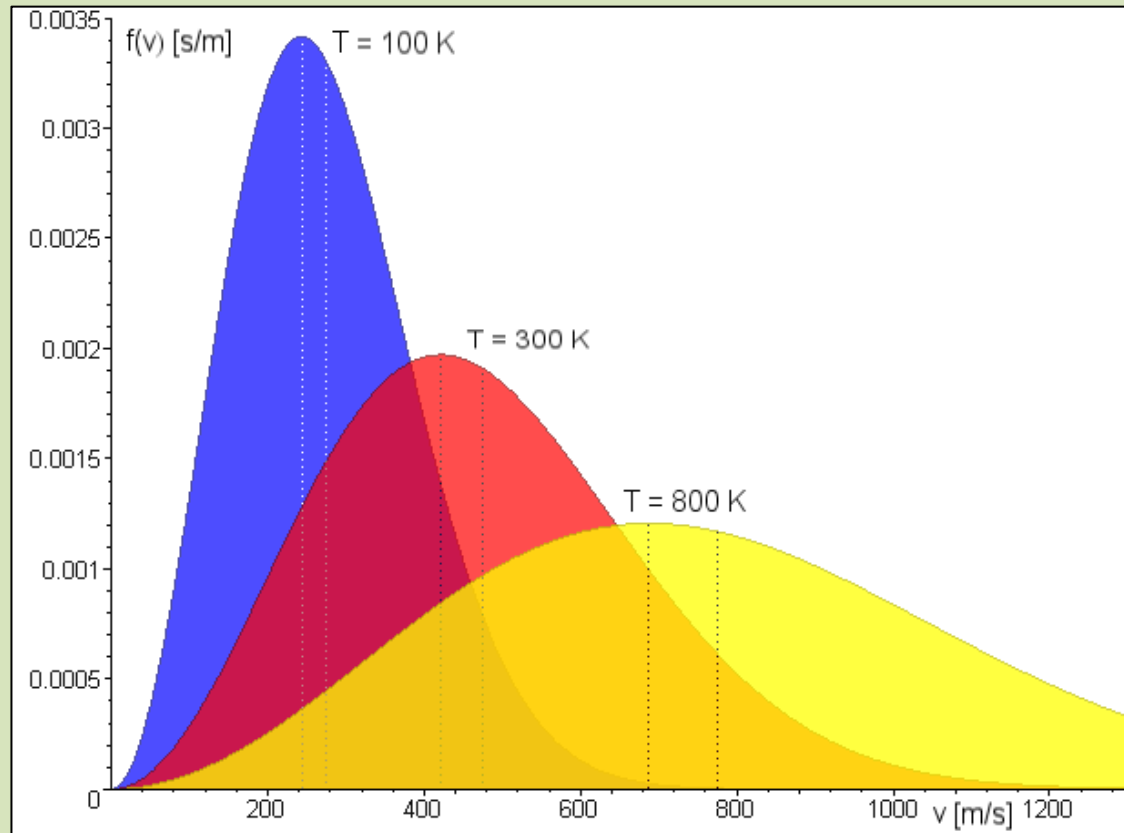
Распределение Максвелла для модуля скорости

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

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

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

# Распределение Максвелла для азота







# Характерные скорости

Наиболее вероятная скорость

$$v_{н.в.} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

Средняя скорость

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

Средняя квадратичная скорость

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

Средняя кинетическая энергия на одну степень свободы

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

Средняя кинетическая энергия поступательного движения

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

# Распределение Гиббса

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

Константа  $A$  определяется из условия нормировки

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