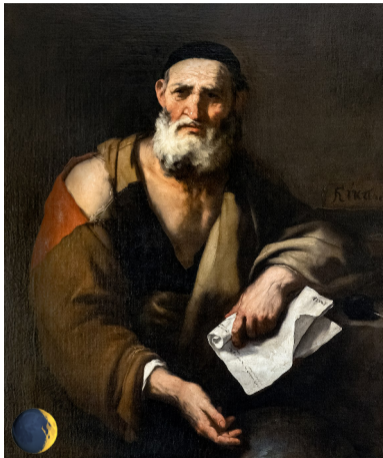


Лекция 0
История в лицах

Левкипп и Демокрит



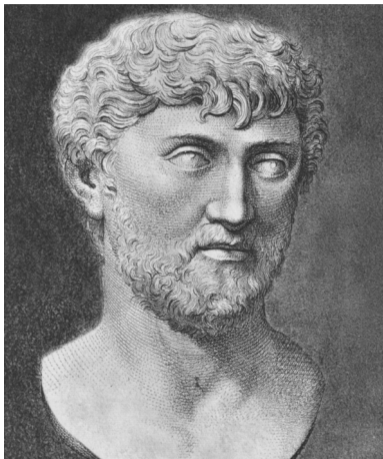
V век до н.э.



IV век до н.э.

УЧЕНИЕ ОБ АТОМАХ

Тит Лукреций Кар

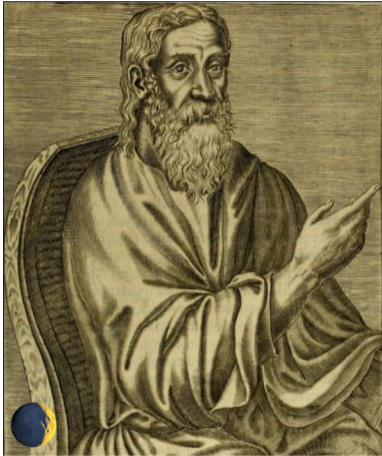


I век до н.э.

*Nunc age, res quoniam docui non posse creari
de nihilo neque item genitas ad nil revocari,
ne qua forte tamen coeptes diffidere dictis,
quod nequeunt oculis rerum primordia cerni,
accipe praeterea quae corpora tute necesses
confiteare esse in rebus nec posse videri...*

Так как теперь доказал я уже, что вещам невозможно
Из ничего возникнуть и, родившись, в ничто обращаться,
То, чтоб к словам моим ты с недоверием всё ж не отнёсся
Из-за того, что начала вещей недоступны для глаза,
Выслушай то, что скажу, и ты сам, несомненно, признаешь,
Что существуют тела, которых мы видеть не можем
Ветер, во-первых, морей неистово волны бичует,
Рушит громады судов и небесные тучи разносит
Или же, мчась по полям, стремительным кружится вихрем,
Мощные валит стволы, неприступные горные выси,
Лес низвергая, трясёт порывисто: так, налетая,
Ветер, беснуясь, ревет и проносится с рокотом грозным.
Стало быть, ветры – тела, но только незримые нами...

Герон Александрийский



I век н.э.



ЭОЛИПИЛ
прототип паровой машины

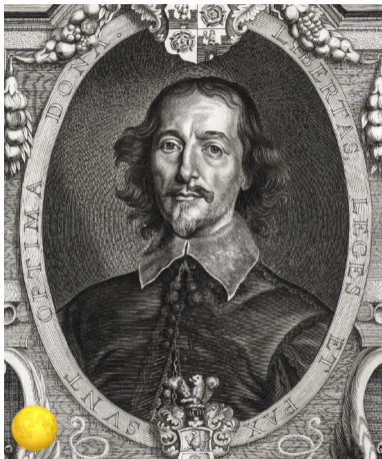
Санторио



1561–1636

- Врач, ученый
- Считал, что процессы в живом организме можно и нужно описывать законами **физики**
- Ставил опыты на себе, изобрел пульсометр и весы для человека
- Совместно с Галилеем изобрел **первый ртутный термометр** (еще без шкалы)

Отто фон Герике



1602–1686

- Физик, инженер, бургомистр, философ
- Изобрел водяной барометр, предсказывал с его помощью погоду
- Изобрел один из первых генераторов статического электричества
- Изобрел вакуумный насос, явил миру силу атмосферного давления, а также доказал весомость и упругость воздуха, его роль в горении и проведении звука

Роберт Бойль и Эдм Мариотт



1627–1691



1620–1684

при постоянной температуре
 $pV = \text{const}$

Гийом Амонтон



1663–1705

- Механик, член академии наук, был глухим от рождения
- Придумал формулу $F_{\text{тр}} = \mu N$
- Изобрел гигрометр, ртутный барометр, газовый (воздушный) термометр
- Исследуя зависимость давления газа от температуры, придумал концепцию **абсолютного нуля температуры**

Антуан Лавуазье



1743–1794

- Отец современной химии
(а Роберт Бойль — дедушка)
- Проводил сверхточные и дорогостоящие химические опыты. Развенчал теорию «флогистона», открыл природу горения, определил состав воздуха и воды
- Заложил основы термохимии, изобрел калориметр и принципы измерения теплоемкостей
- Яркий поборник теории **теплорода** с непрекаемым авторитетом в научном сообществе

Бенджамин Томпсон (граф Румфорд)



1753–1814

- Военный инженер, шпион, авантюрист
- Ему приписывается изобретение невидимых чернил и кофейного перколятора
- Заложил основы диетологии, придумал знаменитый рецепт «супа Румфорда», популяризовал макароны в Германии и Англии
- Наблюдая за сверлением пушечных стволов, **развенчал теорию теплорода**
- На склоне лет женился на вдове своего оппонента Антуана Лавуазье, о чем впоследствии пожалел

Жак Шарль и Жозеф Луи Гей-Люссак



1746–1823

при постоянном объеме

$$p_1/T_1 = p_2/T_2$$

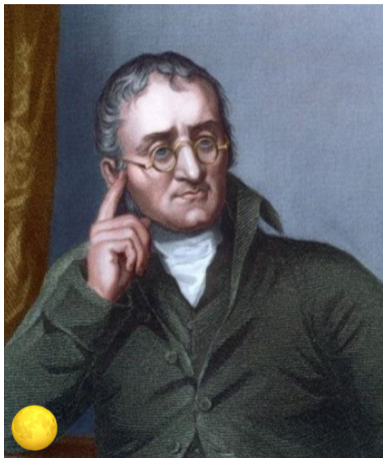


1778–1850

при постоянном давлении

$$V_1/T_1 = V_2/T_2$$

Джон Дальтон и Амедео Авогадро



1766–1844



1776–1856

АТОМНАЯ ТЕОРИЯ

Сади Карно



1796–1832

- Военный инженер, математик, физик
- Единственная опубликованная научная работа (1824). Ввел понятие тепловой машины, обратимых и необратимых процессов
- Первым по сути изложил формулировки как первого, так и второго начала термодинамики. Открыл теорему о максимально возможном КПД
- Скоропостижно умер от холеры, все его бумаги по закону были по закону сожжены, уцелела только записная книжка

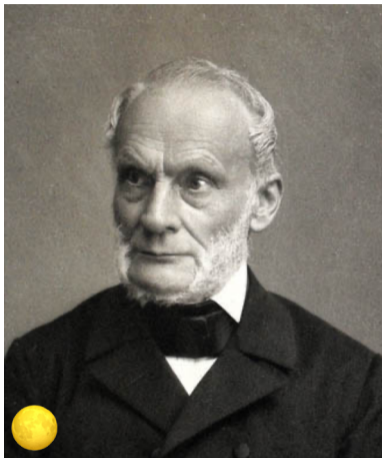
Джеймс Джоуль



1818–1889

- Вначале пивовар, затем ученый.
- В начале карьеры занимался электричеством, открыл тепловое действие электрического тока
- Начал использовать модель упругих шариков для описания газов (**кинетическая теория**)
- Совместно с Томсоном изобрел принцип охлаждения до сверхнизких температур
- Экспериментально доказал эквивалентность механической работы и теплоты

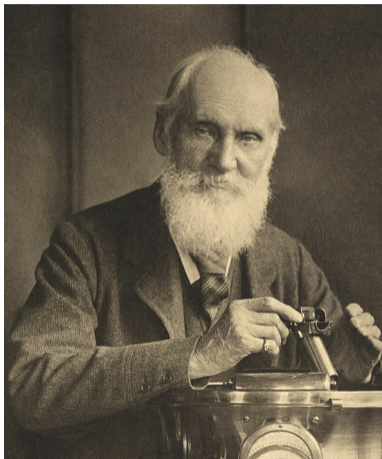
Рудольф Клаузиус



1822–1888

- Физик широкого профиля: механика, оптика, электричество и, конечно же, термодинамика
- Исправил теорию Карно — выкинул из нее теплород. И в целом наконец-то формализовал термодинамику
- Изложил первую формулировку второго начала термодинамики
- Ввел понятие **энтропии**

Уильям Томсон (лорд Кельвин)



1824–1907

- Инженер-физик, первый ученый-лорд
- Работал над объединением теории распространения тепла и электричества
- Сформулировал второе начало термодинамики еще одним способом
- Заложил основу теории излучения звезд
- Автор **абсолютной шкалы температур**

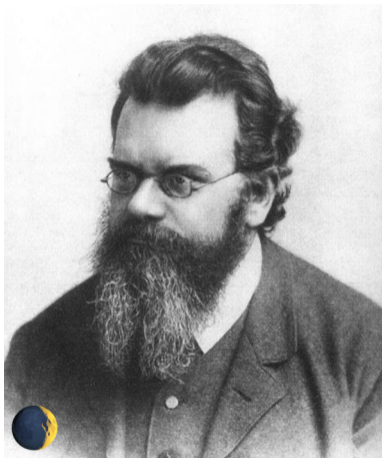
Джеймс Клерк Максвелл



1831–1879

- Был юристом, не понравилось. Стал «вторым после Ньютона» по мнению ряда авторов
- Исследовал все, что только можно, от теории цветов до колец Сатурна
- Свел законы электричества и магнетизма в единую теорию, предсказал электромагнитные волны
- Первым начал применять **статистические методы** для термодинамики газов
- Критически смотрел на второе начало термодинамики, придумал «демона Максвелла», который должен был его нарушать

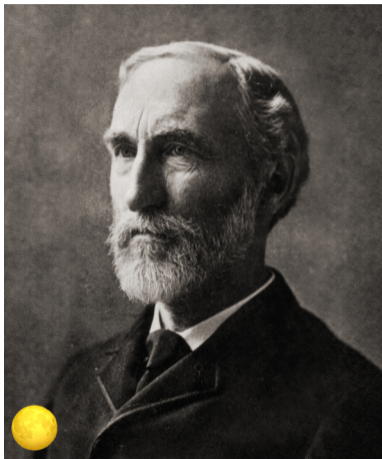
Людвиг Больцман



1844–1906

- Профессор физики и математики, философ-реалист
- Развил статистическую теорию Максвелла, создал обобщенное **распределение Максвелла-Больцмана**
- Посвятил большую часть жизни исследованию природы второго начала термодинамики и его «доказательства».
- Автор концепции **статистической природы энтропии**

Джозайя Уиллард Гиббс



1839–1903

- Первый американский ученый с мировым именем, причем не только за физические открытия
- Занимался фазовыми переходами, работал на стыке химии и физики
- Один из двух независимых авторов современной формы векторного анализа
- Заложил фундамент абстрактной **статистической механики**, пережившей даже квантовую революцию XX века

Лекция 1
Основы термодинамики

Термодинамика

изучает свойства **макроскопических** систем
(систем, состоящих из большого числа «частиц»)

сосредотачивается на энергообмене между системами
и на изменении их **макроскопических** параметров
оперирует понятием **температура**

является наукой **феноменологической**
базируется на наборе постулатов, выведенных из опыта

Макропараметры

число частиц в системе $\sim 10^{23}$

мы не можем изучать движение частиц по отдельности

- Первый макропараметр — **внутренняя энергия** U

$$U = \sum K_{\text{теплого движения}} + \sum P_{\text{взаимодействий}}$$

- Механические макропараметры
 - плотность/концентрация
 - давление (для газов)
 - вязкость (для газов/жидкостей)
 - упругость
- Электродинамические макропараметры
 - восприимчивости ϵ и μ
 - проводимость
- Оптические макропараметры
 - показатель преломления
 - прозрачность
- Тепловые макропараметры
 - теплоемкости, α -ты расширения и т. д.

все макропараметры являются функциями **температуры**

а что такое температура?
можно ли ее прямо измерить?

Макропараметры

число частиц в системе $\sim 10^{23}$
мы не можем изучать движение частиц по отдельности

- Первый макропараметр — **внутренняя энергия U**

U

НУЛЕВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Вне зависимости от начального состояния, система, помещенная в фиксированные внешние условия, достигнет состояния **термодинамического равновесия**, в котором все ее макропараметры перестанут изменяться

- Механика

- давление
- длина
- объем
- температура

- Электрические

- электрическое поле
- потенциал

- Оптические

- показатель преломления
- прозрачность

- Тепловые макропараметры

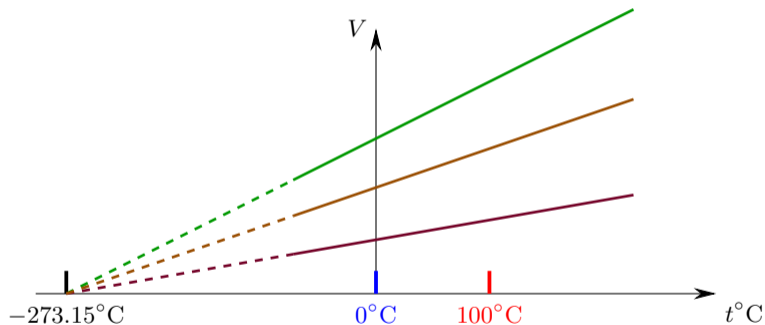
- теплоемкости, коэффициенты расширения и т. д.

влияются
температуры

температура?
измерить?

Абсолютная шкала температур

Амонтон — Шарль и Гей-Люссак — Кельвин
все изохоры и изобары сходятся в одной точке
в ней должно прекращаться всякое тепловое движение



просто сдвинем начало отсчета цельсиевской шкалы

$$T = t^\circ\text{C} + 273.15$$

(термодинамическая абсолютная температура)

Уравнение состояния идеального газа

макропараметры системы в состоянии теплового равновесия и ее температура связаны соотношениями, называемыми **уравнениями состояния**

- На основе законов Бойля-Мариотта, Шарля, Гей-Люссака и Авогадро **Бенуа Клапейрон** составил (1834) термическое уравнение состояния [идеального] газа:

$$pV = \nu RT, \text{ где } \nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M} \text{ — количество газа (в молях), } R = 8.31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

Стандарт определения N_A (числа Авогадро) и, следовательно, R (универсальной газовой постоянной) и измерение этих констант были выполнены **только в начале XX века**.

- Другие формы уравнения состояния идеального газа:

$$p = \frac{\rho RT}{M}, \text{ где } \rho = m/V \text{ — плотность газа}$$

$$p = nkT, \text{ где } n = N/V \text{ — концентрация газа, а } k = R/N_A \text{ — постоянная Больцмана}$$

- На основе опытов Томсена и Майера и статистических методов Максвелл, Больман и Гиббс установили (~ 1880) связь между внутренней энергией идеального газа и его температурой:

$$U = \frac{f}{2} \nu RT, \text{ где } f \text{ — число механических степеней свободы молекулы газа.}$$

Неидеальные газы

реальные газы могут конденсироваться при высоких давлениях и низких температурах

- уравнение Ван-дер-Ваальса (здесь и далее $\nu = 1$)

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}, \text{ где } a \text{ и } b \text{ — константы}$$

- уравнение Редлиха-Квонга

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)\sqrt{T}}, \text{ где } a \text{ и } b \text{ — константы}$$

- уравнение Пенга-Робинсона

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha(T)}{V(V+b) + b(V-b)}, \text{ где } a \text{ и } b \text{ — константы, } \alpha(T) \text{ — подстроечная функция}$$

- уравнение Дитеричи

$$p = \frac{RT}{V-b} \exp\left(-\frac{a}{RTV}\right), \text{ где } a \text{ и } b \text{ — константы}$$

в нашем курсе мы изучим только уравнение Ван-дер-Ваальса

Границы классической термодинамики

...более того, он был не только грибом,
он был ещё, помимо всего, радиоволной...

- Элементарные частицы можно считать «шариками» до определенного момента.
- Квантовая механика рассматривает не частицы, а поля комплекснозначной функции Ψ (волновой функции). Вероятность поймать частицу в окрестности заданной точки $\sim |\Psi|^2$
- Частице с импульсом \mathbf{p} и энергией E соответствует волновая функция

$$\Psi(\mathbf{r}, t) \sim \exp\left(\frac{i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{\hbar} - \frac{iEt}{\hbar}\right) \text{ — плоская волна с длиной } \lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} \text{ (волна де Бройля)}$$

где $\hbar = h/2\pi \approx 1.05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — приведенная постоянная Планка

- Квантовые эффекты станут заметными, когда длина волны де Бройля сравнится по масштабу с объемом, приходящимся на частицу $V/N = 1/n$. Характерная энергия теплового движения порядка kT , поэтому приведем следующую грубую оценку

$$1) E = kT, \quad p = \sqrt{2mE}, \quad \lambda = h/p$$

$$2) \lambda^3 \geq 1/n \quad \Rightarrow \quad T \leq \frac{h^2 n^{2/3}}{mk}$$