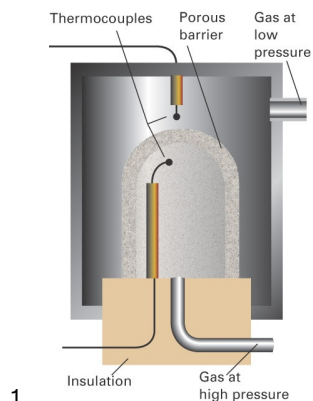


## Joule-Thomsonov pokus

Uređaj za mjerenje Joule-Thomsonovog efekta (izoentalpijska ekspanzija).

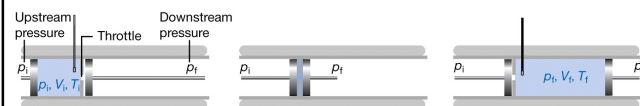
$$\Delta H = 0$$



1

## Joule-Thomsonov pokus

Prijelaz plina iz jedne komore u drugu kroz propusnu membranu predstavlja izoentalpijsku ekspanziju plina.



2

## Joule-Thomsonov koeficijent

$U$ ,  $p$  i  $V$  su funkcije stanja, te je  $H$  funkcija stanja a  $dH$  je egzaktni diferencijal.  $\mu$  je Joule-Thomsonov koeficijent.

$$dH = -\mu C_p dp + C_p dT$$

$$\mu = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_H$$

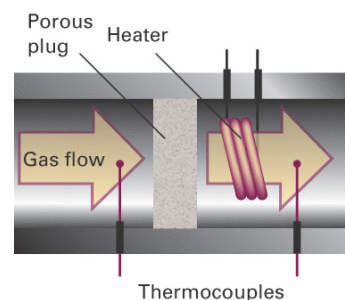
3

## Joule-Thomsonov koeficijent

Uređaj za mjerenje izotermalnog Joule-Thomsonovog koeficijenta.

$$\Delta H = q_p$$

$$\mu_T = \left( \frac{\partial H}{\partial p} \right)_T = -C_p \mu$$

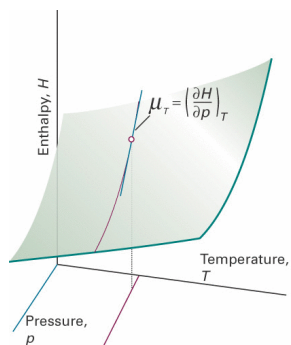


4

## Joule-Thomsonov koeficijent

Izotermalni Joule-Thomsonov koeficijent.

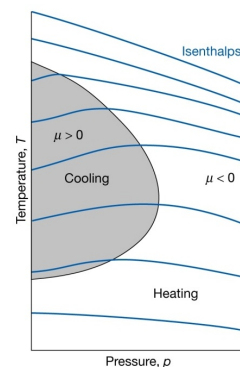
$$\mu_T = \left( \frac{\partial H}{\partial p} \right)_T = -C_p \mu$$



5

## Joule-Thomsonov koeficijent

Joule-Thomsonov koeficijent za realne plinove.



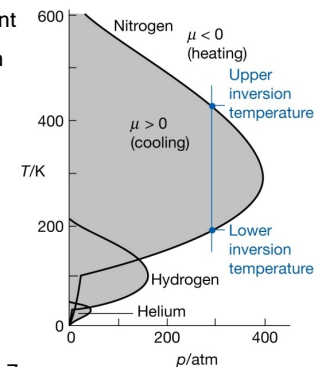
6

## Joule-Thomsonov koeficijent

Joule-Thomsonov koeficijent i inverzijske temperature za realne plinove.

	$T_i/K$	$T_f/K$	$T_b/K$	$\mu/(K \text{ bar}^{-1})$
Ar	723	83.8	87.3	
CO <sub>2</sub>	1500	194.7	+1.10	
He	40	4.2	-0.060	
N <sub>2</sub>	621	63.3	77.4	+0.25

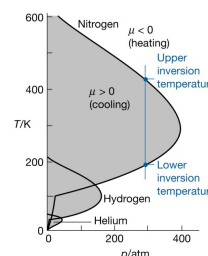
\* More values are given in the Data section.



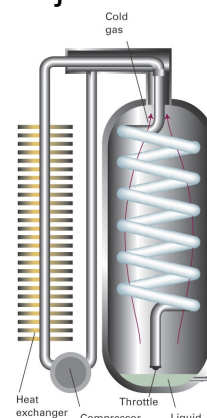
7

## Lindeov uređaj

Koristi Joule-Thomsonovu ekspanziju za ukapljivanje plinova.



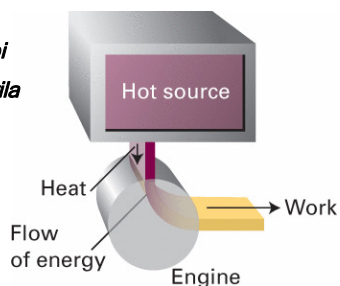
8



## Smjer spontane promjene

II zakon termodinamike:

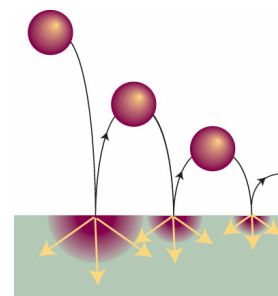
**Nije moguć proces kojim bi se toplina potpuno pretvorila u rad (Kelvin).**



9

## Smjer spontane promjene

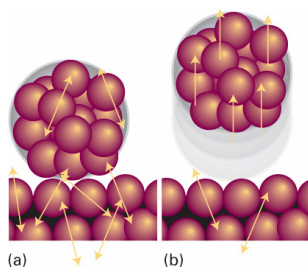
Kinetička energija lopte pretvara se u termalnu energiju podloge.



10

## Smjer spontane promjene

Proces kojim bi se uskladilo termalno gibanje velikog broja molekula tople podloge i preneslo na loptu je vrlo malo vjerojatan.



11

## Entropija

Entropija izoliranog sustava raste tijekom spontanog procesa.

Entropija sustava i okoliša raste tijekom spontanog procesa.

$$\Delta S_{\text{tot}} > 0$$

Termodinamička definicija entropije:  $dS = \frac{dq_{\text{rev}}}{T}$

Za mjerljive promjene između dva stanja:  $\Delta S = \int_1^2 \frac{dq_{\text{rev}}}{T}$

12

## Entropija okoliša

Okolina je konstantnog volumena.

$$dS_{\text{okoliša}} = \frac{dq_{\text{rev, okoliša}}}{T_{\text{okoliša}}} = \frac{dq_{\text{okoliša}}}{T_{\text{okoliša}}}$$

$$\Delta S_{\text{okoliša}} = \frac{dq_{\text{okoliša}}}{T_{\text{okoliša}}}$$

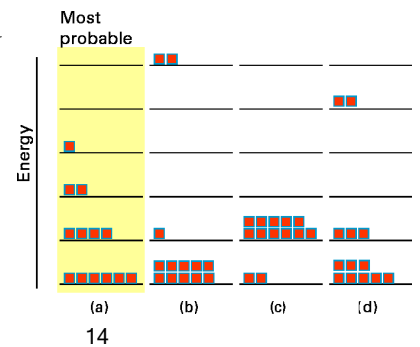
13

## Statistička Entropija

Boltzmanova definicija entropije:

$$S = k \cdot \ln W$$

$W$  je broj dostupnih mikrostanja.



14

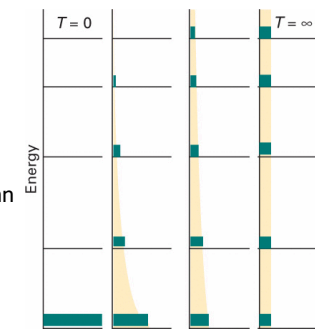
## Statistička Entropija

Boltzmanova definicija entropije:

$$S = k \cdot \ln W$$

$$dS = \frac{dq_{\text{rev}}}{T}$$

Na većoj temperaturi dostupan je veći broj mikrostanja.

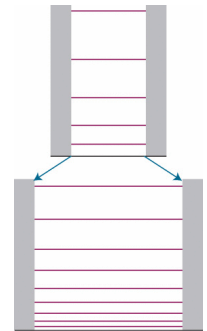


15

## Statistička Entropija

Kod ekspanzije plina smanjuje se energija dostupnih razina i povećava se broj dostupnih mikrostanja.

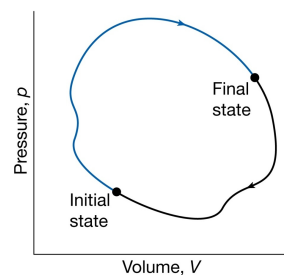
$$S = k \cdot \ln W$$



16

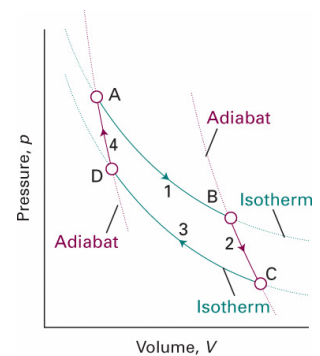
## Entropija - funkcija stanja

$$\oint \frac{dq_{\text{rev}}}{T} = 0$$



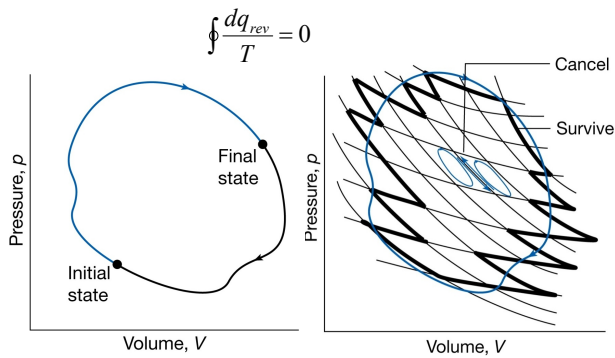
17

## Carnotov ciklus



18

## Carnotov ciklus



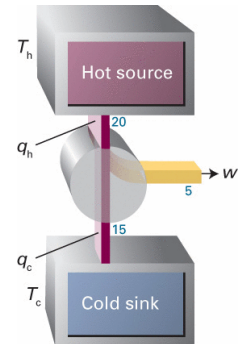
19

## Efikasnost $\eta$ (eta)

$$\eta = \frac{|w|}{|q_h|}$$

Carnotova efikasnost:

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$



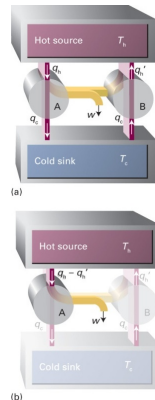
20

## Efikasnost $\eta$ (eta)

Efikasnost svih reverzibilnih uređaja bez obzira na konstrukciju je jednaka i ovisi o omjeru temperatura spremnika.

Termodinamička temperaturna ljestvica:

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad T = (1 - \eta)T_h$$



21

## Clausiusova nejednakost

$$|dw_{rev}| \geq |dw|$$

$$dw - dw_{rev} \geq 0$$

$$dU = dq + dw = dq_{rev} + dw_{rev}$$

$$dq_{rev} - dq = dw - dw_{rev} \geq 0$$

$$dq_{rev} \geq dq$$

$$\frac{dq_{rev}}{T} \geq \frac{dq}{T}$$

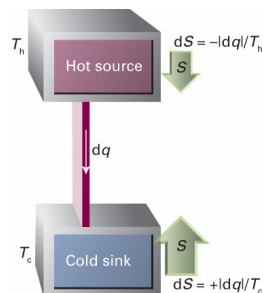
$$dS \geq \frac{dq}{T}$$

22

## Prijenos topline

Kada topline prelazi s toplijeg spremnika na hladnijeg, promjena entropije hladnijeg je veća od promjene entropije toplijeg spremnika.

Ukupna promjena entropije je veća od nule i proces je spontan.



23

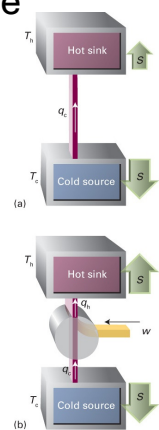
## Prijenos topline

Prijenos topline s hladnijeg spremnika na topliji nije spontan proces.

Promjena entropije hladnijeg spremnika je veća od promjene entropije toplijeg spremnika.

Ukupna promjena entropije je manja od nule i proces je nije spontan.

Toplina se može prenositi uz dovođenje rada.



24