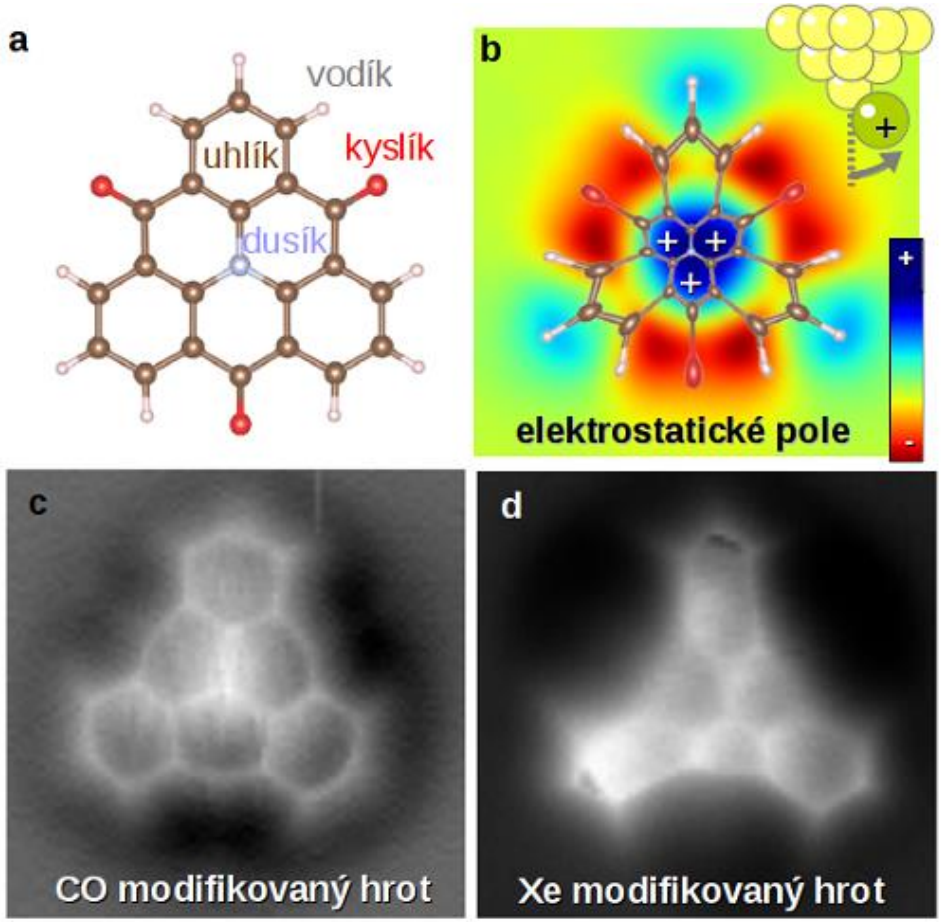
TERMODYNAMIKA

© 2022+ RNDr. Čeněk Kodejška, Ph.D.

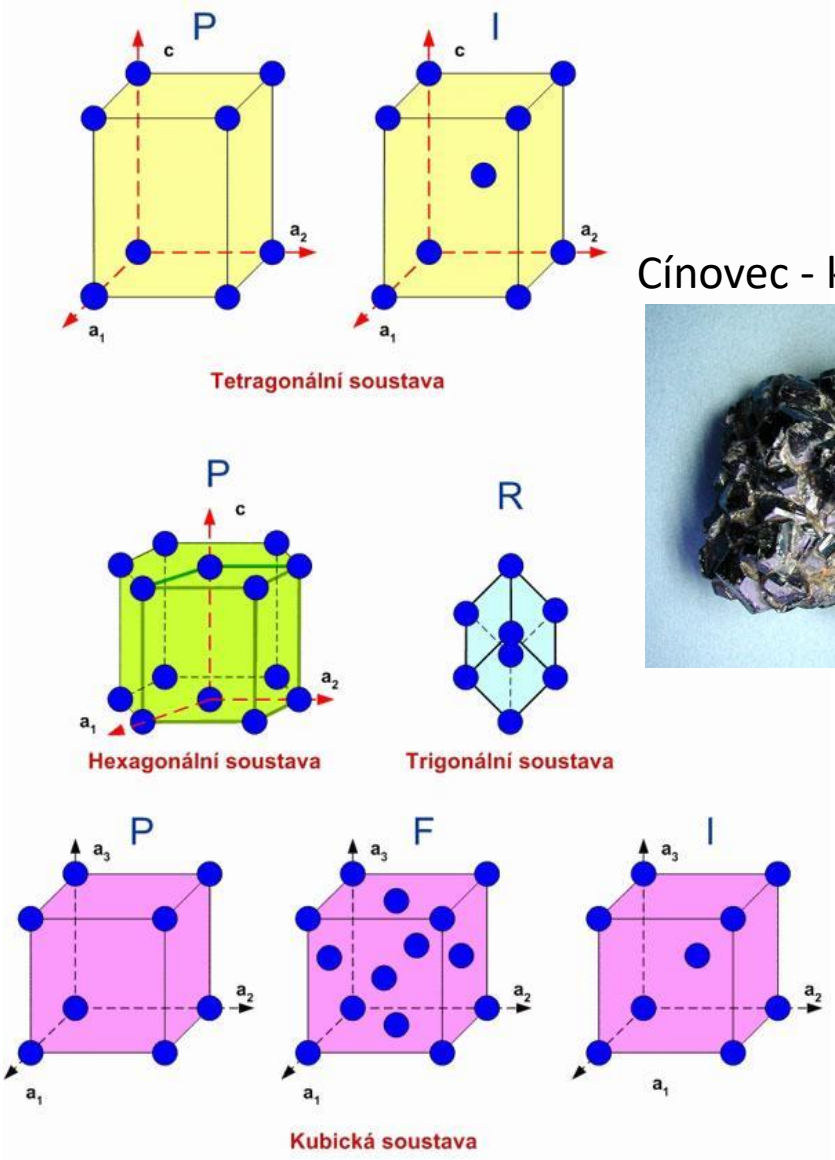
1. Základní poznatky molekulové fyziky

Základy kinetické teorie stavby látek

- Látka se skládá z částic
- Částice se pohybují neustále a neuspořádaně – **tepelný pohyb**
- Částice na sebe působí **přitažlivými** (větší vzdálenosti) i **odpudivými** (malé vzdálenosti) **silami**
- Nespojitá (**diskrétní**) **struktura** látek
- Pohyb částic různou rychlostí – **rychlost má statistický charakter**



1. Základy kinetické teorie stavby látek



chalkopyrit

Cínovec - kasiterit

NaCl

1. Základy kinetické teorie stavby látek

Experimentální důkazy

- Difuze
- Brownův pohyb
- Tlak plynu

1. Základy kinetické teorie stavby látek

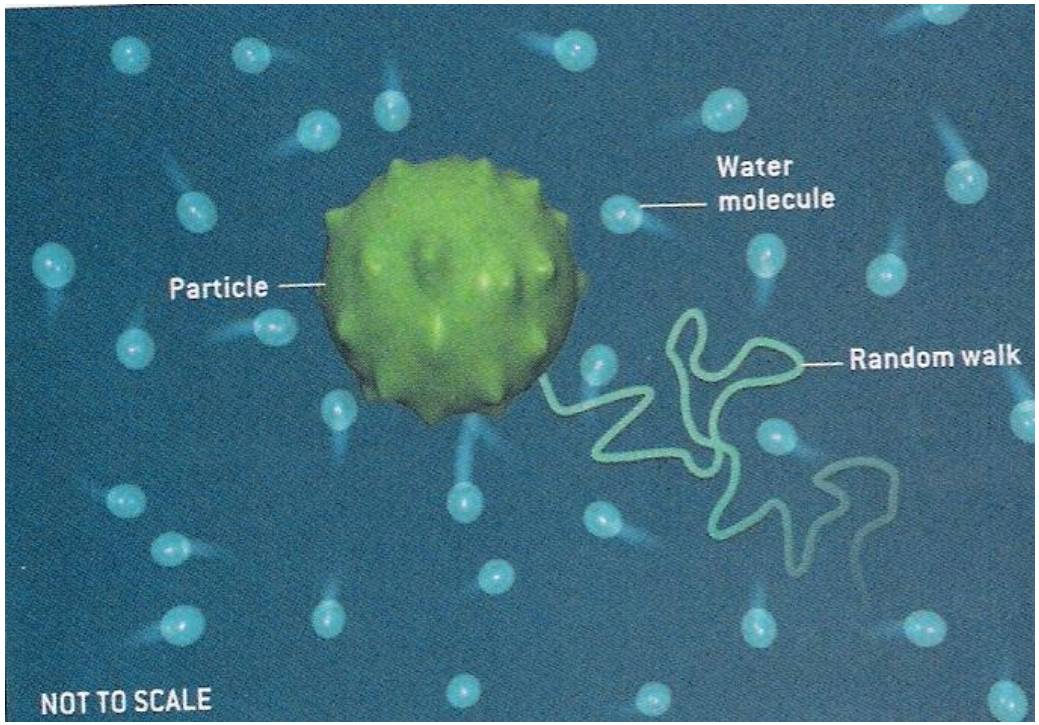
Difuze – samovolné pronikání částic jedné látky mezi částice druhé látky

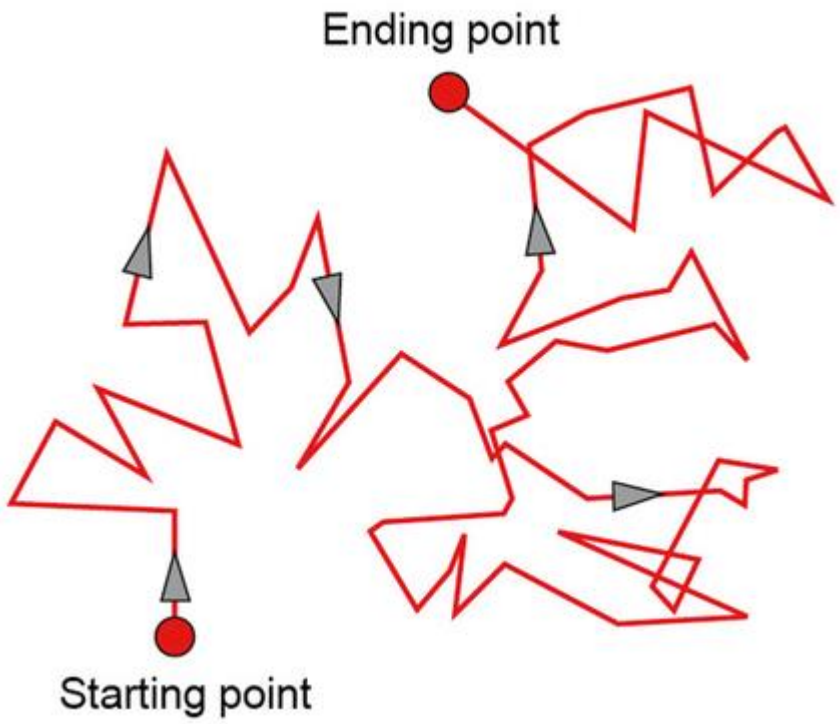
- Z oblasti vysoké koncentrace pronikají částice do oblasti nízké koncentrace
- Probíhá v plynech, kapalinách, pevných látkách (integrované obvody, fotovoltaika, kompost)
- Biologie: osmóza, ionty prvků v těle – krevní obraz
- Potravinářství: sterilizace potravin cukrem (sirupy) nebo solí (maso)

1. Základy kinetické teorie stavby látek

Brownův pohyb – vzniká působením molekul prostředí na makročástici

- Robert Brown (1773-1858) – skotský fyzik; 1827 pohyb rozdrcených pylových zrn ve vodě
- podstatu vysvětlil až v roce 1905 A. Einstein
- 1827 – od tohoto roku kalendář začíná pondělím; + A. Volta, L. v. Beethoven
- 1828 - * Jules Verne, Henrik Ibsen, L.N. Tolstoj
- Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=6VdMp46ZIL8&ab_channel=AlexanderC





1. Základy kinetické teorie stavby látek

Tlak plynu – vzniká působením molekul plynu na stěny uzavřené nádoby

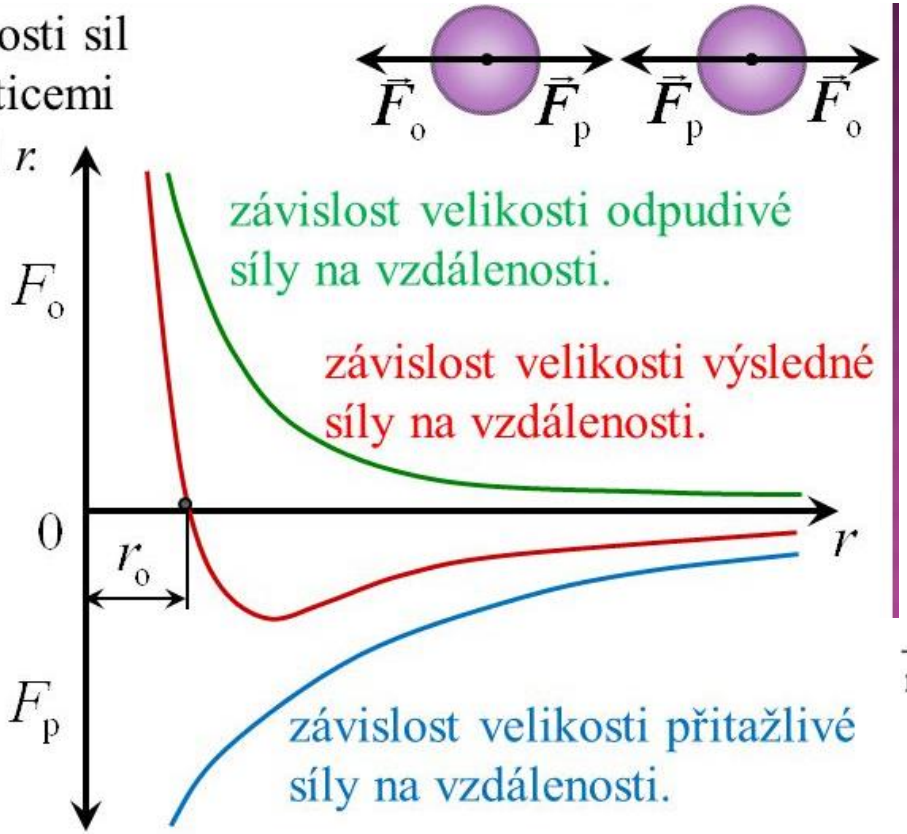
- nafouknutá pneumatika
- kompresor
- Spreje, deodoranty
- Parní turbína
- Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=t0iHHHI87Tc&ab_channel=PaulaAlmeida

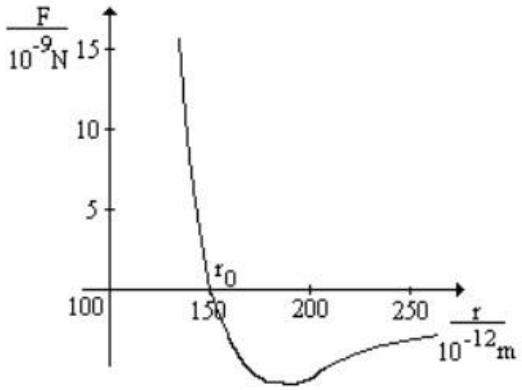
1. Základy kinetické teorie stavby látek

Vzájemné působení částic – přitažlivé a odpudivé síly

Graf závislosti velikosti sil působících mezi částicemi na jejich vzdálenosti r:

Jsou-li částice ve vzdálenosti r_o, jsou v rovnovážné poloze. Výsledná síla působící mezi částicemi je nulová.





1. Základy kinetické teorie stavby látek

Modely struktur látek různých skupenství

Pevné látky

- Částice uspořádané v krystalové mřížce (kromě amorfních látek)
- Přitažlivé síly: velké – vlastní objem a tvar
- Odpudivé síly: velké – nestlačitelné
- **Ep > Ek** – částice převážně kmitají kolem rovnovážné polohy v mřížce

Kapalné látky

- Molekuly se volně pohybují
- Přitažlivé síly: působí pouze na nejbližší částice – tekutost, dělitelnost
- Odpudivé síly: velké – nestlačitelné
- **Ep ≈ Ek** – částice kmitají kolem rovnovážné polohy a současně se pohybují v celém objemu kapaliny

Plynné látky

- Volný pohyb částic: **Ep < Ek** – rychlost řádově 10^2 m/s
- Přitažlivé síly: malé – nemají vlastní objem a tvar, rozpínavost
- Odpudivé síly: malé – stlačitelné

1. Základy kinetické teorie stavby látek

Stavové veličiny a rovnovážný stav soustavy

Stavové veličiny

- Různá tělesa mají různé fyzikální vlastnosti: m, V, T, ρ
- **Tlak** – p
- **Objem** – V
- **Termodynamická teplota** – T

- Při vzájemném kontaktu s okolím dochází ke změně stavových veličin
- Počáteční a konečný stav
- Izolovaná soustava – nedochází k výměně energie a částic s okolím

Rovnovážný stav a rovnovážný děj

- Stav kdy se nemění stavové veličiny p, V, T – jsou konstantní
- Za sebou jdoucí sled rovnovážných stavů
- Reálný děj – většinou nerovnovážný, rovnovážný probíhá-li pomalu
- utajený var

1. Základy kinetické teorie stavby látek

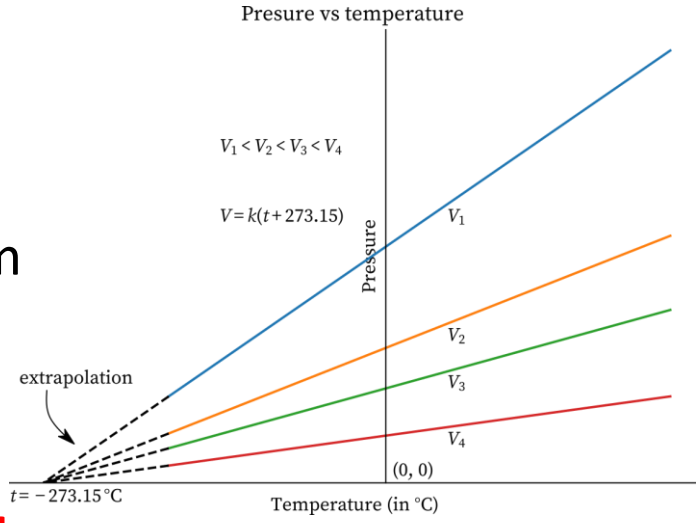
Teplota a její měření

Teplotní stupnice

- Teplota – fyzikální veličina charakterizující velikost vnitřní energie tělesa
- Celsiova – rovnovážný stav vody a ledu: 0°C, voda-sytá pára: 100 °C
- Fahrenheitova – 0°F: chlorid amonný, voda, led; 98°F: teplota člověka
- Teplotní stupnice závisí na použité teploměrné látce (voda, líh, Hg)

Termodynamická teplota

- Lord Kelvin – **William Thomson (1824-1907)**
- pV diagramy různých plynů se protnou v jednom bodě: 0 K = –273,15 °C
- **Termodynamická teplota** – T $[T] = \mathrm{K}$ (kelvin) je univerzální, nezávisí na konkrétní látce
- Základním bodem je teplota **trojného bodu vody**
- $\boldsymbol{t = (T - 273,15)°C}$
- $\boldsymbol{T = (t + 273,15)K}$ $\qquad\qquad$ $\boldsymbol{\Delta t = \Delta T}$



1. Základy kinetické teorie stavby látek

Teplota a její měření

Druhy teploměrů

- kapalinové (Hg, líh)
- bimetalové
- digitální – termistorové
- bezkontaktní – IČ čidlo
- termograf – zapisuje teplotu na papír
- pyrometr – měření vysokých teplot řádově 10^3

1. Základy kinetické teorie stavby látek

Molární veličiny

Atomové konstanty

- **Avogadrova konstanta** – počet částic v 1 molu libovolné látky
  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ **částic/mol** (počet atomů uhlíku ${}^{12}_{6}C$ o m = 12 g)
- **Atomová hmotnostní jednotka** – 1/12 hmotnosti atomu uhlíku ${}^{12}_{6}C$
  $m_u = 1,6605 \cdot 10^{-27}$ **kg**

Relativní atomová a molekulová hmotnost

- $A_r = \frac{m_a}{m_u}$ — m_a **- klidová hmotnost atomu**
- $M_r = \frac{m_m}{m_u}$ — m_m **- klidová hmotnost molekuly**

Látkové množství a molární hmotnost

$M_m = M_r \cdot 10^{-3}$ kg/mol

- $n = \frac{N}{N_A}$ — N **– počet částic v daném množství látky**
- $M_m = \frac{m}{n} = N_A \cdot m_0$ — m **- hmotnost látky,** m_0 **– hmotnost jedné částice**

1. Základy kinetické teorie stavby látek

Ukázkový příklad

Výpočet hmotnosti molekuly kyslíku a molární hmotnosti

- $A_r\ (O_2) = 16$
- Kyslík tvoří dvouatomové molekuly: $M_r\ (O_2) = 32$

$$m_0(O_2) = M_r \cdot m_u = 32 \cdot 1{,}6605 \cdot 10^{-27} kg = 5{,}3136 \cdot 10^{-26} kg$$

$$M_m(O_2) = M_r \cdot 10^{-3} = 32 \cdot 10^{-3} kg/mol$$

nebo 2. způsob

$$M_m(O_2) = N_A \cdot m_0 = 6{,}02232 \cdot 10^{23} \cdot 5{,}3136 \cdot 10^{-26} \frac{kg}{mol} = 32 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{mol}$$

Výpočet rychlosti molekuly kyslíku při teplotě 0 °C

$t = 0\,°C = 273{,}15\,K$
$k_B = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\,J/K$
$v = ?\,m/s$

$$v = \sqrt{\frac{3k_BT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 273{,}15}{5{,}3136 \cdot 10^{-26}}} \frac{m}{s} = \mathbf{461\ m/s}$$

2. Vnitřní energie, práce, teplo

Vnitřní energie tělesa a její změny

Vnitřní energie tělesa

- **Vnitřní energie tělesa** – U $[U]$ = J (joule)
- Je dána součtem celkové E_k a E_p atomů a molekul v látce
- Při výpočtech neuvažujeme konkrétní velikost této energie, ale **změnu vnitřní energie ΔU**

Př. Jak se změní vnitřní energie tělesa o hmotnosti 2 kg při dopadu na zem z výšky 100 m?

$m = 2\ kg$
$h = 100\ m$
$\Delta U = ?\ (J)$

$$\Delta U = \Delta E_p = mgh_1 - mgh_2 = mgh$$
$$\Delta U = 2 \cdot 10 \cdot 100\ J = 2000\ J = \mathbf{2\ kJ}$$

Vnitřní energie tělesa se zvýší o 2 kJ.

2. Vnitřní energie, práce, teplo

Vnitřní energie tělesa a její změny

Změna vnitřní energie

- konáním práce (tření při posouvání skříně)
- tepelnou výměnou (ohřev vody na čaj)
- zářením (Slunce)

Změna vnitřní energie konáním práce

- třecí síly při posouvání tělesa, brždění auta, obrábění kovů, ložiska, mletí
- deformace tělesa (ohybem, kroucením – ohýbáním drátu ho lze rozdělit)
- stlačení nebo rozpínání plynu (motory aut, kompresor, deodorant ve spreji)

Př. Těleso o hmotnosti 1 kg klouže po nakloněné rovině délky 2,1 m, která svírá s vodorovnou rovinou úhel 30°. Velikost rychlosti na konci nakloněné roviny je 4,1 m/s. Určete přírůstek vnitřní energie tělesa vzniklý třením.

$m = 1\ kg$
$l = 2{,}1\ m$
$\alpha = 30°$
$v = 4{,}1\ m/s$

$\Delta U = ?\ (J)$

$E_p = E_k + \Delta U$

$\sin\alpha = \frac{h}{l}$

$\Delta U = mgh - \frac{1}{2}mv^2$

$\Delta U = mgl\sin\alpha - \frac{1}{2}mv^2$

$\Delta U = 1 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}1 \sin 30 - \frac{1}{2}4{,}1^2 = \mathbf{1{,}9\ J}$

Vnitřní energie tělesa se zvýší o 2 J.

2. Vnitřní energie, práce, teplo

Tepelná výměna. Teplo. Měrná tepelná kapacita.

Tepelná výměna

- **děj, při kterém částice teplejšího tělesa předávají srážkami svoji energii částicím studenějšího tělesa**
- Lžíce ponořená do horké polívky
- Ohřívání vody na vařiči
- Chlazení potravin v ledničce
- Tavení kovů v pecích

Teplo

- Je energie, která je buď pohlcena studenějším tělesem, nebo odevzdána teplejším tělesem při tepelné výměně
- Fyzikální veličina: **teplo** Q $[Q]$ = J (joule) $\quad 1\,J = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
- Rozlišujme pojmy **teplo vs. teplota**

$$Q = cm\Delta T = cm(T_2 - T_1)$$

m – **hmotnost tělesa**

$\Delta T = (T_2 - T_1)$ – **změna teploty**

2. Vnitřní energie, práce, teplo

Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita – c $\qquad [c] = J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

- **materiálová konstanta charakterizující schopnost tělesa přijímat nebo odevzdávat teplo**
- **Číselně je rovna teplu, které přijme těleso o hmotnosti 1 kg při zvýšení teploty o 1 K (1°C)**
- Závisí na teplotě, takže je to konstanta jen pro určitý malý teplotní interval

Tabulkové hodnoty

látka	$c(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
Fe	452
Cu	383
Al	896
Pb	129
voda	**4180**
vzduch	1005

2. Vnitřní energie, práce, teplo

Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita kovů

- Relativně malá
- Rychle se zahřejí (řezání dřeva, tavení kovů), rychle zchladnou

Měrná tepelná kapacita vody

- Vysoká hodnota – pomalu se ohřeje, ale pomalu i chladne
- Boilery – Akumulace energie do ohřevu vody (FVE, TČ)
- Radiátory – teplonosné médium v domácnostech
- Mírné změny klimatu v přímořských oblastech – stabilní počasí

Maxima a minima

látka	$c(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
Plynný vodík	14 300
Plynný radon	94

2. Vnitřní energie, práce, teplo

Kalorimetrická rovnice

- **popisuje zákon zachování energie při tepelné výměně**
- Tepelná výměna mezi tělesy probíhá tak dlouho, až se teploty vyrovnají

Kalorimetrická rovnice bez kalorimetru a s kalorimetrem

$$c_1 m_1 (T_1 - T) = c_2 m_2 (T - T_2)$$

c_1, c_2 - měrné tepelné kapacity těles
m_1, m_2 - hmotnosti těles
T_1 - počáteční teplota teplejšího tělesa
T_2 - počáteční teplota studenějšího tělesa
T – výsledná teplota po dosažení rovnovážného stavu

$$c_1 m_1 (T_1 - T) = c_2 m_2 (T - T_2) + C_k (T - T_2)$$

C_k – tepelná kapacita kalorimetru $(\frac{J}{K})$

2. Vnitřní energie, práce, teplo

Kalorimetrická rovnice

Př. Do vody o hmotnosti 6,7 g ponoříme teploměr o tepelné kapacitě 2,0 J/K. Před ponořením do vody ukazoval teplotu 17,8 °C, po dosažení rovnováhy teplotu 32,4 °C. Jaká byla teplota vody před měřením?

$m_1 = 6{,}7\ g = 0{,}0067\ kg$

$C = 2{,}0\ \frac{J}{K}$

$t_2 = 17{,}8\ °C$

$t = 32{,}4\ °C$

$t_1 = ?\ (°C)$

$$c_1 m_1 (t_1 - t) = C(t - t_2)$$

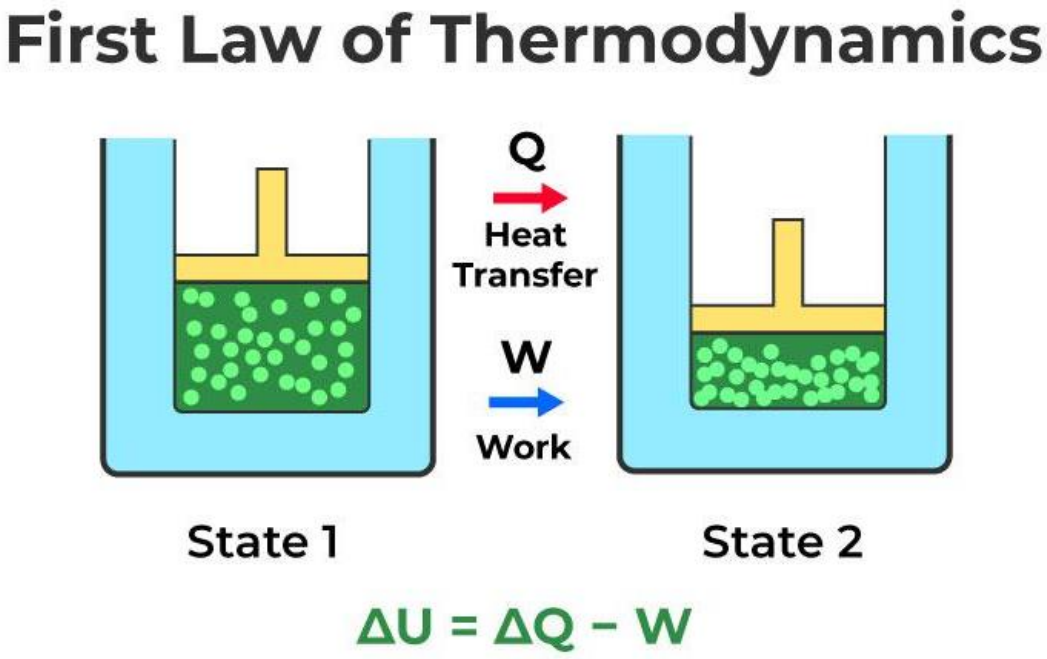
$$t_1 = \frac{C(t - t_2)}{c_1 m_1} + t$$

$$t_1 = \frac{2 \cdot (32{,}4 - 17{,}8)}{4180 \cdot 0{,}0067} + 32{,}4 = \mathbf{33{,}4\ °C}$$

Pozn. Indexem 1 značíme horkou vodu před ponořením teploměru, indexem 2 značíme teploměr, který přijal teplo od vody. Tepelná výměna tedy proběhla mezi horkou vodou a teploměrem.

2. Vnitřní energie, práce, teplo

První termodynamický zákon



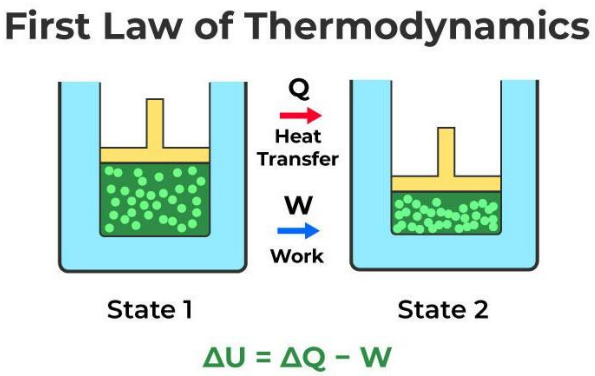
ΔU – *změna vnitřní energie plynu*
ΔQ – *teplo dodané plynu okolními tělesy*
W – *práce vykonaná vnější silou při stlačení plynu*

2. Vnitřní energie, práce, teplo

První termodynamický zákon

1. TMDZ z pohledu vnějších těles

ΔU – *změna vnitřní energie plynu*
Q – *teplo dodané plynu okolními tělesy*
W – *práce vykonaná plynem*



$$Q = \Delta U + W$$

Teplo Q dodané plynu se přemění na přírůstek vnitřní energie plynu ΔU a práci W, kterou plyn vykoná.

2. Vnitřní energie, práce, teplo

První termodynamický zákon

Zvláštní případy

Adiabatický děj – izolovaná soustava, Q = 0

$$\Delta U = -W$$

- Veškerá práce, kterou plyn koná, jde na úkor jeho vnitřní energie.
- Veškerá práce vykonaná vnější silou se přemění na přírůstek vnitřní energie plynu.

Izochorický děj – $\Delta V = 0$, $W = 0$

$$\Delta U = Q$$

- Práce se nekoná, veškeré dodané teplo se přemění na přírůstek vnitřní energie plynu.

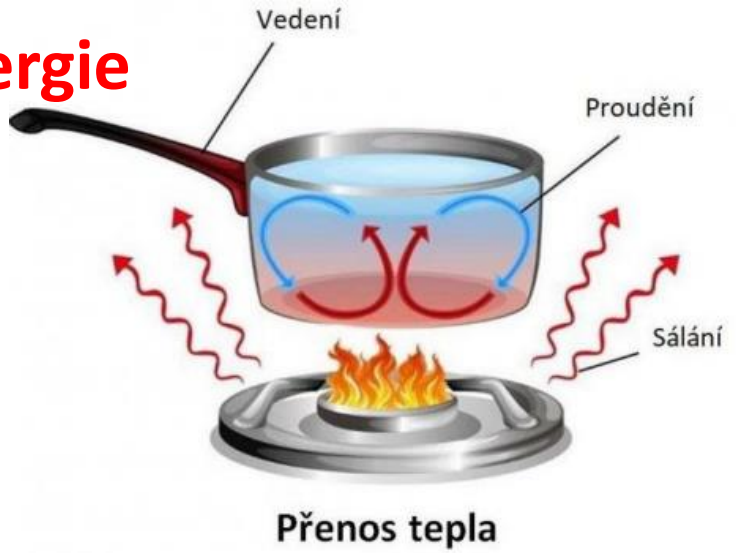
Izotermický děj – $\Delta T = 0$, $\Delta U = 0$

$$Q = W$$

- Veškeré dodané teplo se přemění na práci, kterou vykoná plyn.

2. Vnitřní energie, práce, teplo

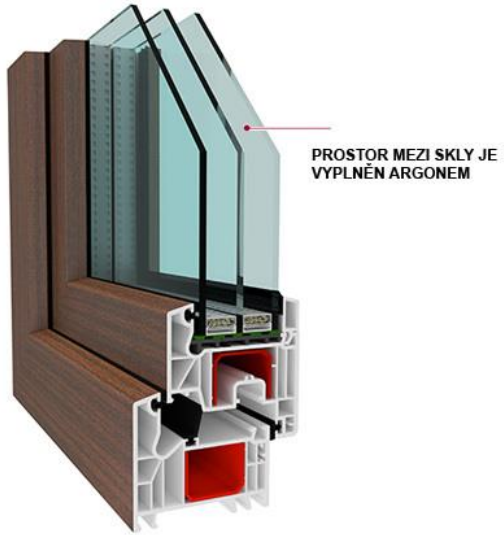
Přenos vnitřní energie

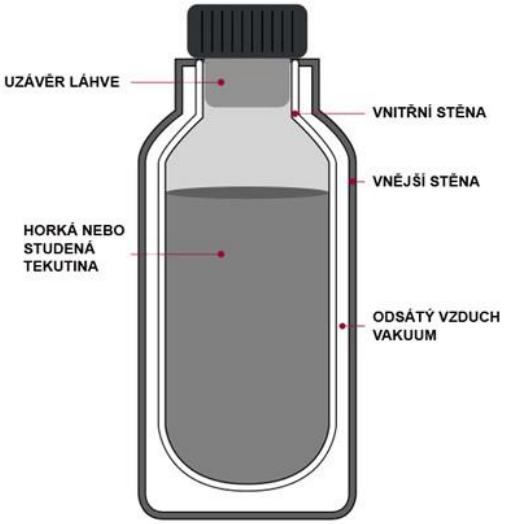


Přenos tepla

Tepelnou výměnou – vedením

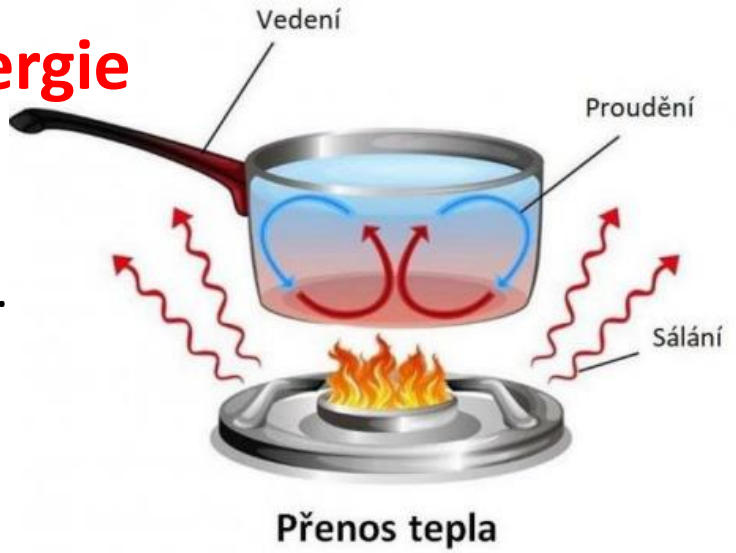
- Ohřívání tyče na jednom konci
- Rukojetě hrnců a pánví
- **Dobré vodiče** tepla: kovy
- **Špatné vodiče** tepla: sklo, porcelán, dřevo, plast
- **Nejlepší izolace**: vakuum – okna, termosky
- **Dobrá izolace** – pórovité materiály obsahující vzduch: cihly, vata, srst, skelná vlákna





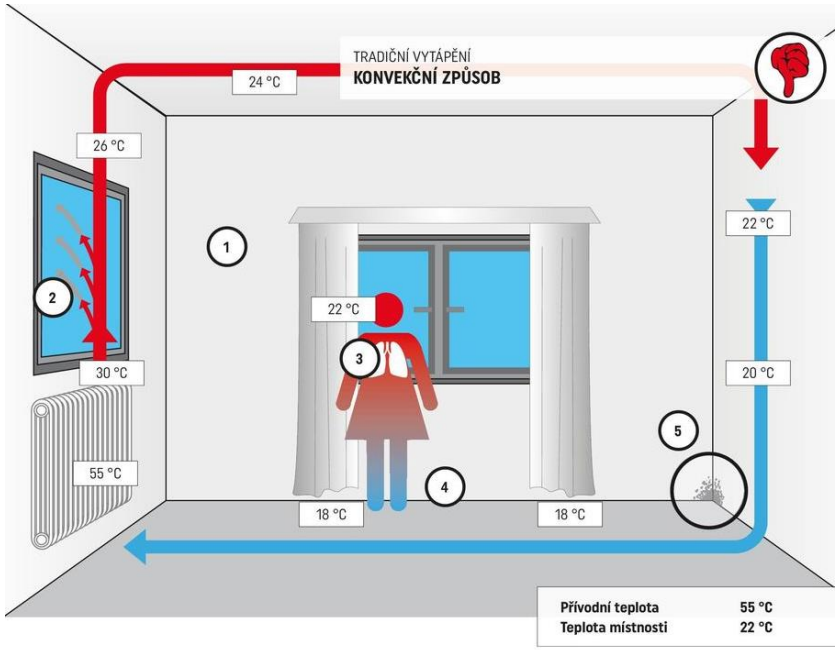
2. Vnitřní energie, práce, teplo

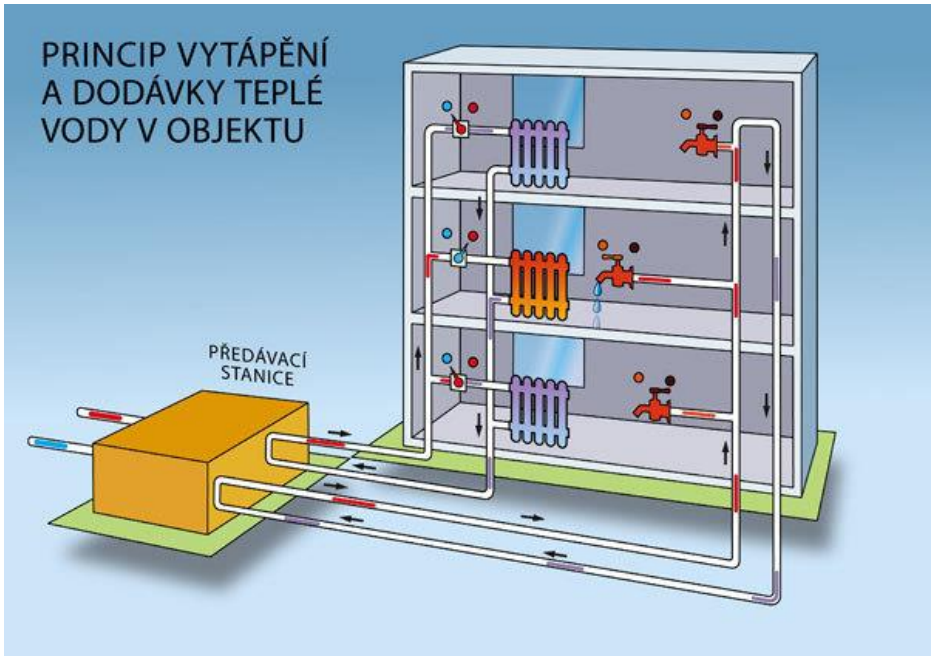
Přenos vnitřní energie



Tepelnou výměnou – prouděním (konvekcí)

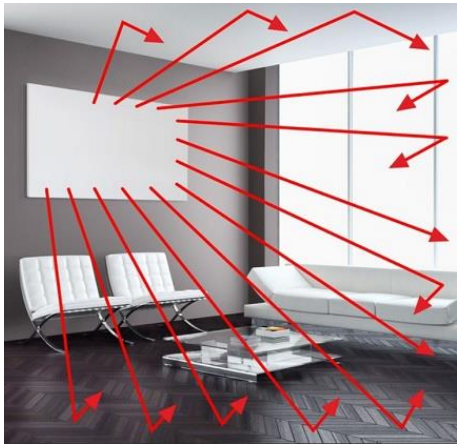
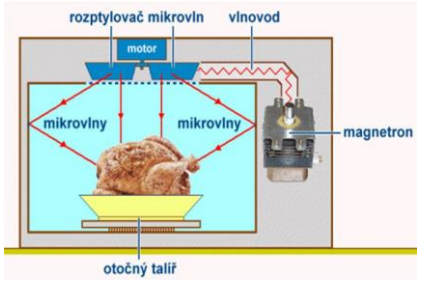
- Probíhá pouze v kapalinách a plynech
- Př.: cirkulace ohřáté vody v topení, v hrnci, apod.
- Teplá voda má menší hustotu, stopá samovolně topením vzhůru, předává teplo radiátorům, ochlazená klesá zpět ke zdroji tepla – **samotíž**





2. Vnitřní energie, práce, teplo

Přenos vnitřní energie

Tepelnou výměnou – zářením

- **Solární vodní kolektory** – ohřev vody pro RD
- Horské slunce, **solárko** (nevytváří vitamín D)
- Sluneční záření – **solární konstanta: 1361 W/m^2**
  FVE panely, elektromobily (Sono Motors)
- **IČ panely** – moderní zdroje topení v místnosti
- **Mikrovlnná trouba**