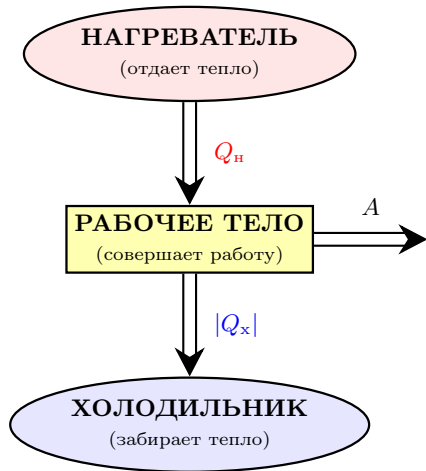


Лекция 3
Термодинамическая энтропия

Тепловая машина

рассматриваем только машины
с обратимым замкнутым циклом



- **НАГРЕВАТЕЛЬ** — все участки, где $\delta Q > 0$
- **ХОЛОДИЛЬНИК** — все участки, где $\delta Q < 0$
- За каждый цикл $\Delta U = 0$, т.к. тело возвращается в исходное состояние. Следовательно,

$$Q = Q_H - |Q_X| = A$$

- Коэффициентом полезного действия (КПД) тепловой машины называют

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_X|}{Q_H}$$

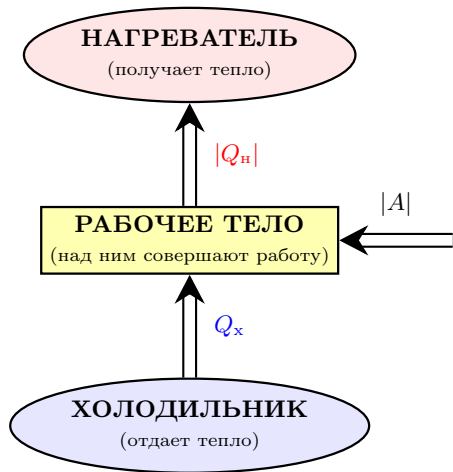
II НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

(формулировка Томсона-Планка)

тепловая машина с замкнутым циклом
нереализуема без наличия холодильника

Холодильная машина

обратим циклический процесс
в тепловой машине



- **НАГРЕВАТЕЛЬ** — все участки, где $\delta Q < 0$
- **ХОЛОДИЛЬНИК** — все участки, где $\delta Q > 0$
- За каждый цикл $\Delta U = 0$, т.к. тело возвращается в исходное состояние. Следовательно,
$$Q = |Q_n| - Q_x = |A|$$
- Условным КПД холодильной машины называют

$$\eta = \frac{Q_x}{|A|} \text{ — чем больше, тем лучше}$$

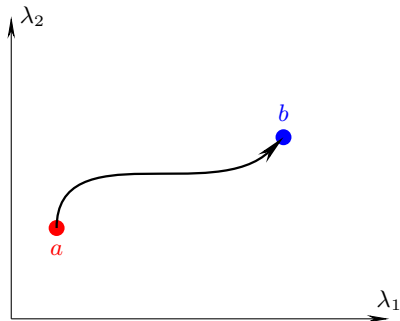
II НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

(формулировка Клаузиуса)

нереализуем самопроизвольный процесс перехода
тепла от холодного тела к горячему

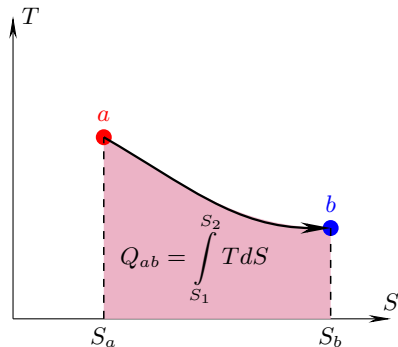
(T, S) – диаграмма

Энтропия — тоже термодинамический параметр



(λ_1, λ_2) – диаграммы

- индивидуальны для системы
- позволяют находить работы

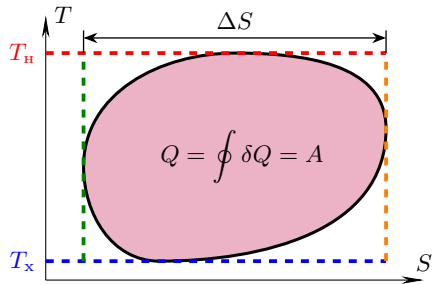
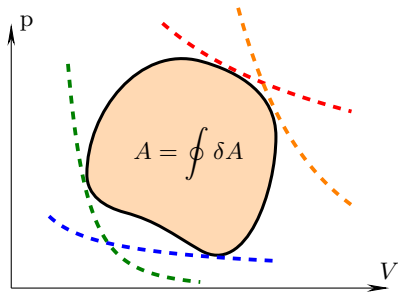


(T, S) – диаграмма

- универсальна для всех систем
- позволяет находить теплоты

Теорема Карно

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_x}{T_H}$$



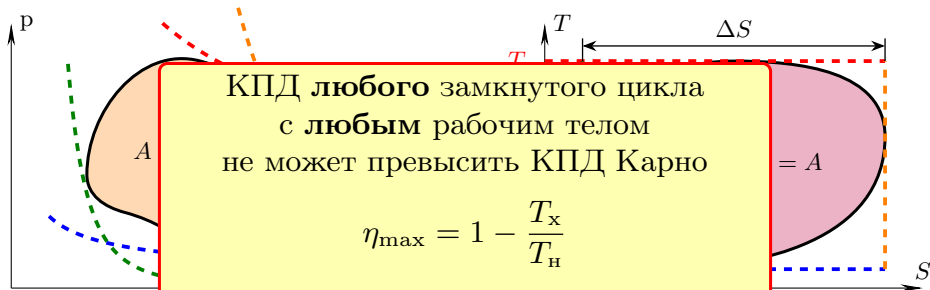
- любой цикл ограничен температурой нагревателя и холодильника
- любой цикл ограничен минимальной и максимальной энтропией

- $Q_H \leq T_H \Delta S$ и $|Q_x| \geq T_x \Delta S$
- Несложный пример на неравенства:

$$\eta = 1 - \frac{|Q_x|}{Q_H} \leq 1 - \frac{T_x}{T_H}$$

Теорема Карно

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_x}{T_H}$$



$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_x}{T_H}$$

ОПТИМАЛЬНЫЙ ЦИКЛ СОСТОИТ ИЗ
ДВУХ ИЗОТЕРМ И ДВУХ АДИАБАТ

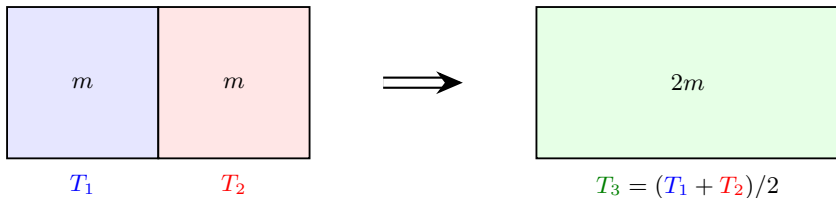
- любой цикл с заданными температурами нагревателя и холодильника
- любой цикл ограничен минимальной и максимальной энтропией

- Несложный пример на неравенства:

$$\eta = 1 - \frac{|Q_x|}{Q_H} \leq 1 - \frac{T_x}{T_H}$$

Необратимый равновесный процесс

теплоизолированная система из двух тел



оба процесса нагрева и охлаждения — политропические:

$$\Delta S_1 = \int_{T_1}^{T_3} \frac{cm dT}{T} = cm \ln \frac{T_3}{T_1} > 0 \quad \text{и} \quad \Delta S_2 = \int_{T_2}^{T_3} \frac{cm dT}{T} = cm \ln \frac{T_3}{T_2} < 0$$

суммарное изменение энтропии:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = cm \ln \frac{(T_1 + T_2)^2}{4T_1 T_2} > 0$$

Неравновесный процесс

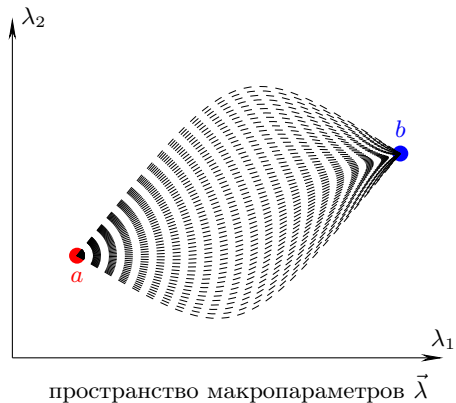


график процесса построить невозможно
нет череды равновесных состояний

- В неравновесном процессе параметры $\vec{\lambda}$ меняются **быстро**, а некоторые из них вообще нельзя определить в течении процесса
- Такой процесс **нельзя обратить**, если не изменить условий его протекания
- В таком процессе расчет приращения неполных дифференциалов затруднителен. Но по-прежнему можно легко рассчитывать изменения полных дифференциалов:

$$\Delta U = U_b - U_a$$

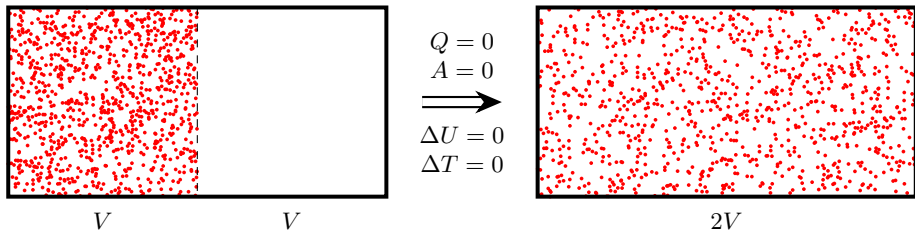
$$\Delta S = S_b - S_a$$

- I начало термодинамики все равно незыблемо:

$$Q = \Delta U + A$$

а что там со II началом?

Расширение идеального газа в пустоту

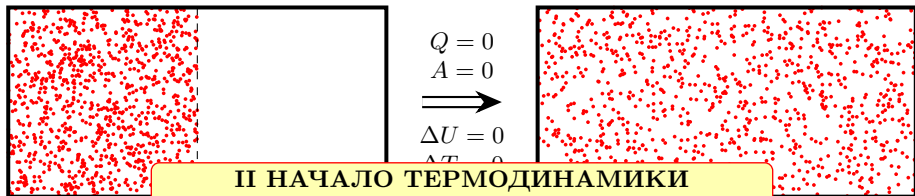


$$S_1 = C_V \ln T + \nu R \ln V + S_0$$

$$S_2 = C_V \ln T + \nu R \ln 2V + S_0$$

$$\Delta S = \nu R \ln 2 > 0$$

Расширение идеального газа в пустоту



II НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$

$$S_1 = C_V \ln$$

равенство достигается в обратимом процессе

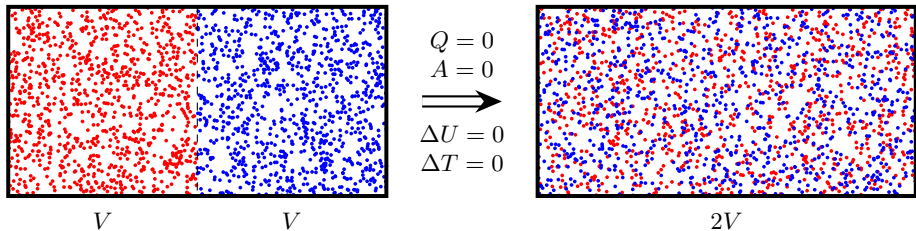
$$\ln 2V + S_0$$

в необратимом процессе — строгое неравенство

**в теплоизолированной системе
энтропия не убывает**

Парадокс Гиббса

два разных газа



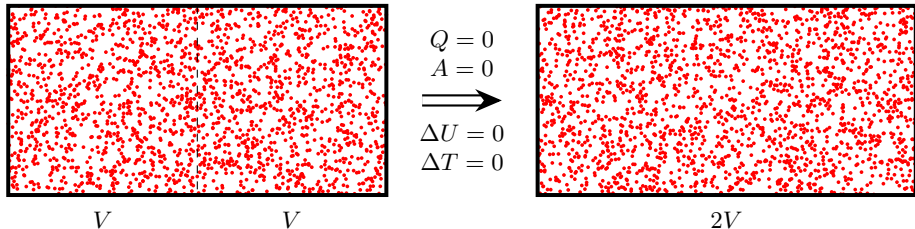
$$\Delta S_1 = \nu_1 R \ln 2 > 0$$

$$\Delta S_2 = \nu_2 R \ln 2 > 0$$

$$\Delta S = (\nu_1 + \nu_2) R \ln 2 > 0$$

Парадокс Гиббса

Один и тот же газ
(в одинаковых количествах)



$$\Delta S_1 = \nu R \ln 2 > 0$$

$$\Delta S_2 = \nu R \ln 2 > 0$$

$$\Delta S = 2\nu R \ln 2 > 0$$

НО ЧТО ИЗМЕНИЛОСЬ?

Демон Максвелла

