

---

# Лекции по физике.

## Молекулярная физика и ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

---

Явления переноса

# Явления переноса

- Согласно нулевому принципу Т.Д. неравновесные изолированные системы приходят к состоянию Т. Д. равновесия, характеризуемому общей для всей системы температурой и др. Т.Д. параметрами
- При рассмотрении явлений переноса мы ограничимся **квазиравновесными** системами, в которых можно говорить о существовании градиентов Т.Д. параметров

# Явления переноса

- Различают три вида явлений переноса
  1. **Теплопроводность** – это процесс переноса тепловой энергии, обусловленный хаотическим движением молекул
  2. **Диффузия** – это обусловленное тепловым движением молекул проникновение одних веществ в объём, занятый другими веществами
  3. **Внутреннее трение (вязкость)** возникает вследствие переноса импульса молекул между слоями

# Теплопроводность

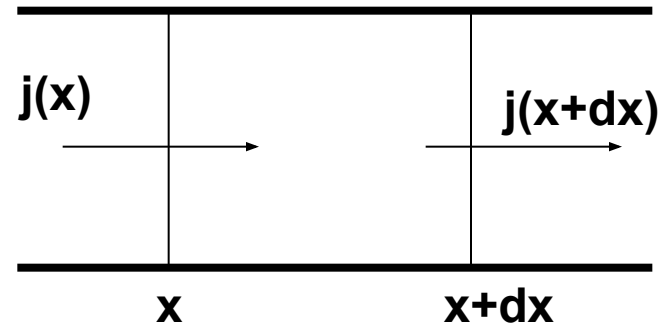
- Потоки тепла возникают из-за наличия градиентов температуры
- Теорию теплопроводности Ж. Фурье можно использовать в случаях  $V=\text{const}$  или  $P=\text{const}$
- При этом можно ввести плотность потока тепла  $j(x,y,z,t)=Q/(S \cdot t)$

# Теплопроводность

- В одномерном случае баланс тепла можно записать как:

$$\begin{aligned} & j(x) - j(x+dx) \\ & \cdot S \cdot dt = c_v \cdot dM \cdot dT \rightarrow - \\ & \frac{\partial j(x)}{\partial x} \cdot dt = c_v \cdot \rho \cdot dT \end{aligned}$$

- Получим  $\frac{\partial j}{\partial x} = -\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t}$



# Теплопроводность

- Следующее уравнение, связывающее  $j$  с градиентом температуры, проще получить эмпирическим путём:

$$j = -\alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (**)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности

- Комбинируя (\*) и (\*\*), получим:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

это уравнение справедливо в одномерном случае при отсутствии источников тепла

# Теплопроводность

- Если  $\alpha$  не зависит от координат (однородная среда), то:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \left( \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

или:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

где  $\chi$  - коэффициент температуропроводности

# Теплопроводность

- Мы получили однородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных
- При наличии в системе источников тепла мы должны решать неоднородное уравнение:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial j}{\partial x} + q$$

где  $q$  – мощность источников тепла



# Теплопроводность

- Обобщая (\*) на трёхмерный случай, получим:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = -(\nabla \cdot \mathbf{j}) + q(x, y, z)$$

(\* \*) перейдёт в:

$$\mathbf{j} = -\alpha \cdot \nabla T$$

# Теплопроводность

- Задачи на теплопроводность бывают:
  1. Стационарные. В уравнениях нет явной зависимости от времени. Такие задачи решать проще
  2. Нестационарные. Время является параметром уравнений
- Решим задачу о распределении температуры в бесконечной пластине толщиной  $\ell$

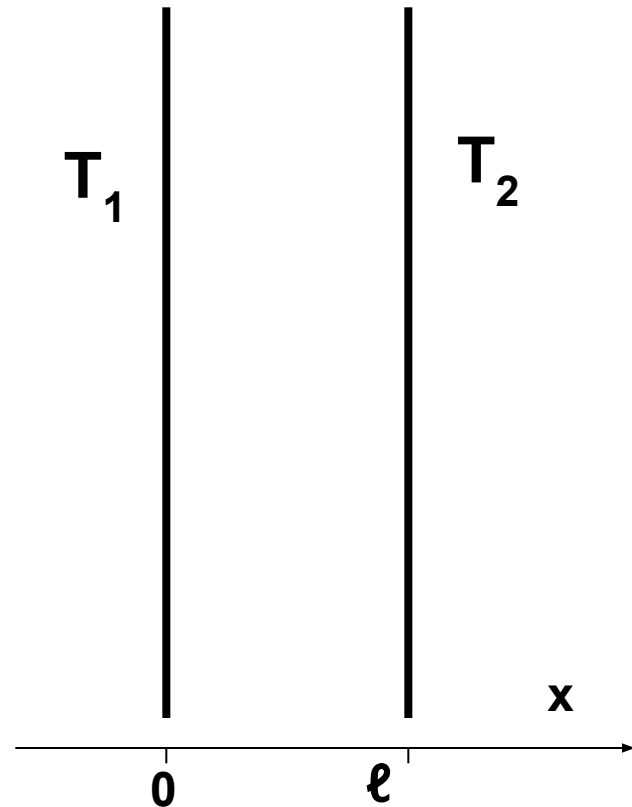
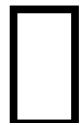
# Теплопроводность

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \rightarrow$$

$$j = -\alpha \frac{\partial T}{\partial x} = \text{const}$$

$$\rightarrow T = Ax + B$$

$$T = \frac{T_2 - T_1}{\ell} x + T_1$$



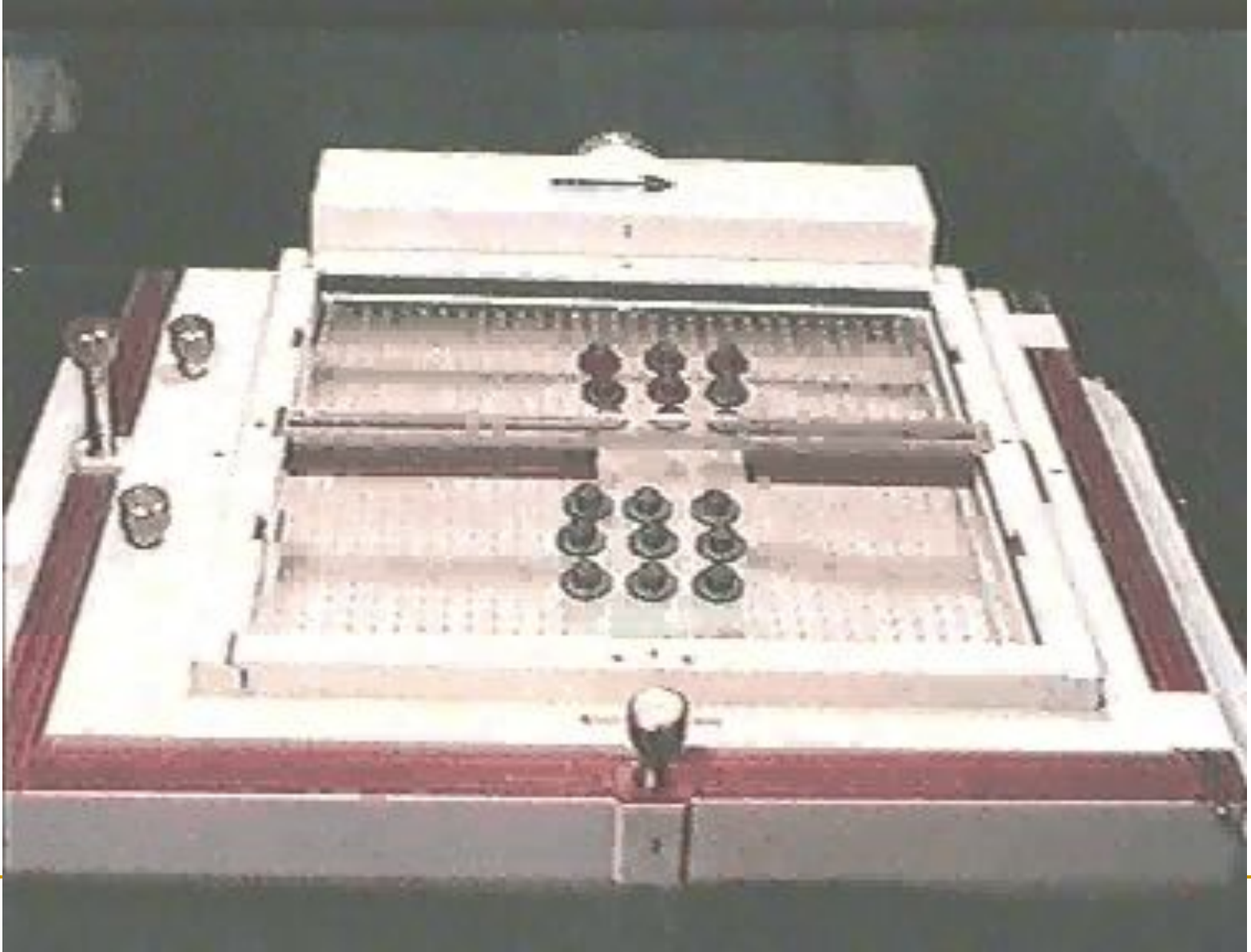
# Теплопроводность

- Среди различных веществ наибольшей теплопроводностью отличаются металлы:  $\alpha \sim 10^2 \div 10^3$  Вт/м · К. В них высокая теплопроводность обеспечивается свободными электронами
- У жидкостей  $\alpha \sim 1 \div 0,1$  Вт/м · К. В среднем меньше, чем у твёрдых тел и больше, чем у газов ( $\alpha \sim 0,1 \div 0,01$  Вт/м · К)

# Диффузия

- В изотермических условиях диффузия возникает из-за наличия градиентов концентрации вещества (концентрационная диффузия)
- Отдельным видом диффузии является термодиффузия в результате которой более тяжёлые и крупные молекулы идут к горячей области, а лёгкие и мелкие – к холодной
- Различают диффузию одного вещества в другом и самодиффузию

# Диффузия



# Диффузия

- Диффузия одного вещества в другом реализуется при малых концентрациях добавок
- При больших концентрациях имеем промежуточный случай между диффузией и самодиффузией
- Коэффициент самодиффузии можно измерить изучая проникновение радиоактивных изотопов в вещество
- Диффузия в твёрдых телах протекает медленнее, чем в жидкостях, а в жидкостях медленнее, чем в газах

# Диффузия

- Концентрационная диффузия описывается законом Фика:

$$\Delta M = -D \frac{dc}{dx} \cdot S \cdot \Delta t$$

где  $D$  – коэффициент диффузии [ $\text{м}^2/\text{с}$ ],  $M$  – масса,  $c$  – концентрация,  $S$  – площадь,  $t$  – время

- Диффузионный поток:

$$j_D = \frac{dM}{dt} \cdot \frac{1}{S} = -D \frac{dc}{dx}$$

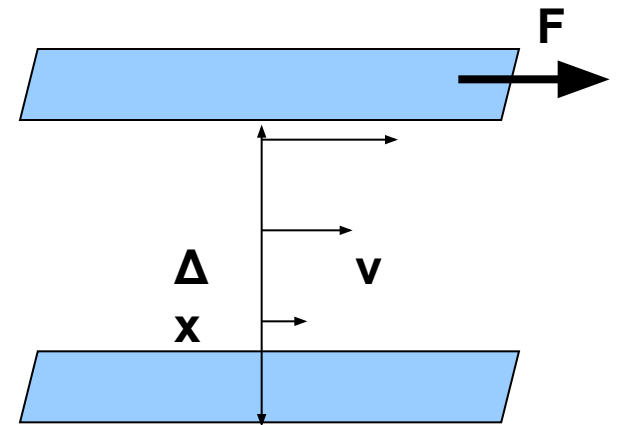


# Диффузия



# Вязкость

- При течении жидкостей и газов возникают силы трения между смежными слоями среды, движущимися с разной скоростью. Эти силы возникают вследствие переноса импульса молекул от слоёв, имеющих большую скорость, к более медленным слоям



# Вязкость

- Явление внутреннего трения описывается формулой Ньютона:

$$f = \eta \frac{dv}{dx}$$

где  $\eta$  - коэффициент динамической вязкости [Па · с]

- При увеличении температуры вязкость у жидкостей уменьшается, а у газов увеличивается

# Явления переноса

- Феноменологические параметры  $\alpha$ ,  $\eta$  и  $D$ , характеризующие явления переноса можно выразить через микроскопические параметры, такие как  $m$ ,  $v_{\text{мол}}$  и  $\lambda$ . Последний играет особую роль.
- Ранее мы получали оценку  $\lambda \sim 1/(n \cdot \sigma)$ , где  $n$  – концентрация молекул,  $\sigma$  - площадь сечения молекулы
- Более точный расчёт даёт:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma}$$

# Явления переноса

- Для случая диффузии молекул типа 1 массой  $m_1$  и радиусом  $r_1$  в среде молекул типа 2 с  $m_2$  и  $r_2$ :

$$\lambda_1 = \frac{1}{n_2 \sigma_{12} \sqrt{1 + \frac{m_1}{m_2}}}$$

где  $\sigma_{12} = \pi(r_1 + r_2)^2$

# Явления переноса

- $\lambda$  можно выразить через давление и температуру:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\sigma P}$$

- Можно установить общее соотношение, связывающее макроскопический поток  $G$  какой либо величины  $A$  с потоком  $g$  микроскопической величины  $a$ :

$$G = -2\lambda \frac{dg}{dx}$$

# Явления переноса

- В случае диффузии это даёт:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \lambda v_{\text{ср}}$$

- Для теплопроводности:

$$\kappa = \frac{1}{2} \cdot \lambda v_{\text{ср.кв.}} \cdot \rho \cdot c_p$$

- Для вязкости:

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \lambda v_{\text{ср.кв.}} \cdot \rho$$

---

КОНЕЦ ЛЕКЦИИ

---