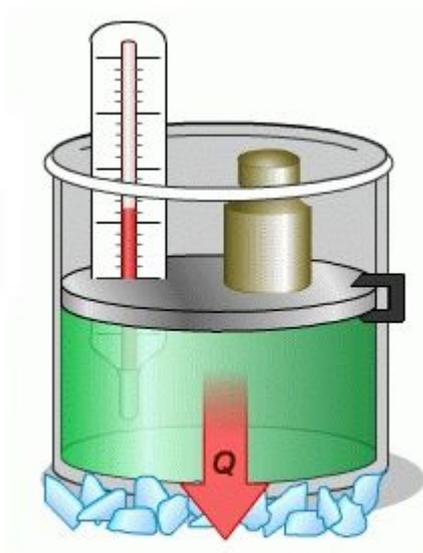


Молекулярная физика и термодинамика



- Основы молекулярно-кинетической теории
- Статистические распределения
- Явления переноса в газах
- Термодинамика
- Реальные газы

Определения

Молекулярная физика

раздел физики, в котором изучаются:

- **состояние и поведение макроскопических объектов при внешних воздействиях**
 - нагревание
 - деформация
 - действие электромагнитного поля

- **процессы переноса**
 - теплопроводность
 - вязкость
 - диффузия

- **фазовые превращения**
 - кристаллизация
 - плавление
 - испарение и др.

Макроскопические объекты

Объекты, состоящие из большого количества частиц (атомов, молекул)

Задача МКТ

не описание движения отдельных частиц, а **определение макроскопических параметров системы** (масса, объем, давление, температура и др.)

Методы исследования

Молекулярная физика

разделы физики, изучающие макроскопические процессы в телах, связанные с движением большого количества содержащихся в телах атомов и молекул

изучает строение и свойства вещества, исходя из молекулярно-кинетических представлений

основные положения МКТ



Статистический метод исследования



использует
УСРЕДНЕННЫЕ значения величин



МКТ часто называют
статистической физикой

Термодинамика (ТД)

изучает общие свойства макросистем в состоянии ТД равновесия и процессы перехода между этими состояниями
два начала (фундаментальные законы)

Термодинамический метод исследования

- устанавливает связи между макро- свойствами вещества
- НЕ изучает микростроение вещества
- НЕ изучает механизм явлений

Атомно-молекулярное строение вещества

Физическое тело

совокупность атомов и молекул

Атомы и молекулы хаотически движутся

Интенсивность движения зависит от температуры T

Доказательство существования теплового хаотического движения молекул

броуновское движение (Броун, 1827)

Броуновское движение

беспорядочное движение малых частиц, взвешенных в жидкости или газе, под действием ударов молекул окружающей среды



Роберт Броун

1773-1858,
Шотландия

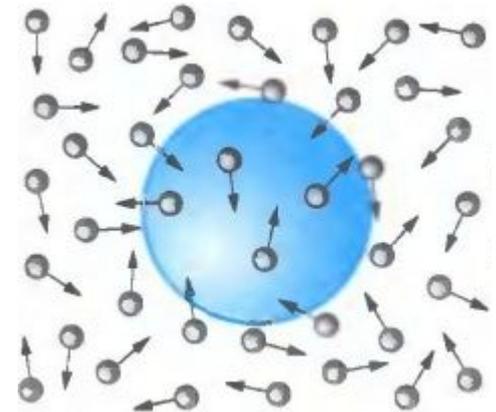
В опыте Броуна

диаметр частиц:

$$d \approx 10^{-6} \text{ м}$$

размер молекул:

$$d \approx 10^{-10} \text{ м}$$



МКТ для количественного описания броуновского движения создана в 1905 г. А.Эйнштейном

Основные положения МКТ

МКТ – молекулярно-кинетическая теория

1. Все тела состоят из молекул
2. Молекулы непрерывно движутся
3. Молекулы взаимодействуют между собой и со стенками сосуда

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

обладают
потенциальной
энергией



$$U = E_k + E_p$$

внутренняя
энергия
газа

энергия
движения
молекул

энергия
взаимодействия
молекул

Подробнее – позже

**Задача
МКТ**

**Установление связи между
микроскопическими параметрами**
(масса, скорость, кинетическая энергия молекул)
и макроскопическими параметрами
(давление, объем, температура)

Основные понятия

Количество
вещества

$$\nu = \frac{N}{N_A}$$

число Авогадро

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Моль

количество вещества, содержащее столько же частиц, сколько содержится атомов в 0,012 кг углерода ^{12}C

При нормальных условиях ($t=0^\circ\text{C}$, $P=10^5\text{Па}$) моль любого газа занимает **объем 22,4 л**

Молярная масса

масса одного моля $\mu = m_0 N_A$

Термодинамическая
система

совокупность макроскопических тел, которые **взаимодействуют и обмениваются энергией** как между собой, так и с другими телами

Термодинамические
параметры

давление
P

объем
V

температура
T

Основные понятия

Идеальный газ

Основная
физическая модель
МКТ

- Размеры атомов (молекул) – пренебрежимо малы
- Силы межмолекулярного взаимодействия отсутствуют
- Взаимодействия – абсолютно упругие
- Атомы гораздо чаще сталкиваются между собой, чем со стенками сосуда

Газы можно считать идеальными с достаточной степенью точности, когда рассматриваются их состояния, далекие от областей фазовых переходов

Основные параметры

Реперные точки

- абсолютный нуль температуры – точка нулевого давления газа
- температура тройной точки воды: лед, вода и пар – в тепловом равновесии

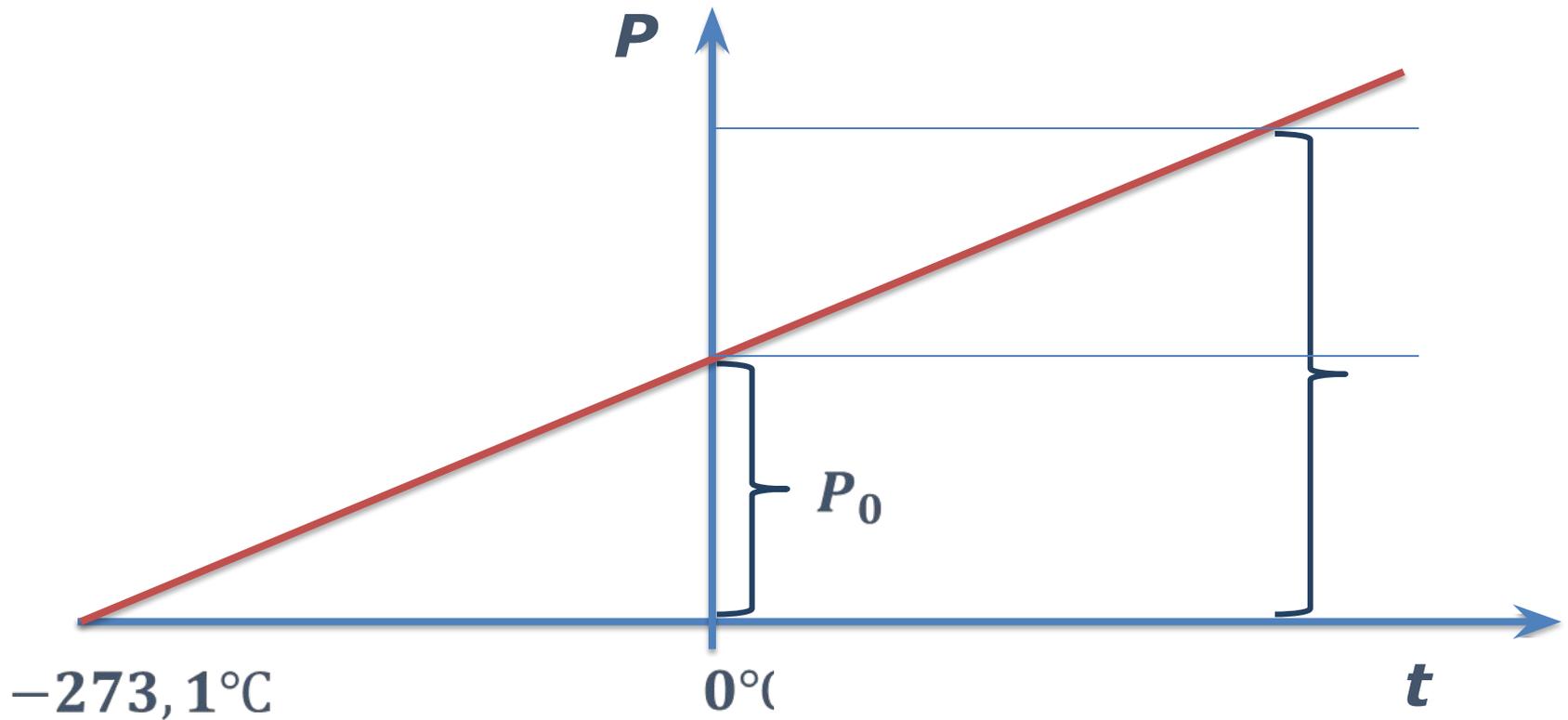
0,01° С в шкале
273,16 К Кельвина

$$T = 273^{\circ}\text{C} + t^{\circ}\text{C}$$

$$T_F = \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32^{\circ}$$

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(T_F - 32^{\circ})$$

Температура



Равновесное состояние газа

Равновесное состояние газа

Состояние, когда все **термодинамические параметры** (P, V, T) **остаются неизменными** при неизменных условиях

Равновесный процесс

процесс, состоящий из непрерывной последовательности равновесных состояний

Только **равновесный процесс** можно изобразить **на диаграмме состояний**

Законы, установленные опытным путем

Закон Бойля-Мариотта (1662-1676)

$T = const$ Изотермический процесс

$$PV = const \quad \Rightarrow \quad P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2}$$

$$PV = const$$

Закон Гей-Люссака (1802)

$P = const$ Изобарный (изобарический) процесс

$$\frac{V}{T} = const \quad \Rightarrow \quad V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1}$$

$$V = V_0 \alpha T$$

$$\alpha = \frac{1}{273,15^\circ}$$

Закон Шарля (1787)

$V = const$ Изохорный (изохорический) процесс

$$\frac{P}{T} = const \quad \Rightarrow \quad P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1}$$

коэффициент,
одинаковый
для всех газов

$$P = P_0 \alpha T$$

Роберт Бойль и Эдм Мариотт

Edme Mariotte



1620-1684,
Франция

Аббат, физик

Robert Boyle



1627-1691,
Англия

**Англо-ирландский
натурфилософ,
философ, химик
и богослов**

Жозеф Луи Гей-Люссак

- Французский физик и химик, ученик К.Л.Бертолле
- Открыл закон объемных отношений при реакциях между газами
- Иностраннный почетный член Петербургской Академии наук (1826)
- Его имя внесено в список величайших ученых Франции, помещенный на первом этаже Эйфелевой башни

Joseph Louis Gay-Lussac



1778-1850,
Франция



Жак Александр Сезар Шарль

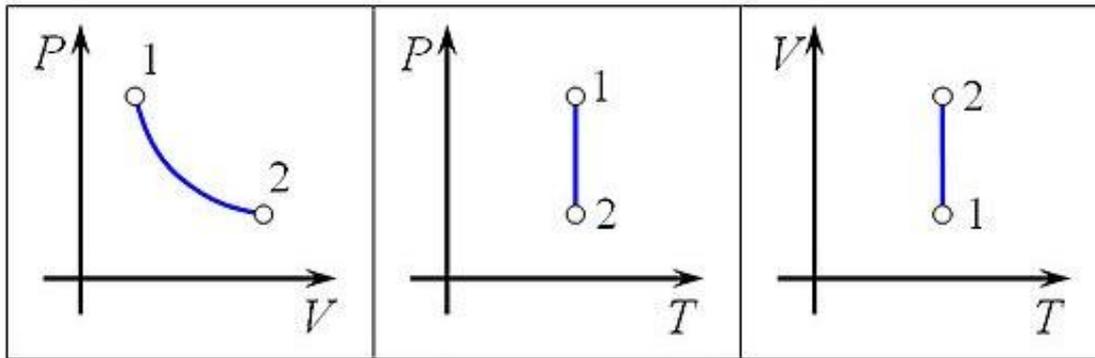
Jacques Alexandre César Charles



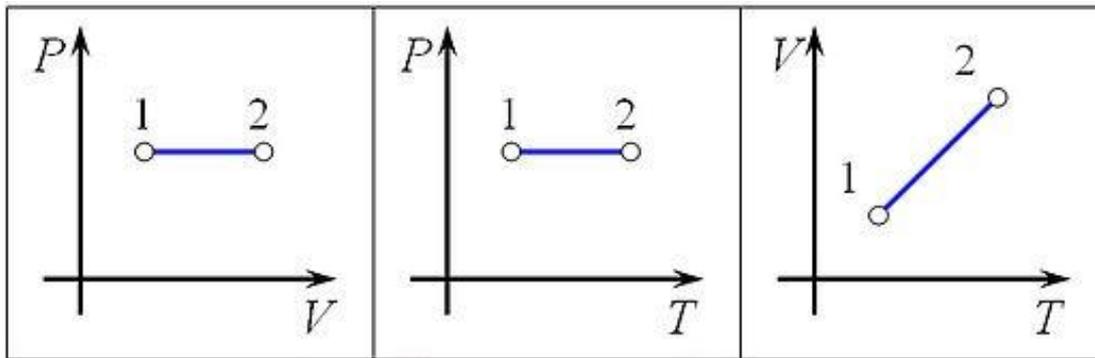
1746-1823
Франция

- Изобретатель наполняемого водородом, или другим газом легче воздуха, **воздушного шара**, получившего по имени изобретателя название **шарльер**, в противоположность монгольфьеру
- Первый его воздушный шар, наполненный водородом, поднялся в Париже с Марсова поля 2 августа 1783 года; в том же году 3 декабря он предпринял свое первое воздушное путешествие
- Открыл названный его именем физический закон:
при постоянном объеме давление идеального газа прямо пропорционально его абсолютной температуре

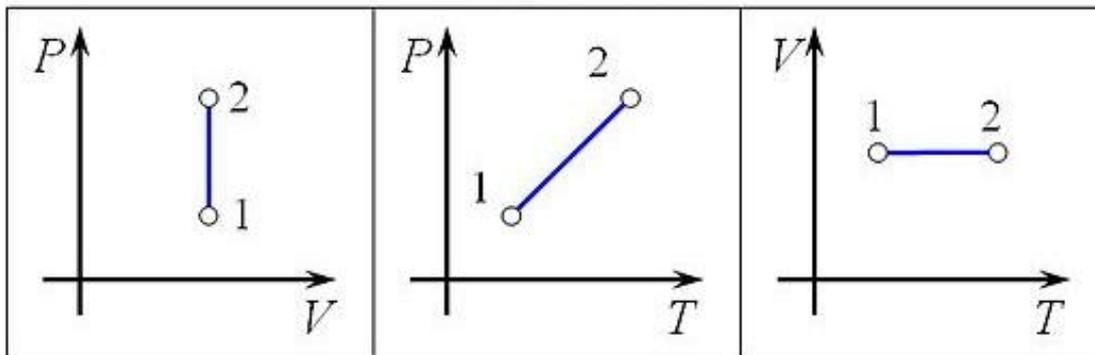
Графики изопроцессов



Изотермический процесс



Изобарный (изобарический) процесс



Изохорный (изохорический) процесс

Уравнение состояния идеального газа

Уравнение Менделеева-Клапейрона

$$PV = \frac{m}{\mu} RT$$

m – масса газа
 μ – молярная масса

для произвольной массы газа

при нормальных

$$t = 0^\circ\text{C}$$

условиях: $P = 1\text{атм} = 10^5\text{Па}$ $T = 273\text{К}$

1 моль газа занимает один и тот же объем

$$V = 22,4\text{ л}$$

Концентрация молекул

$$n = \frac{N}{V}$$

Количество вещества (количество молей)

$$\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A}$$

Давление 1 моля идеального газа при н.у.

$$P = \frac{m}{\mu} \frac{RT}{V} = \frac{N}{N_A} \frac{RT}{V} = nkT \Rightarrow$$

$$P = nkT$$

$$R = 8,31\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$$

универсальная газовая постоянная

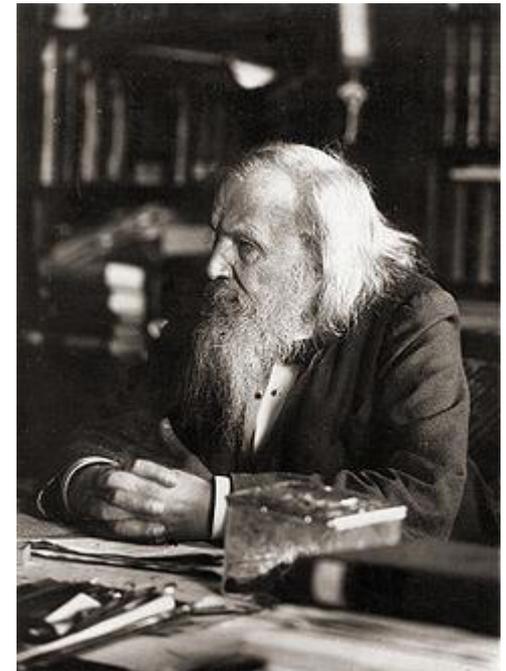
$$k = \frac{R}{N_A} =$$

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

постоянная Больцмана

Дмитрий Иванович Менделеев

- Великий русский ученый-энциклопедист – сферы научных интересов:
 - Химия
 - Физика
 - Физическая химия
 - Метрология
 - Экономика
 - Технология
 - Приборостроение
 - Воздухоплавание
 - Педагогика
- Наиболее известное открытие – **периодический закон химических элементов**

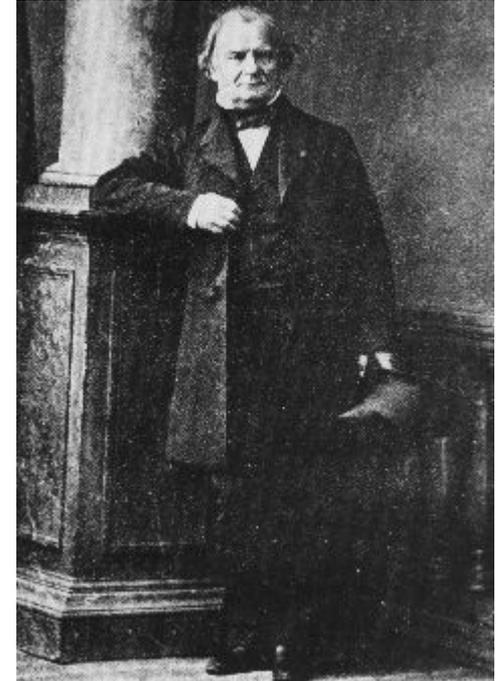


1834-1907,
Россия
(Санкт-Петербург)

Бенуа Поль Эмиль Клапейрон

Benoît Paul Émile Clapeyron

- **Французский физик и инженер**
- Учился в парижской политехнической школе
- Был профессором в институте путей сообщения (Петербург, 1820-1830)
- Вернувшись во Францию, Клапейрон участвовал в постройке многих железных дорог и составил множество проектов по постройке мостов и дорог
- **1834 г. – вывел основное уравнение состояния идеального газа** (обобщение з-нов Б-М, Г-Л и Авогадро), **обобщенное** в 1874 г. **Менделеевым**
- Вывел **уравнение, устанавливающее связь между температурой плавления и кипения вещества и давлением**, термодинамически обоснованное в 1851 г. Клаузиусом (**уравнение Клапейрона-Клаузиуса**)



1799-1864,
Франция

Следствия из уравнения Менделеева-Клапейрона

Давление 1 моля идеального газа при н.у.

$$P = nkT$$



1 закон

**Закон
Авогадро**

в равных объемах различных газов, находящихся при одинаковых условиях (давлениях и температурах) содержится **одинаковое количество молекул**

2 закон

**Закон
Дальтона**

в состоянии теплового равновесия **давление смеси химически не взаимодействующих идеальных газов равно сумме парциальных давлений** отдельных газов, входящих в смесь

$$P_i = n_i kT$$

для смеси
газов

$$P = \sum P_i = kT \sum n_i$$

**Парциальное
давление**

давление, которое создает определенная (i -я) компонента смеси, находясь при той же температуре и в том же объеме, что и смесь

Основное уравнение МКТ

Рассмотрим равновесную систему –
идеальный газ в состоянии невесомости

объем V

количество молекул газа N

сила, с которой молекулы
действуют на стенку

$$F = \frac{P}{\Delta\tau}$$

количество молекул,
ударившихся о стенку
за время $\Delta\tau$

$$v_x \Delta\tau \frac{n}{2}$$

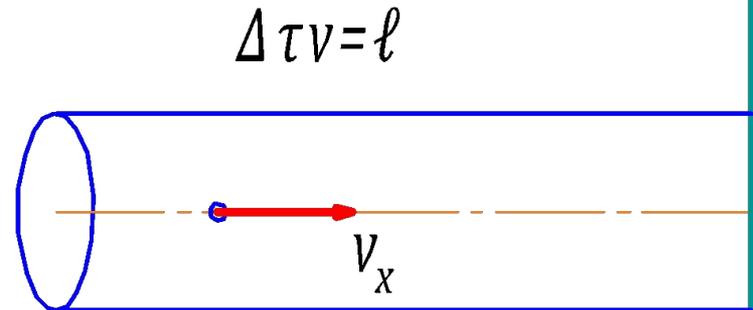
Изменение импульса
отдельной молекулы
в результате упругого
соударения со стенкой

$$p = 2mv_x$$

m – масса молекулы

Изменение импульса
всех молекул после
соударения со стенкой

$$\vec{p}_\Sigma = 2mv_x \cdot \frac{n}{2} \cdot S\Delta\tau v_x = nmS\Delta\tau v_x^2$$



Основное уравнение МКТ

Давление, оказываемое молекулами на стенку

$$P = \frac{F}{S} = \frac{p}{\Delta\tau S} = \frac{nmS\Delta\tau v_x^2}{\Delta\tau S} = nmv_x^2$$

Направления движения каждой молекулы равноправны

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = 3v_x^2$$

Скорости молекул различны

⇒ необходимо использовать средние значения

$$\langle v^2 \rangle = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}$$

$$P = nm\langle v_x \rangle^2 = \frac{1}{3}nm\langle v^2 \rangle$$



$$\frac{m\langle v^2 \rangle}{3} = kT$$

$$P = nkT$$

Учитывая, что $\frac{m\langle v^2 \rangle}{2} = \langle \varepsilon \rangle$

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2}kT$$

средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа

Основное уравнение МКТ

Давление, оказываемое молекулами на стенку

$$P = \frac{F}{S} = \frac{p}{\Delta\tau S} = \frac{nmS\Delta\tau v_x^2}{\Delta\tau S} = nmv_x^2$$

Направления движения каждой молекулы равноправны

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = 3v_x^2$$

Скорости молекул различны

⇒ необходимо использовать средние значения

$$\langle v^2 \rangle = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}$$

⇒
$$P = nm\langle v_x \rangle^2 = \frac{1}{3}nm\langle v^2 \rangle = \frac{2}{3}n\langle \varepsilon \rangle$$

Учитывая, что

$$\frac{m\langle v^2 \rangle}{2} = \langle \varepsilon \rangle$$

$$P = \frac{2}{3}n\langle \varepsilon \rangle$$

Основное уравнение МКТ

Взаимосвязь кинетической энергии и температуры

Основное уравнение МКТ

$$P = \frac{2}{3} n \langle \epsilon \rangle$$

Уравнение состояния идеального газа

$$P = nkT$$

$$\Rightarrow \frac{2}{3} \langle \epsilon \rangle = kT$$

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{3}{2} kT = \frac{i}{2} kT$$

число степеней свободы молекулы

средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа пропорциональна температуре

Температура – мера средней кинетической энергии молекул

Температура – понятие статистическое

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2i_{\text{кол}}$$

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{m \langle v^2 \rangle}{2} \quad \langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Средняя квадратичная скорость

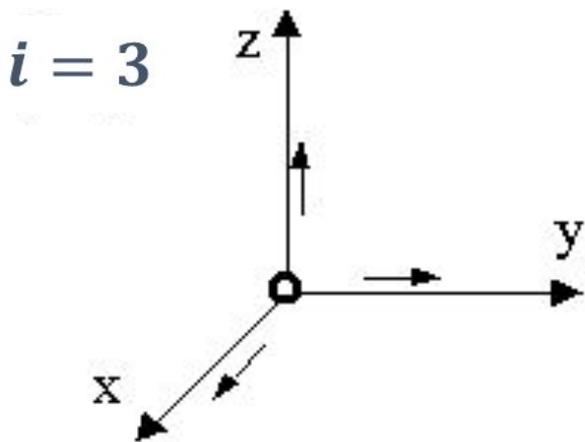
при н.у.

- для O_2 - $v \approx 425$ м/с,
- для H_2 - $v \approx 1700$ м/с
- Водяной пар - $v \approx 570$ м/с

Число степеней свободы

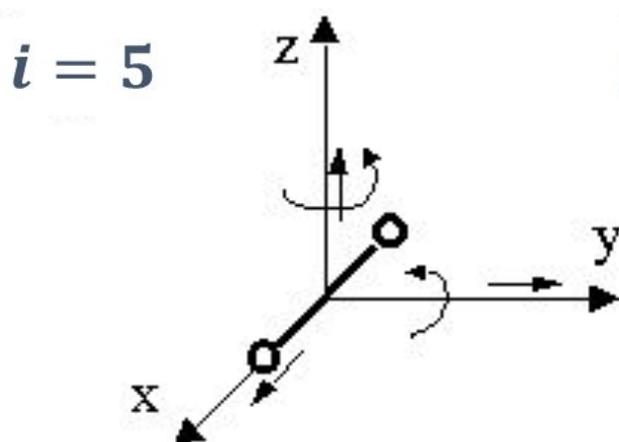
Число степеней свободы молекулы i

Количество независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве

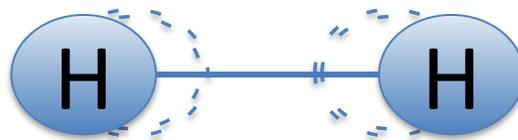


одноатомные молекулы

$$i = 3$$

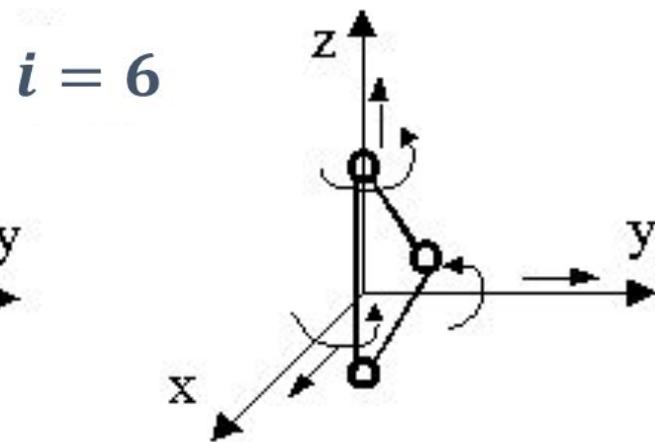


двухатомные молекулы



жесткая связь $i = 3 + 2 = 5$

нежесткая связь $i = 3 + 2 + 1 = 6$



трехатомные молекулы

$$i = 3 + 2 + 1 = 6$$

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2i_{\text{кол}}$$

Распределение тепловой энергии по степеням свободы молекул

Число степеней свободы

поступательного движения молекулы $i = 3$

Средняя энергия

поступательного движения молекул $\bar{\varepsilon} = \langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT$

Энергия,

приходящаяся

на 1 степень свободы

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} kT$$

Энергия,

в общем случае

$$\varepsilon = \frac{i}{2} kT$$

Итак,

Средняя кинетическая энергия
поступательного движения
молекул идеального газа

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT$$



Физический смысл температуры:

Температура – статистический параметр,
характеризующий
среднюю кинетическую энергию молекул

$$P = nkT$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT$$



$$P = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon \rangle$$

Основное уравнение МКТ

устанавливает связь между
давлением газа, концентрацией
и энергией движения молекул

$n = \frac{N}{V}$ концентрация –
количество молекул
в единице объема

Элементы статистической физики: некоторые понятия

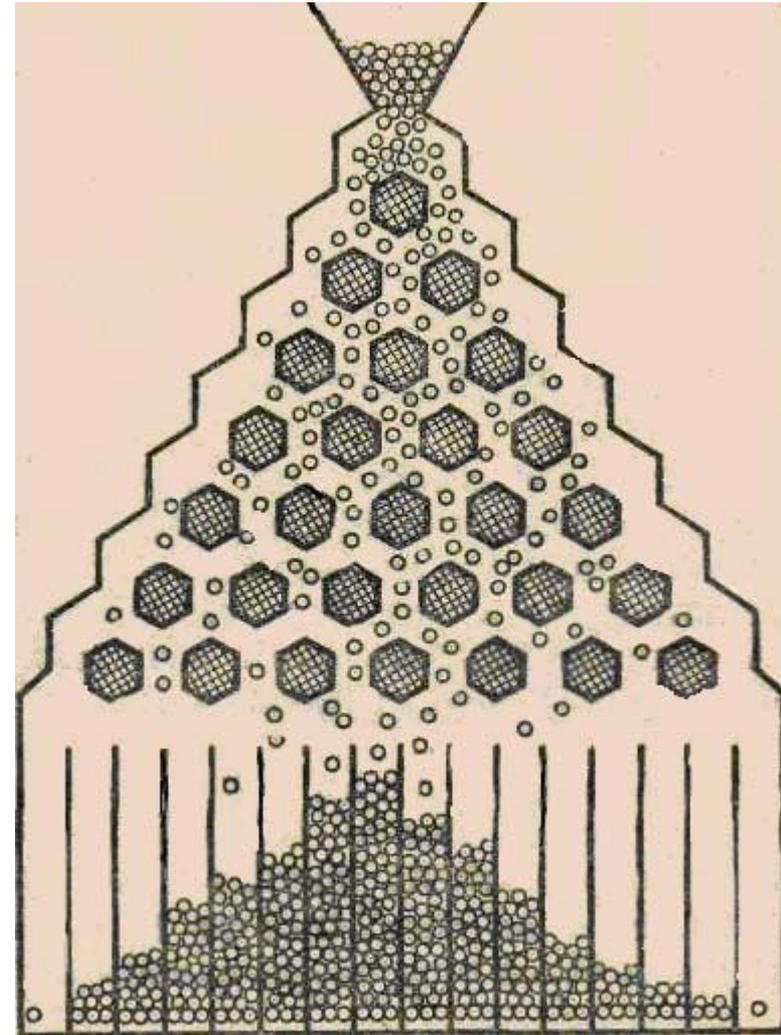
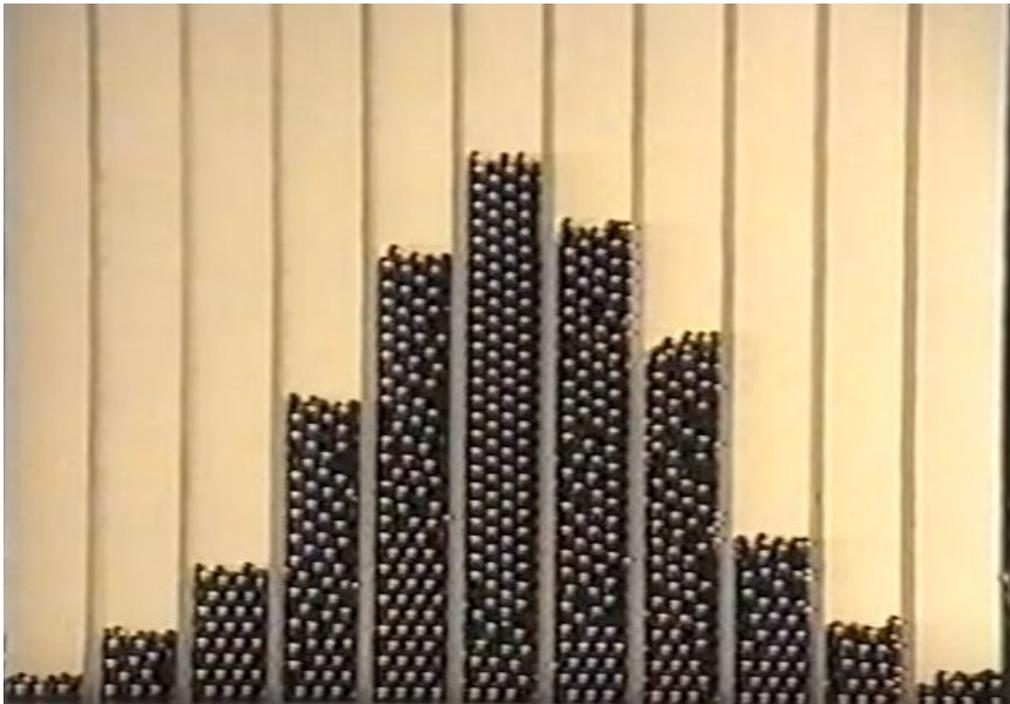
Отличительная черта внутреннего движения частиц – его **случайный** характер

Вероятность	одно из основных понятий статистической физики
Термодинамическая вероятность	количество способов, которыми может быть реализовано данное состояние макросистемы
Микросостояние	состояние системы с определенным распределением ее частиц в определенный момент времени
Флуктуации	случайные отклонения от наиболее вероятного значения

Элементы статистической физики

Закон распределения молекул
идеального газа по скоростям

Статистическая функция
распределения по скоростям



Доска Гальтона

Основа подходов в статистической физике

ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

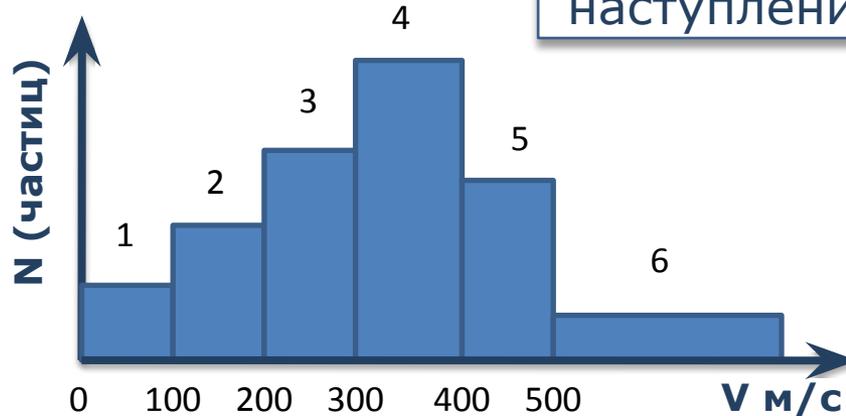
Исходные понятия

Событие

Вероятность наступления события

Например,

бросание монеты:
«орел», «решка»



- Разобьем все значения скорости молекул газа на 6 интервалов $\Delta V_i (i = 1, 2, \dots, 6)$
- Будем измерять скорость молекул и раскладывать по i -м интервалам
- Тогда измерение – это событие
- Эта задача эквивалентна киданию игральной кости

Основа подходов в статистической физике

Событие случайное – условия его наступления неизвестны

Вероятность повторения
данного события
характеризуется
кратностью его повторения

$$P_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N}$$

Но т.к. N
всегда конечно

⇒ $P_i \approx \frac{N_i}{N}$

$$\sum P_i \approx \sum \frac{N_i}{N} = 1$$

Теорема сложений вероятностей (на примере кубика)

Вероятность одного из двух или нескольких событий равна сумме вероятностей каждого из этих событий в отдельности

N – бросаний кубика

N_i – выпало число i

N_k – выпало число k

Вероятность того, что выпадает либо i , либо k :

$$P(i \cup k) = \frac{N_i + N_k}{N} = P_i + P_k$$

Примеры

a) вероятность выпадения четной цифры, что и так очевидно

$$P = \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2}$$

b) вероятность того, что НЕ выпадет цифра 5

$$P = 1 - \frac{1}{6} = \frac{5}{6}$$

с) вероятность того, что выпадет либо 2, либо 5
($i = 2, k = 5$)

$$P = \frac{1}{6} + \frac{1}{6} = \frac{1}{3}$$

Теорема умножений вероятностей

Вероятность совмещения двух или нескольких событий равна произведению вероятностей каждого из них в отдельности

Примеры

Вероятность того, что при двух подряд бросаниях кубика:

a) выпадут две «4»:

$$P_1 = \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{6} = \frac{1}{36}$$

b) не выпадет ни одной «4»:

$$P_2 = \frac{5}{6} \cdot \frac{5}{6} = \frac{25}{36}$$

c) выпадет одна 4:

$$P_3 = \left(\frac{1}{6} \cdot \frac{5}{6} \right) + \left(\frac{1}{6} \cdot \frac{5}{6} \right) = \frac{10}{36}$$

Вероятность одного из перечисленных событий:

$$P_1 + P_2 + P_3 = 1 \quad \text{иначе быть и не могло}$$

Распределение вероятности события

Вероятность попадания
величины x в любой интервал Δx

$$P_x$$

Характеристика
случайной величины

$$\frac{\Delta P_x}{\Delta x}$$



Функция распределения
случайной величины

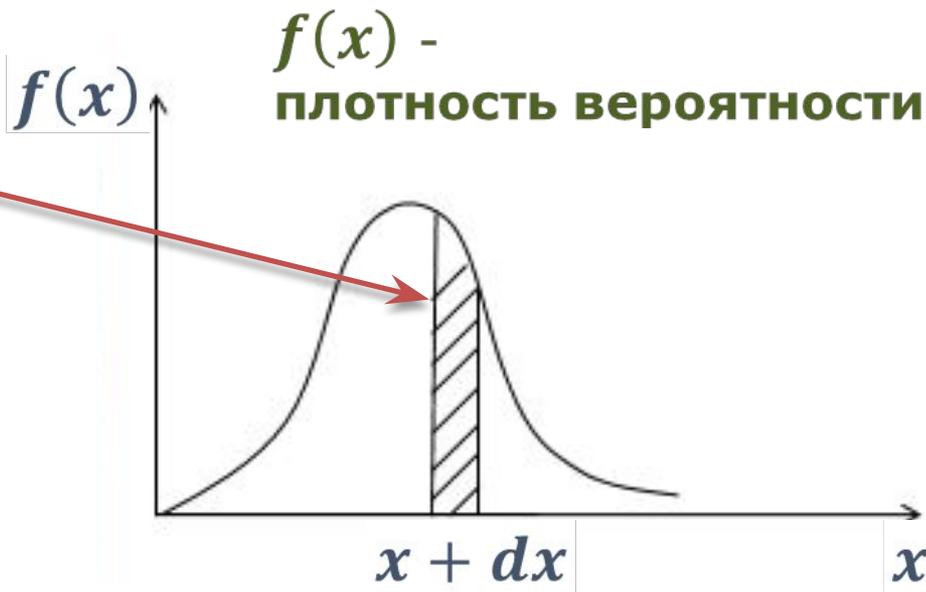
$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta P_x}{\Delta x} = \frac{dP}{dx}$$

$$dP_x = f(x)dx$$

Площадь равна
вероятности того, что
случайная величина x
окажется в интервале

Вероятность
достоверного события:

$$P = \int_0^{\infty} f(x)dx = 1$$



Распределение молекул по абсолютным значениям скоростей

Фазовое пространство скоростей

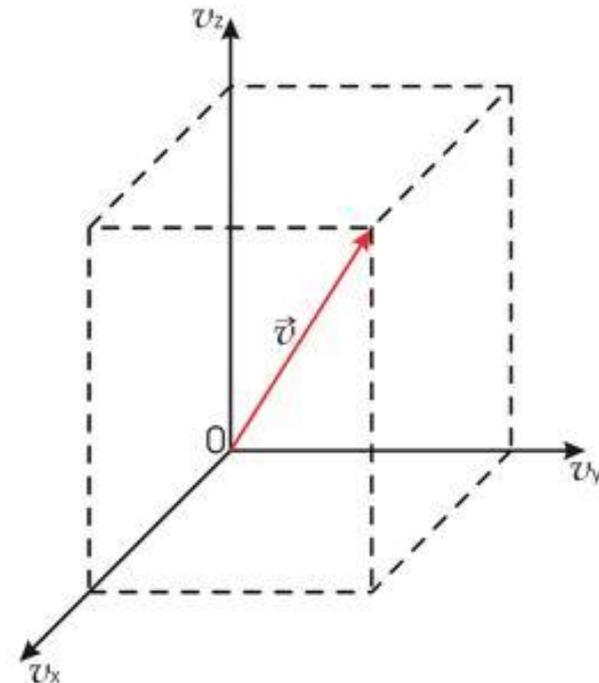
Скорость любой молекулы можно представить через ее проекции v_x, v_y, v_z

⇒ $dV_v = dv_x dv_y dv_z$
– фазовый объем

$dP(v) = f(v) dV_v$
– вероятность обнаружения молекулы со скоростью v

⇒ $dV_v = 4\pi v^2 dv$

$dP(v) = f(v) 4\pi v^2 dv$



Распределение молекул по абсолютным значениям скоростей

Для получения распределения запишем в общем виде вероятность того, что значения проекций скорости лежат внутри элементарного объема пространства скоростей

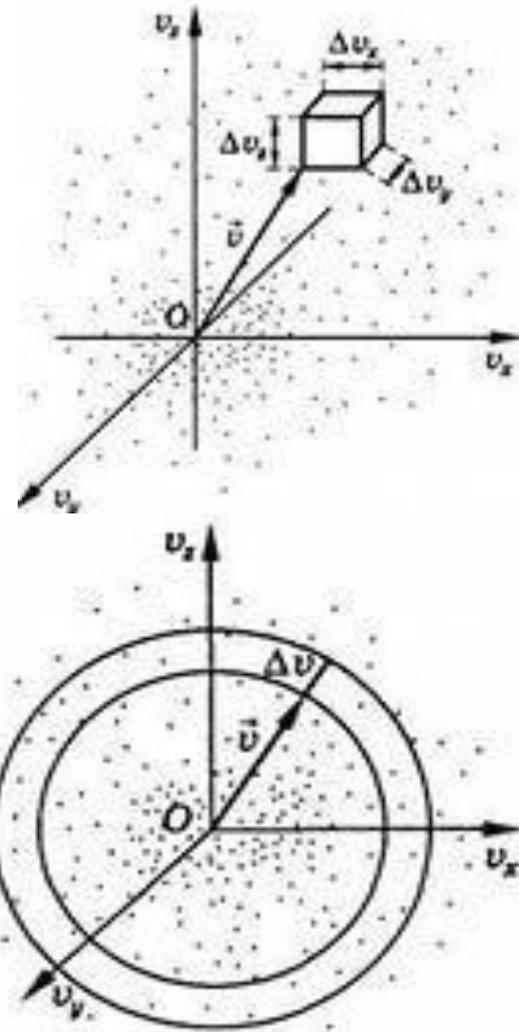
$$dP(\mathbf{v}) = f(\mathbf{v})4\pi v^2 dv$$

→ $F(v) = 4\pi v^2 f(v)$

– функция распределения

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

– функция распределения Максвелла показывает вероятность того, что величина скорости имеет значения от v до $v + dv$ *подробнее*



Распределение молекул по абсолютным значениям скоростей

Вероятность того, что частица имеет проекцию скорости в интервале

$$[(v_x, v_x + dv_x), (v_y, v_y + dv_y), (v_z, v_z + dv_z)]$$

используя теорему об умножении вероятностей независимых событий

$$\begin{aligned} dP(v_x, v_y, v_z) &= dP(v_x)dP(v_y)dP(v_z) = \\ &= \varphi(v_x)\varphi(v_y)\varphi(v_z)dv_xdv_ydv_z \end{aligned}$$

т.к. проекции скорости v_x, v_y, v_z равноправны



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

Распределение молекул по абсолютным значениям скоростей

Найдем относительное число частиц (или распределение) скорость которых лежит $(v_x, v_x + dv_x)$ (не проекция, а именно сам модуль скорости)

– частицы, модуль скорости которых лежит в шаровом слое пространства скоростей

$$dV = 4\pi v^2 dv$$

т.к. вероятность в объеме

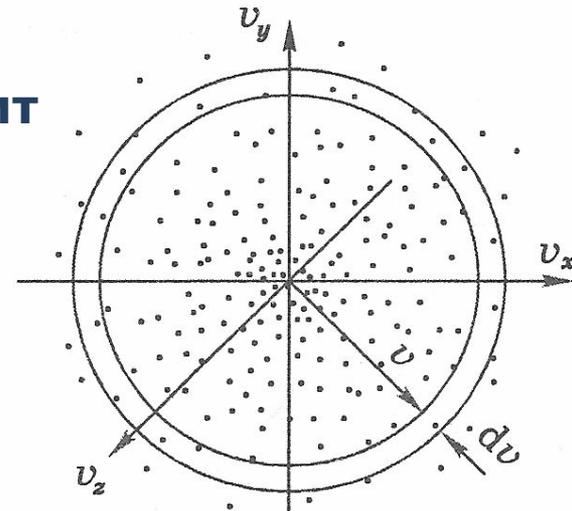
$$dV_v = dv_x dv_y dv_z$$

есть $dP(v) = f(v)dV_v = f(v)dv_x dv_y dv_z$

Заполним весь шаровой слой этими кубиками, при этом $f(x) = const$, т.к. $v = const$

⇒ по теореме сложения вероятностей

$$dP = \sum f(v)dv_x dv_y dv_z = f(v)dV = f(v)4\pi v^2 dv$$



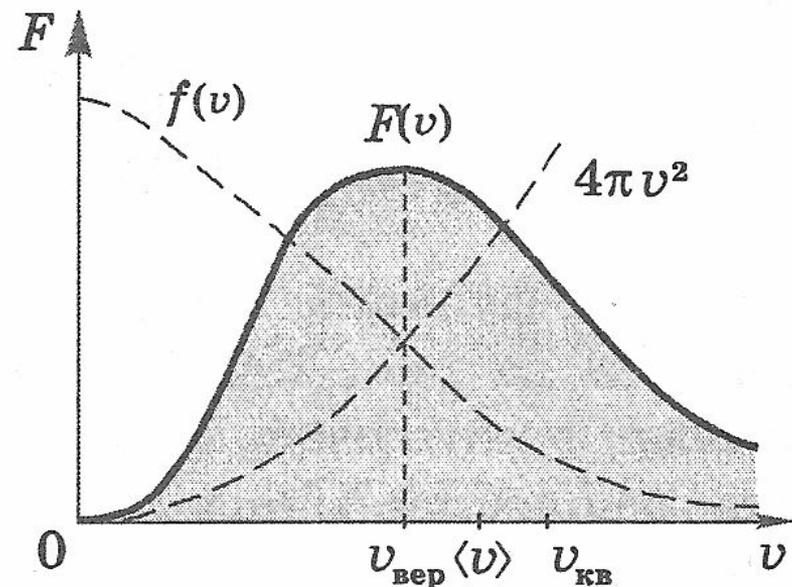
Распределение молекул по абсолютным значениям скоростей

$$\Rightarrow \frac{dP}{dv} = f(v)4\pi v^2 = F(v)$$

Т.К.

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

$$\Rightarrow \int_0^{\infty} F(v) dv = 1$$



Джеймс Клерк Максвелл

- Разработал основы кинетической теории газов
- **Основоположник теории электромагнитного поля**
- Автор принципа цветной фотографии
- Первый руководитель Кавендишской лаборатории (Лондон) – первой в мире учебно-научной лаборатории



1831-1879
**Англия,
Шотландия**

Распределение Максвелла

Итак,

Закон (статистическая функция) **распределения молекул идеального газа по скоростям**

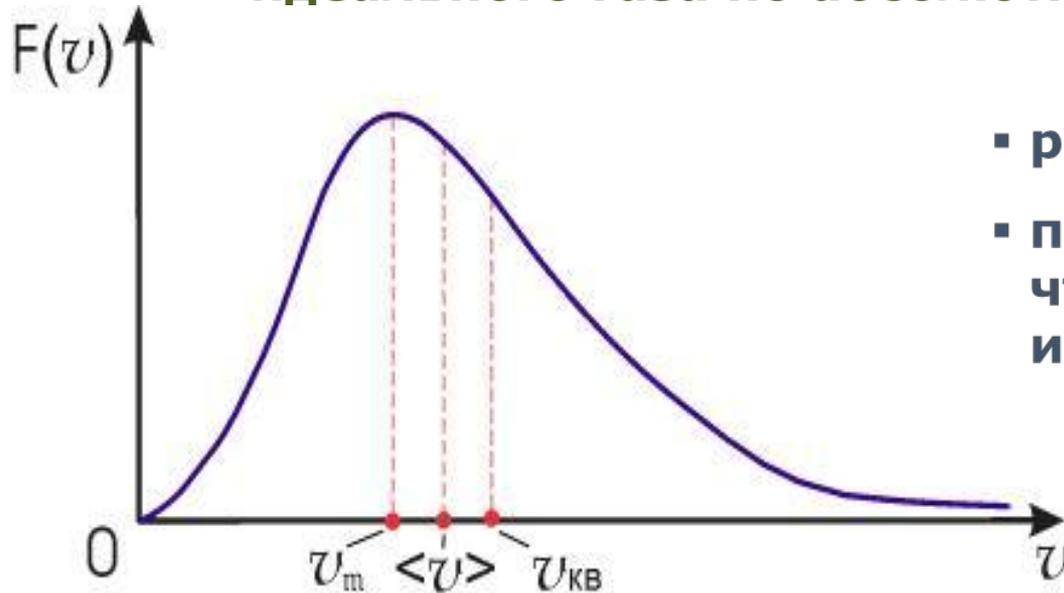
Функция Максвелла

Все направления движения молекул равноправны

...

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

Распределение Максвелла – распределение молекул идеального газа по абсолютным значениям скоростей



- **распределение вероятности**
- **показывает вероятность того, что величина скорости имеет значения от v до $v + dv$**

Скорости молекул

Наиболее вероятная скорость

скорость, при которой функция распределения имеет максимум

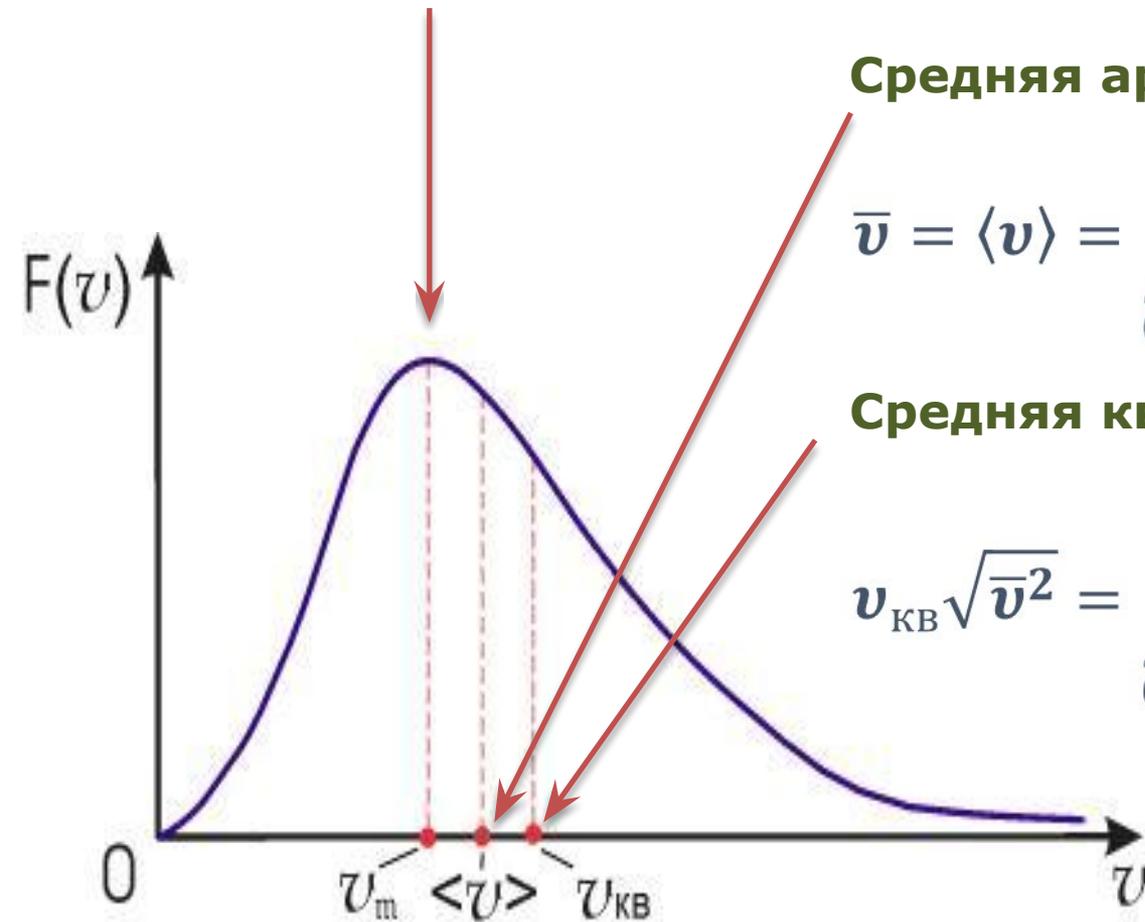
$$v_B = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$

Средняя арифметическая скорость

$$\bar{v} = \langle v \rangle = \int_0^{\infty} v f(v) dv = \dots = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$$

Средняя квадратичная скорость

$$v_{KB} \sqrt{\bar{v}^2} = \int_0^{\infty} v^2 f(v) dv = \dots = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$



Средняя квадратичная скорость

Средняя квадратичная скорость
поступательного движения
молекул идеального газа

$$\bar{\varepsilon} = \langle \varepsilon \rangle = \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}kT$$

→
$$v_{\text{КВ}} = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$

При 20°C $v_{\text{КВ}}(\text{O}_2) = 480 \text{ м/с}$
 $v_{\text{КВ}}(\text{H}_2) = 1920 \text{ м/с}$

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

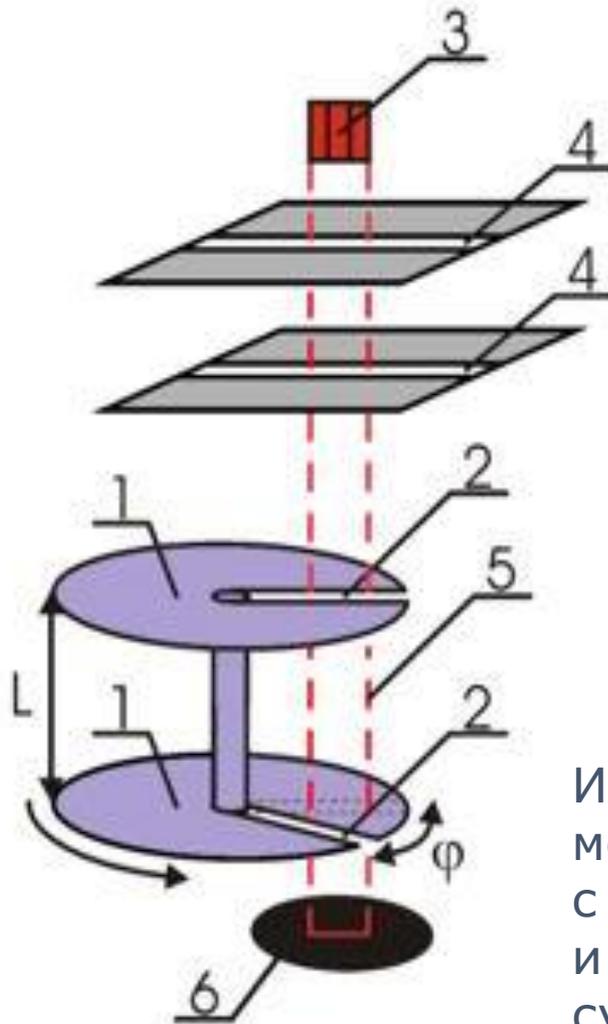
Постоянная
Больцмана

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

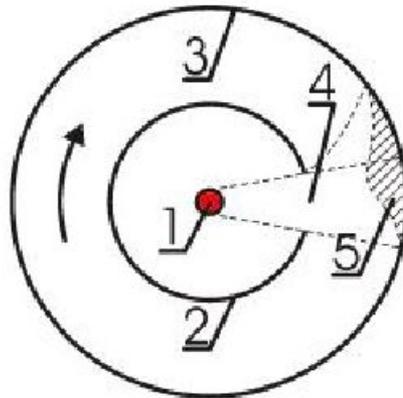
Универсальная
газовая постоянная

Опыты Штерна и Ламмерта

Опытное доказательство
распределения молекул по скоростям



- опыты Штерна (1925)
- опыты Ламмерта (1929)



1. быстро вращающиеся диски
2. узкие щели
3. печь
4. коллиматор
5. траектория молекул
6. детектор

$$v = \frac{L}{t}$$

$$\varphi = \omega t$$

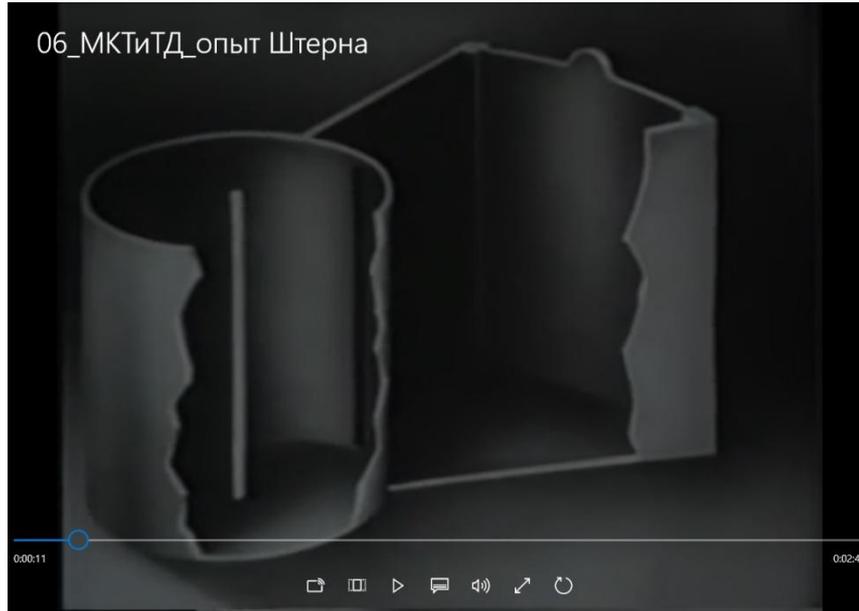
$$v = \frac{\omega}{\varphi} L$$

Изменяя угловую скорость вращения дисков можно отбирать из пучка молекулы с определенными скоростями, и по регистрируемой детектором интенсивности судить об их относительном содержании в пучке

Опыт Штерна

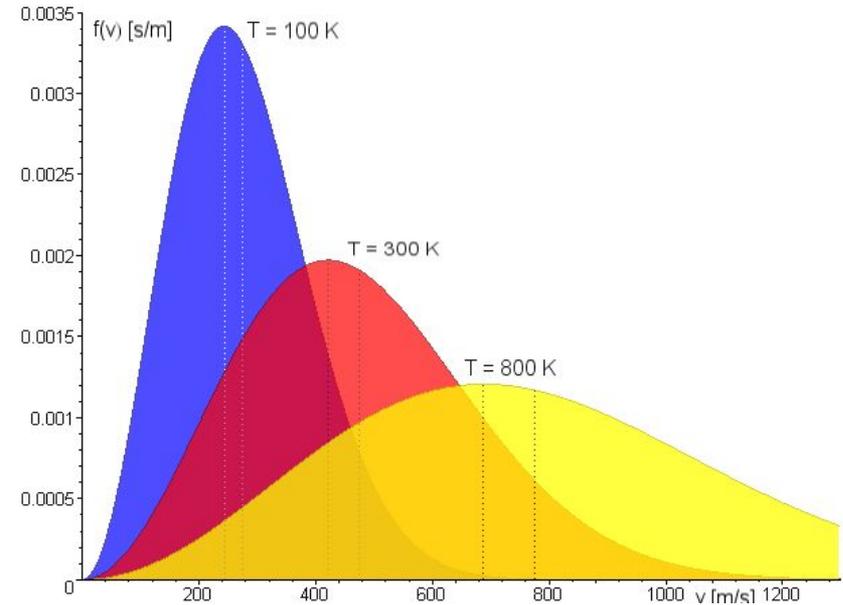
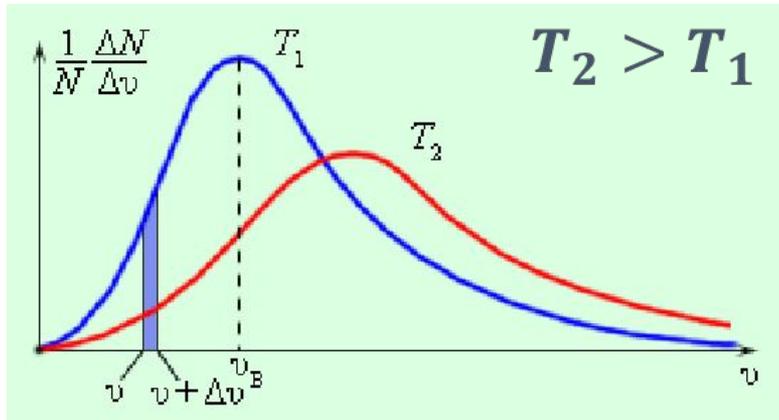


Опыт Штерна



ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И МАССЫ

Зависимость
распределения Максвелла
от температуры

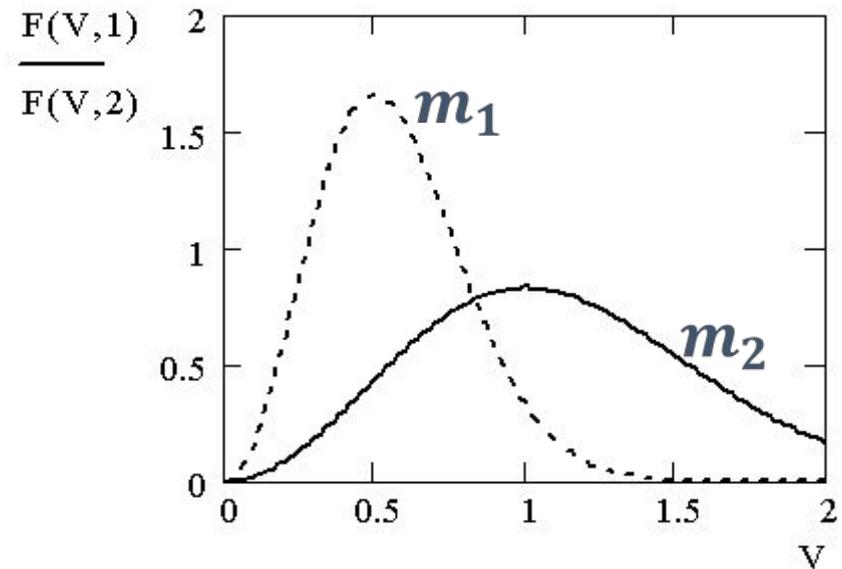


Зависимость
распределения Максвелла
от массы

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

$$T = \text{const}$$

$$m_1 > m_2$$



Барометрическая формула. Распределение Больцмана

Молекулы атмосферного воздуха
притягиваются к Земле

Концентрация молекул убывает
с увеличением высоты над поверхностью Земли

Молекулы воздуха имеют
потенциальную энергию $E = mgh$

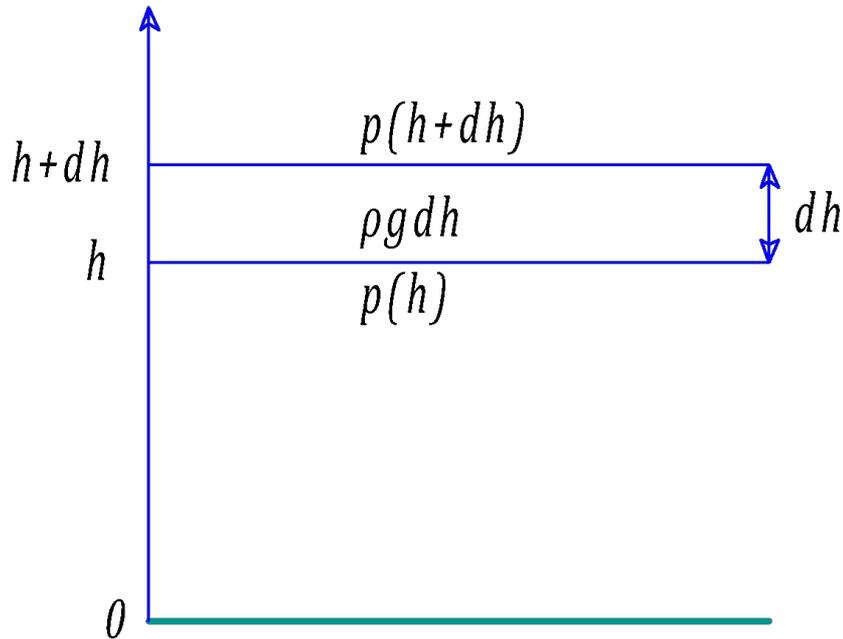
Как распределяются молекулы ?
по потенциальным энергиям



Барометрическая формула

Рассмотрим тонкий слой воздуха dh

На высоте h разность давлений на верхней границе слоя



$$P(h) = P(h + dh) + \rho g \cdot dh$$

$$dP = -\rho g \cdot dh$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad \Rightarrow \quad P = \frac{\rho}{\mu} RT$$

$$\frac{dP}{P} = -\frac{\mu g}{RT} dh$$

Проинтегрируем

- высота меняется от 0 до h
- давление – от P_0 до P :

$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = -\frac{\mu g}{RT} \int_0^h dh \quad \Rightarrow \quad \ln \frac{P}{P_0} = -\frac{\mu g}{RT} h$$

Барометрическая формула

$$P = P_0 e^{-\frac{\mu g}{RT} h}$$

Барометрическая формула справедлива, когда температура воздуха постоянна или слабо зависит от высоты

С учетом $P = nkT$

$$n = n_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}}$$

Распределение молекул по высоте во внешнем силовом поле –
распределение Больцмана

Нижний слой атмосферы – тропосфера

- до высоты ~ 12 км
- содержит 80% массы атмосферы Земли
- характеризуется почти линейным спадом температуры от 300 до 200 К



Альтиметр – прибор для измерения высоты

Контрольные вопросы

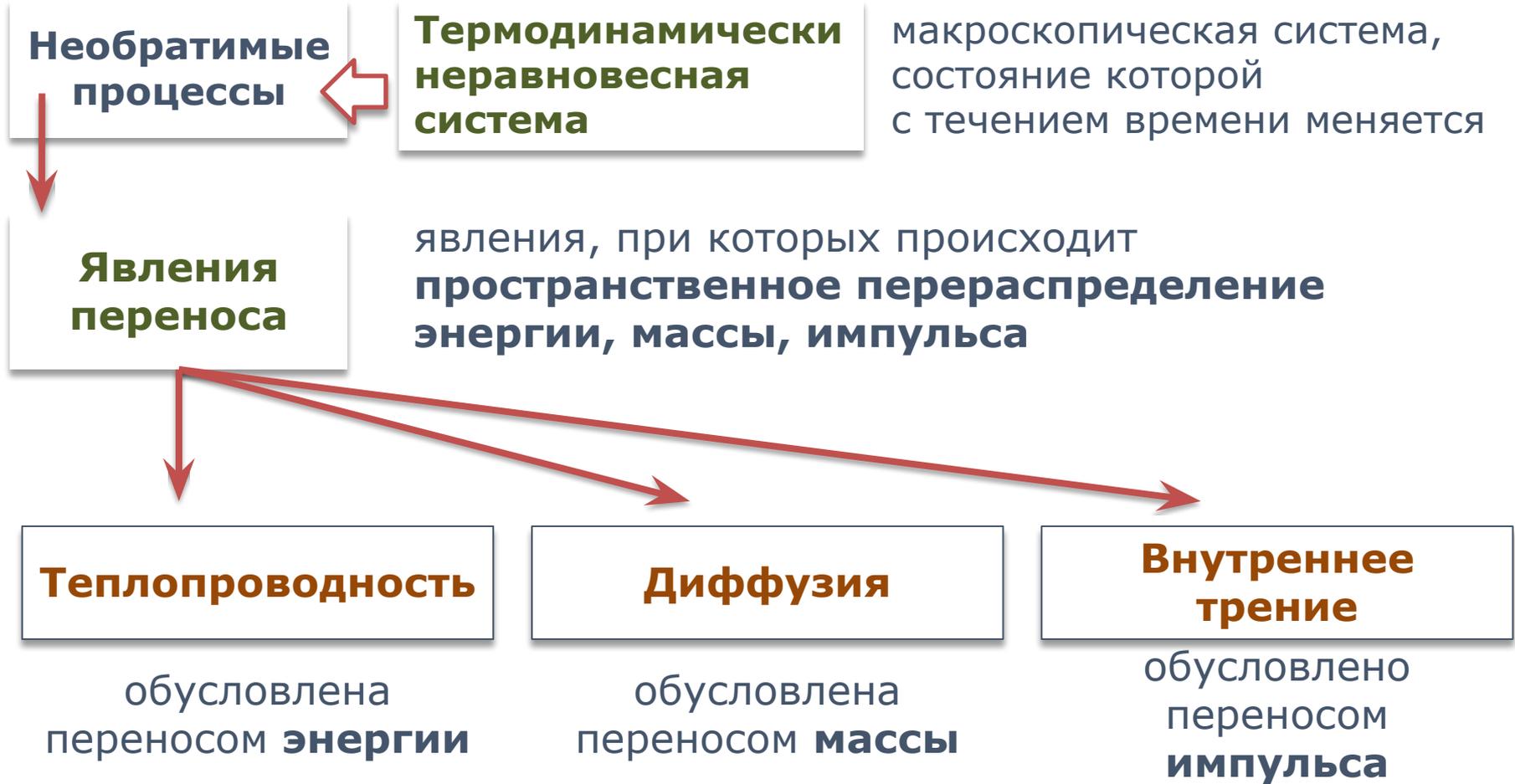
1. Термодинамическая температура газа изменилась на 10%

На сколько процентов изменилась при этом средняя скорость молекул?

2. В чем суть распределения Максвелла? Нарисуйте график

3. В чем суть распределения Больцмана? Нарисуйте график

Явления переноса в термодинамически неравновесных системах



Теплопроводность

Обусловлена переносом ЭНЕРГИИ

Если в одной области газа E_k молекул $>$, чем в другой

происходит

выравнивание температур

Закон Фурье

ПЛОТНОСТЬ
ТЕПЛОВОГО
ПОТОКА

$$j_E = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

градиент
температур

энергия,
переносимая
в форме теплоты
в единицу
времени
через единичную
площадку, \perp оси x

энергия
переносится
в направлении $\downarrow T$
**коэффициент
теплопроводности**

**удельная
теплоемкость газа
при постоянном
объеме**
количество теплоты,
необходимое для
нагрева 1 кг газа на 1
К при постоянном
объеме

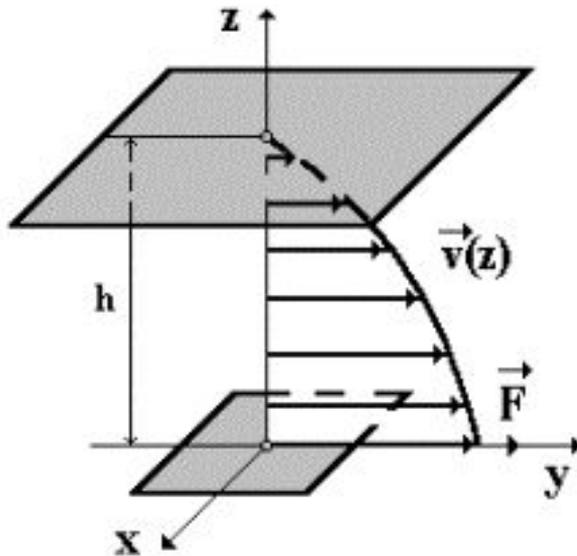
$$\lambda = \frac{1}{3} C_V \rho \langle v \rangle \langle l \rangle$$

Градиент

Градиент

от лат. *gradiens* — шагающий, растущий

вектор, своим направлением указывающий направление наибольшего возрастания некоторой величины, значение которой меняется от одной точки пространства к другой, и по величине (модулю) равный скорости роста этой величины в этом направлении



$$\mathit{grad}\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \frac{\partial\varphi}{\partial y} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}$$

Другими словами

**Физический
смысл
градиента**

**Градиент характеризует (показывает)
насколько быстро меняется величина
в направлении от слоя к слою**

Диффузия

Обусловлена переносом МАССЫ

Самопроизвольное проникновение и перемешивание частиц двух соприкасающихся газов, жидкостей и даже твердых тел

Для химически однородного газа

Закон Фика

масса вещества, переносимая в единицу времени через единичную площадку, \perp оси x

ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА МАССЫ

перенос массы – в направлении \downarrow
 ρ

коэффициент диффузии

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle$$

$$j_m = -D \frac{d\rho}{dx}$$

градиент плотности

Показывает, как быстро меняется плотность при переходе от слоя к слою в направлении x , \perp направлению движения слоев

Внутреннее трение (вязкость)

Обусловлена переносом ИМПУЛЬСА

Если параллельные
слои жидкости (газа)
движутся
с различными
скоростями

обмен
молекулами
между
слоями

обмен
импульсами

торможение
быстрого слоя,
ускорение
медленного

Закон Ньютона

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S$$

j_p

$$= -\eta \left(\frac{dv}{dx} \right)$$

градиент
скорости

полный импульс,
переносимый
в единицу времени
через единичную
площадку, \perp оси x

плотность
потока
импульса

динамическая
вязкость

$$\eta = \rho D$$

перенос импульса
–
в направлении $\downarrow u$

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle$$

$$\frac{\lambda}{\eta C_V} = 1$$

Вязкость

**Вязкость
(внутреннее трение)**

Свойство жидкостей (газов) оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой

$$F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| S$$

зависит от:

- химических свойств жидкости (газов)
- температуры (для жидкостей зависимость обратная, для газов – прямая пропорциональность)

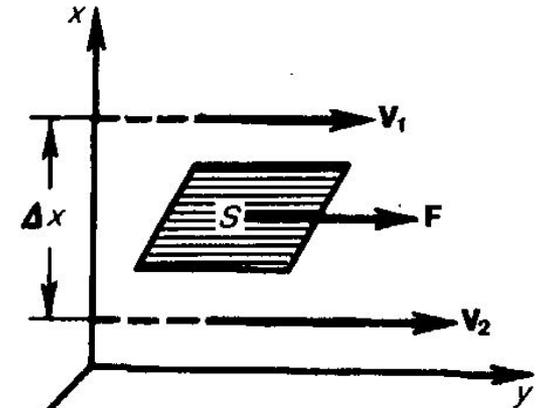
η – коэффициент пропорциональности

Динамическая вязкость (вязкость)

$$[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$$

1 Па · с – динамическая вязкость среды, в которой при ламинарном течении и градиенте скорости, равным 1 м/с на 1 м, возникает сила внутреннего трения 1 Н на 1 м² поверхности касания слоев (1 Па · с = 1 Н · с/м²)

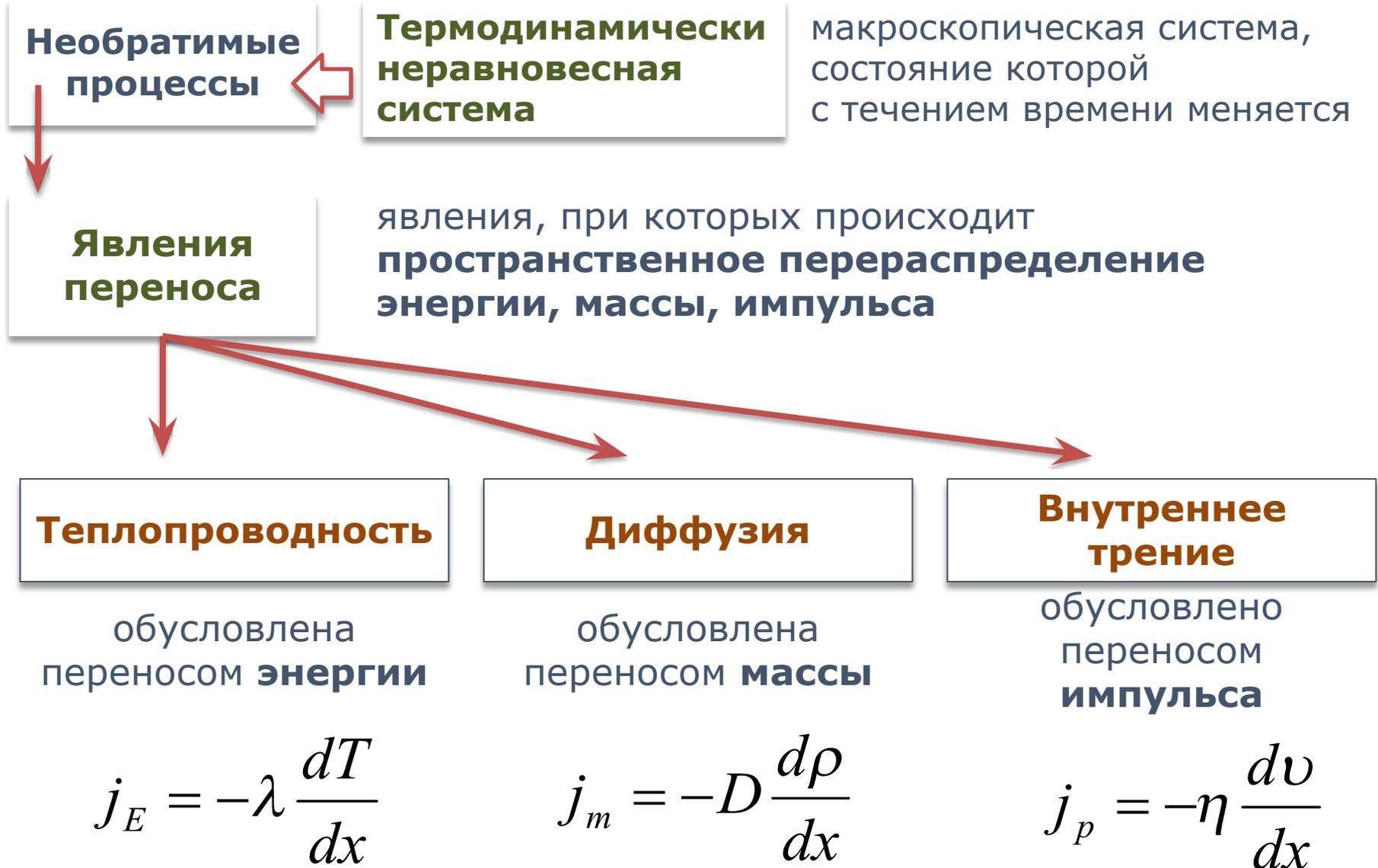
Градиент скорости



Показывает, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою в направлении x ,

⊥ направлению движения слоев

Явления переноса в термодинамически неравновесных системах



Экспериментально полученные соотношения