

teplo a teplota

nultá veta termodynamická

termodynamika 1

čo je termodynamika

- najprv je užitočné jasne si povedať, čo termodynamika nie je:

termodynamika nie je dynamika

- pod dynamikou rozumieme vo fyzike opis časového vývoja stavov rôznych fyzikálnych systémov (kameňa, kolesa, struny, vody, ...)
- typickým príkladom dynamiky je mechanika (vdďaka zákonu sily)
- termodynamika zväčša neskúma časový vývoj stavov fyzikálnych systémov, skôr skúma rovnovážne stavy a prechody medzi nimi (väčšinou bez ohľadu na to, ako rýchlo tieto prechody prebiehajú)

aké rovnovážne stavy a čoho?

- toto je úplne kľúčová otázka, ale vôbec to nie je jednoduchá otázka
- najprv skúsime neporiadnu odpoveď, potom ju skúsime vylepšiť
- neporiadna odpoveď: termodynamika skúma také fyzikálne systémy, ktorých stavy sú dané (okrem iných veličín) aj teplotou
- prečo neporiadna? pretože teplota zatiaľ nie je fyzikálna veličina
- je to subjektívny pocit, ktorému intuitívne dobre rozumieme, ale to nestačí na to, aby charakterizoval stavy fyzikálnych systémov

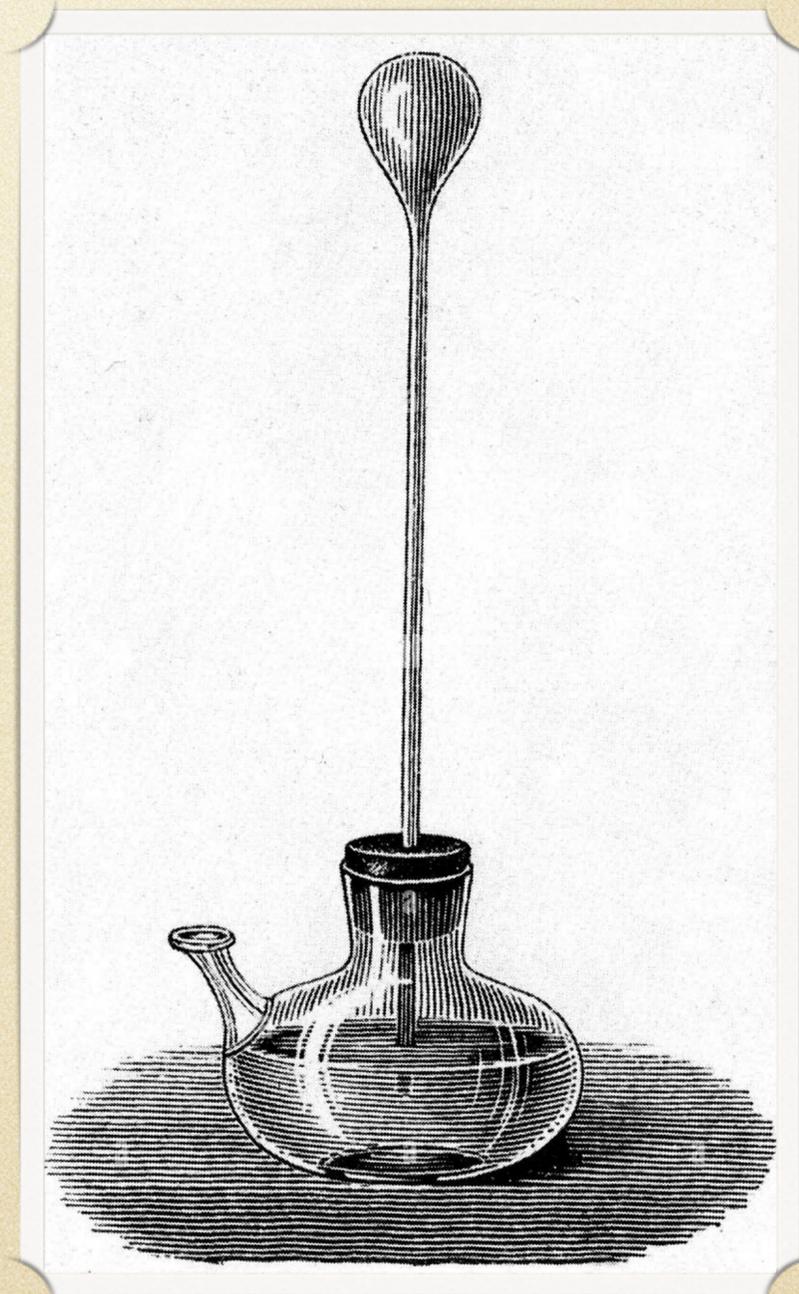
výnimočnosť pocitu tepla

- subjektívny pocit tepla sa od mnohých iných subjektívnych pocitov (bolesť, únava, hlad, smäd, nervozita, ...) významne líši tým, že pocitu tepla zodpovedá nejaká konkrétna fyzikálna veličina
- existencia takejto fyzikálnej veličiny vôbec nie je samozrejmosťou (naopak, porovnaním s inými pocitmi vidíme, že je to výnimočná vec)
- fyzikálna veličina zodpovedajúca pocitu tepla sa nevolá teplo
- volá sa teplota (teplo je iná fyzikálna veličina, rozdiel je podstatný)

nultý krok k termodynamike

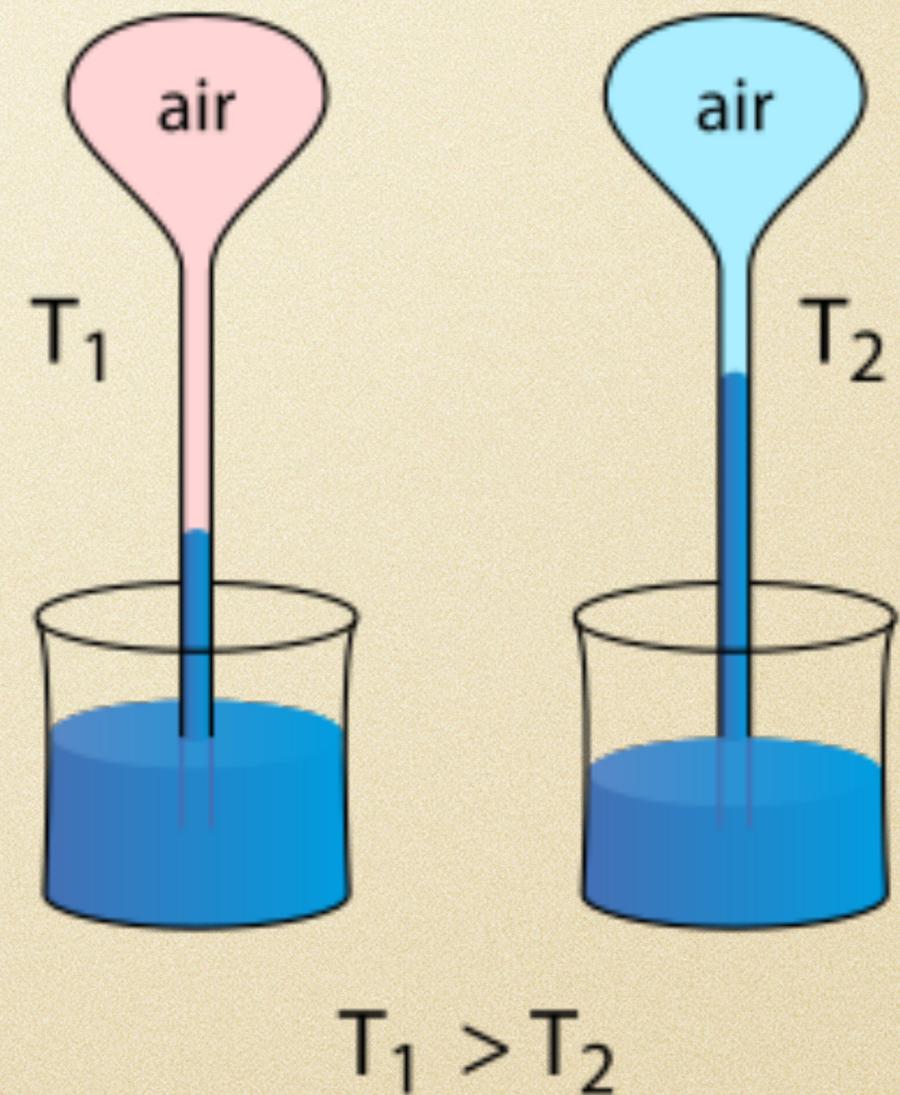
Galileiho termoskop (okolo 1600)

- sklenená trubica s bankou naplnená vzduchom, ponorená do vody
- ak banku ochladíme (napríklad tak, že ju prenesieme na nejaké chladnejšie miesto) tak voda v trubici stúpne
- ak banku zohrejeme, voda v trubici klesne
- nejaká známa veličina (výška vodného stĺpca) sa mení v súlade s naším pocitom tepla



poznámka bokom: ako to funguje

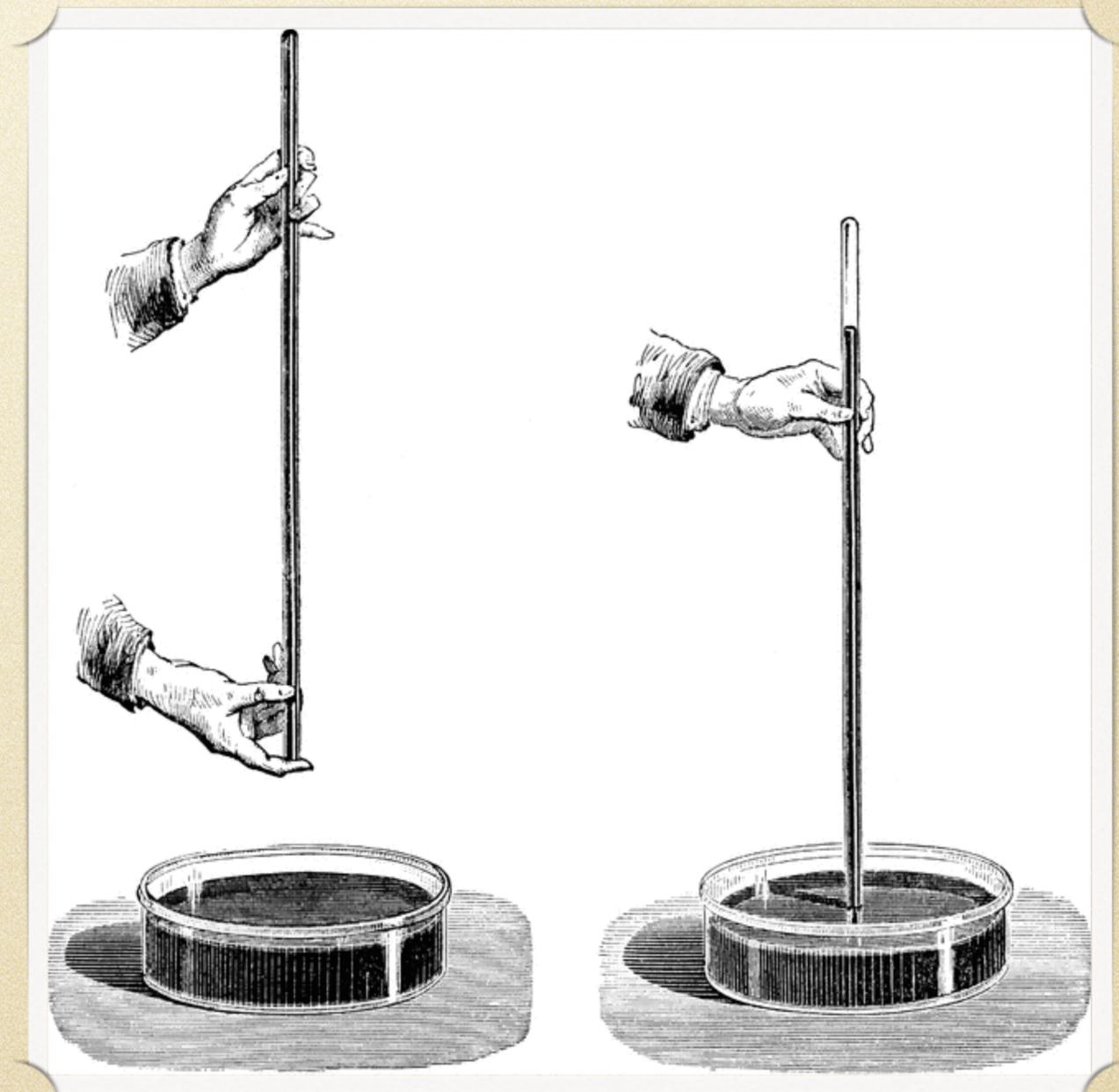
- zohriaty vzduch v banke zväčší svoj tlak na vodu, na ktorú z druhej strany pôsobí atmosférický tlak
- vodný stĺpec sa preto posúva (klesá), čím narastá objem vzduchu v banke + trubici, čím klesá jeho tlak
- toto pokračuje, až kým sa tlaky nevyrovnajú
- takto to vieme opísať dnes, vtedy to jasné nebolo, samotný tlak vzduchu nebol známy



tlak vzduchu

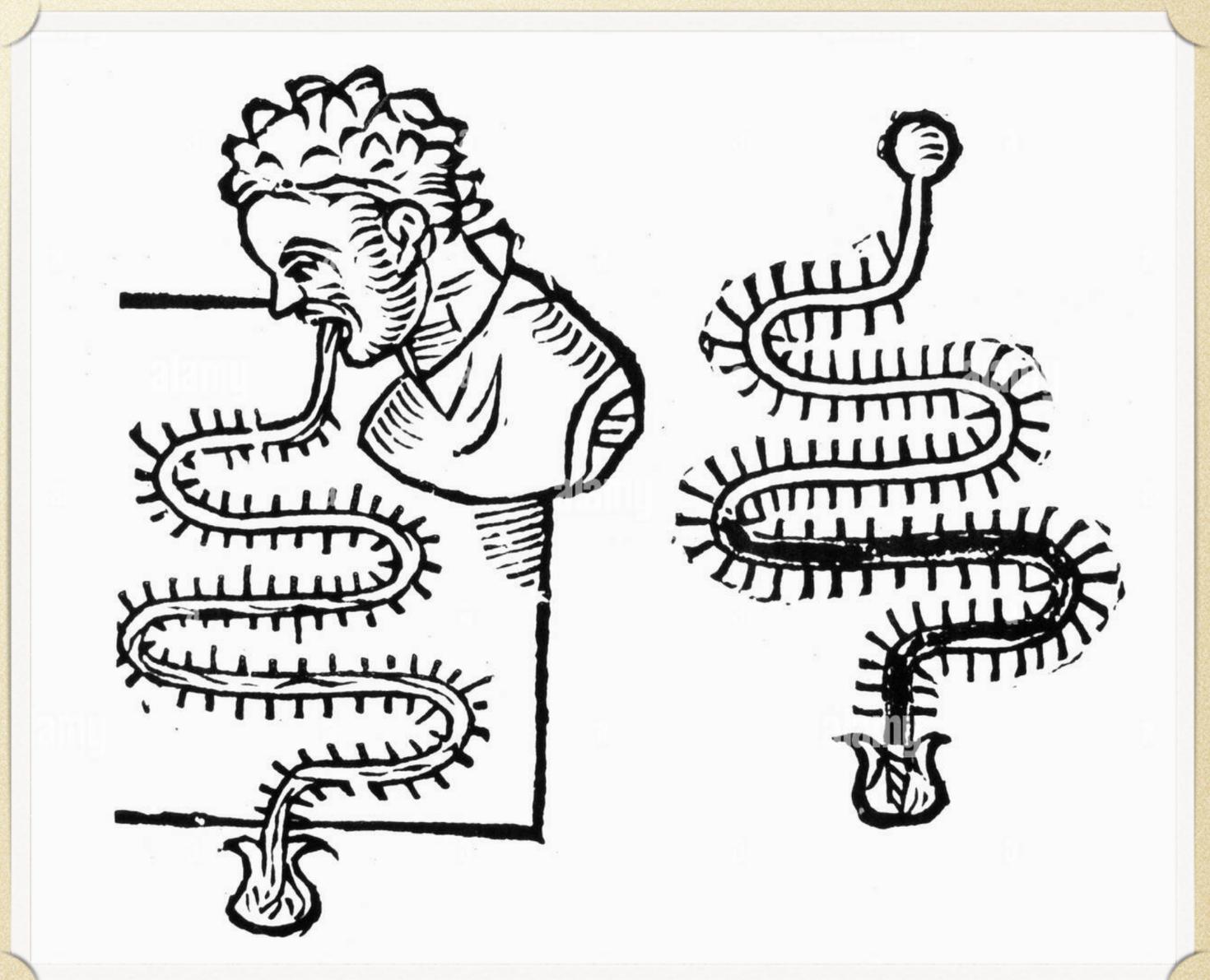
Torricelliho pokus (1643)

- sklenená trubica naplnená ortuťou, ponorená do ortuti
- po ponorení a uvoľnení otvorenej časti trubice ortuť klesne na výšku okolo 76 cm
- nad ortuťovým stĺpcom nie je vzduch (nemal sa tam ako dostať)
- tlak ortuťového stĺpca sa vyrovnáva s atmosférickým tlakom vzduchu



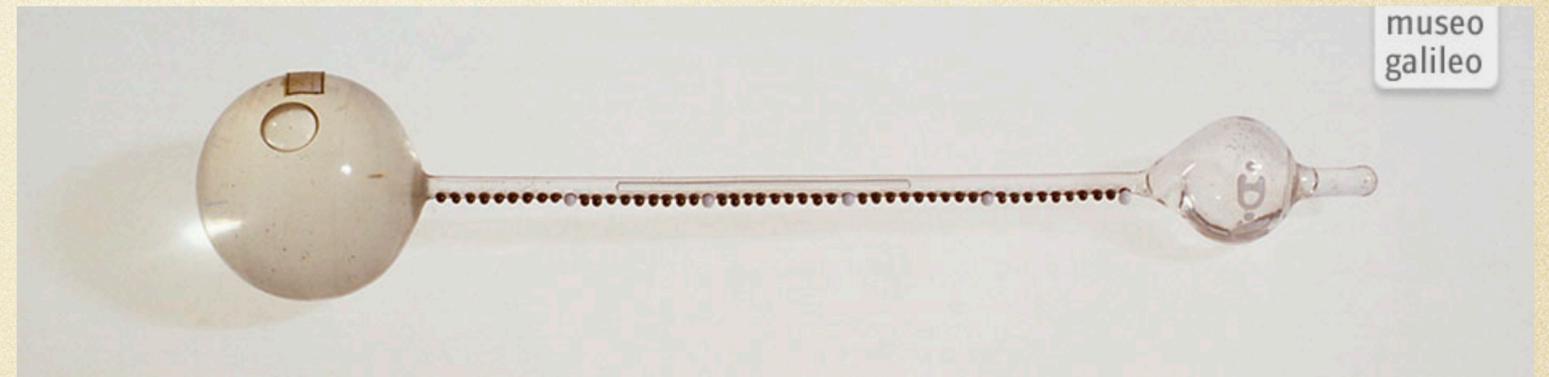
prvý teplomer

- Santorio Santorio (1612)
meranie teploty v ústach pacienta
- je to Galileiho termoskop so stupnicou
- podobne sa z Torricelliho trubice stal
pridaním stupnice barometer
- pri barometri stupnica meria správnu vec
(výšku stĺpca, čiže jeho hydrostatický tlak)
- máme aj pri teplomeri správnu stupnicu?



d'alšie teplomery

- Ferdinand II. Medici (cca 1650)
veľkvojvoda toskánsky
uzavretý teplomer s liehom
založený na tepelnej rozťažnosti
škála lineárna v dĺžke stĺpca
- Daniel Fahrenheit (1714)
uzavretý teplomer s ortuťou
založený na tepelnej rozťažnosti
škála lineárna v dĺžke stĺpca



dve často používané škály

Fahrenheitova (1724)

- teplota mrznúcej vody 32 °F
- teplota vriacej vody 212 °F
- medzi nimi lineárna škála 180 dielikov
- pôvodne bola táto škála definovaná cez teplotu mrznúcej slanej vody (nasýtený roztok chloridu amónneho) a teplotu ľudského tela (0 °F respektíve 90 °F, neskôr upravené na 96 °F)

Celsiova (1742)

- teplota mrznúcej vody 0 °C
- teplota vriacej vody 100 °C
- medzi nimi lineárna škála 100 dielikov
- pôvodne bola táto škála obrátená, čiže teplota vriacej vody bola 0 °C, zatiaľ čo teplota mrznúcej vody bola 100 °C

je lineárna škála správna?

- teplomery nemerajú priamo teplotu, merajú niečo iné (v predchádzajúcich príkladoch to bol objem vzduchu, liehu, ortuti)
- závisí tá meraná vec od teploty lineárne?
- nevieme, pretože nemáme kvantitatívnu škálu subjektívnej teploty (nevieme povedať, o koľko alebo koľkokrát je nám subjektívne teplejšie v júli ako v decembri – vieme len, že je nám v lete teplejšie)
- ale kým nevieme, čo je teplota (v zmysle kvantitatívnej veličiny), nemáme ako vedieť, či iné veličiny závisia od teploty lineárne

jedna možnosť definície teploty

- nejaký konkrétny teplomer povýšime na etalón merania teploty
- zavedieme (definujeme) jednotky teploty podľa jeho stupnice (to znamená, že táto stupnica je správnu stupnicou z definície)
- ostatné teplomery kalibrujeme pomocou etalónového teplomeru (takže všetky ukazujú navzájom kompatibilné výsledky)
- teplota je v takomto prístupe definovaná nasledovne:

teplota je to, čo merajú teplomery

teplotu čoho merajú teplomery?

- teplomer môže byť na dotyk studený či teplý, čiže aj on má svoju teplotu čo teda v skutočnosti meria? teplotu okolia, alebo svoju vlastnú teplotu?
- empirická skúsenosť týkajúca sa subjektívne pociťovanej teploty: teploty telies vo vzájomnom kontakte sa po čase vyrovnajú (také niečo určite neplatí pre všetky subjektívne pocity – ak dáme do kontaktu dvoch nervóznych ľudí, zvyčajne stúpne nervozita oboch)
- čiže je prirodzené predpokladať, že po priložení teplomera k telesu sa ich teploty vyrovnajú a teplomer potom ukazuje túto výslednú teplotu (vlastnú aj telesa, s ktorým je v kontakte)

aká bola pôvodná teplota telesa?

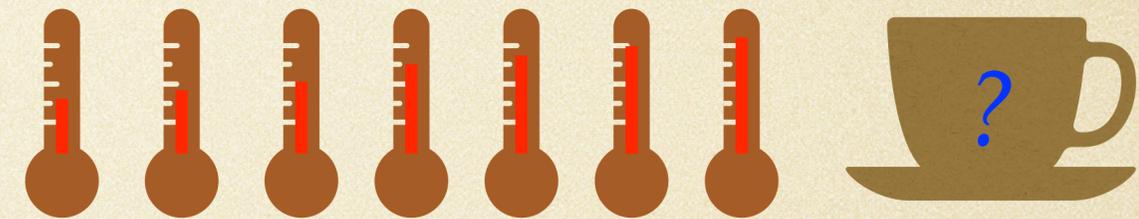
- naša doterajšia definícia teploty má jeden významný nedostatok
- teplomer nemeria (a ani nedefinuje) pôvodnú teplotu iného telesa, ale až jeho konečnú teplotu
- existuje nejaký spôsob, ako merať (a teda aj definovať) teplotu telesa, ktorú malo nie na konci merania, ale pred meraním?



kontakt teplomera s iným telesom vedie k zmene ich teplôt, konečný údaj teplomera nám nehovorí, aká bola pôvodná teplota telesa

rafinovaný a t'azkopádny postup

- majme veľa teplomerov s rôznymi teplotami (ako sa to dá dosiahnuť, tým sa teraz nezaobrajme)
- jeden z nich po kontakte s telesom nezmení svoju teplotu (ak máme viac rovnakých telies, môžeme to skúšať, až kým nie sme úspešní)
- v tomto prípade sa konečná teplota rovná počiatočným teplotám



ak sa po kontakte teplomera s iným telesom teplota teplomera nezmení, môžeme konštatovať, že teploty boli už na začiatku rovnaké

možnosť' lepšej definície teploty

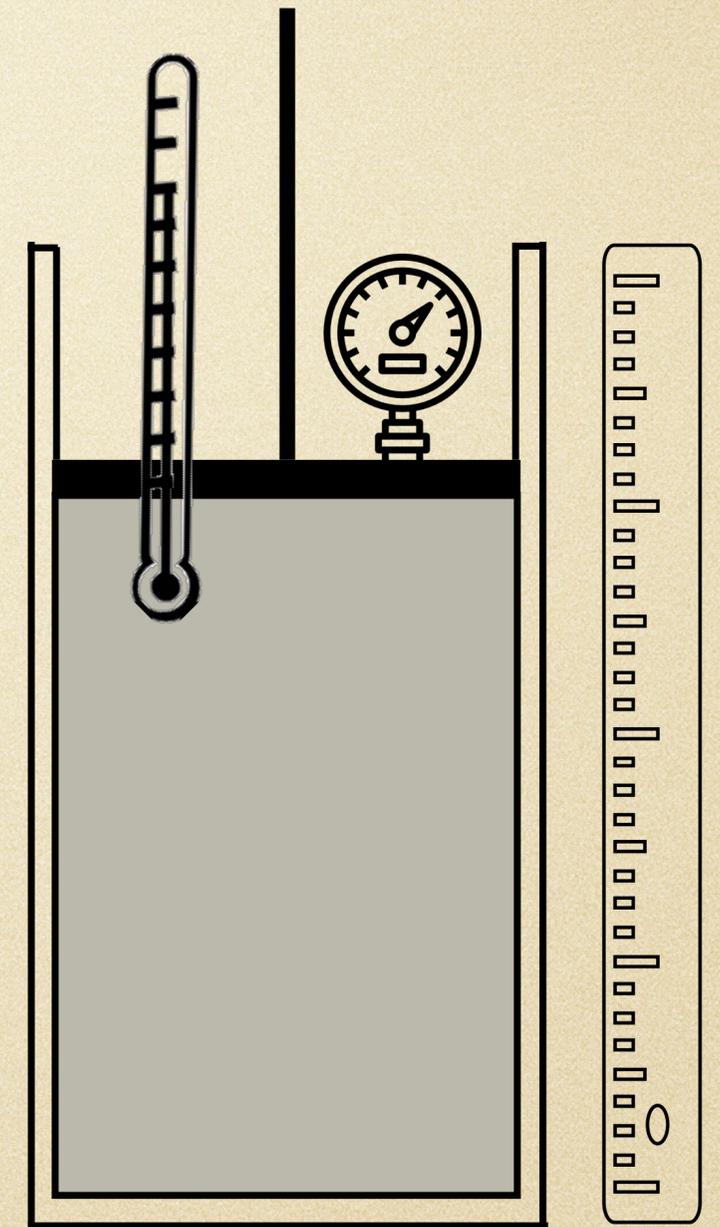
- definícia teploty pomocou teplomerov sa nám trochu začína zamotávať
- a aj keď sa to všetko dá pomerne jednoducho rozmotať, fyzici predsa len dávajú prednosť trochu inej definícii teploty
- táto definícia je založená na o čosi lepšej odpovedi na našu otázku, akú rovnováhu a akých fyzikálnych systémov skúma termodynamika
- teplota nebude súčasťou opisu týchto systémov, ani ich rovnováhy
- existencia teploty ako fyzikálnej veličiny ale vyplynie z tejto definície a z jednej fundamentálnej vlastnosti nášho sveta

termodynamický systém a jeho stav

- pod termodynamickým systémom budeme odteraz myslieť čosi, čoho stav je charakterizovaný sadou hodnôt nejakých fyzikálnych veličín, medzi ktorými je aj teplota (meraná nejakým, hoci aj nedokonalým, teplomerom)
- pod termodynamickými veličinami budeme rozumieť tie, ktoré sa menia, ak sa mení teplota (ak sa napríklad rýchlosť hmotného streda s teplotou nemení, potom ju nebudeme považovať za termodynamickú veličinu)
- pod termodynamickým stavom termodynamického systému budeme rozumieť hodnoty jeho termodynamických veličín, medzi ktoré však nebudeme počítať teplotu (tú na začiatku vyhodíme z úvah, aby sme ju neskôr definovali lepšie)

plyn ako termodynamický systém

- plyn v uzavretej nádobe s piestom a dvojitou stenou s vysatým vzduchom (Dewarova nádoba, termoska) meriame tlak, objem a teplotu
- veľmi dôležitý experimentálny fakt: pre dané množstvo daného plynu sú z trojice veličín tlak, objem a teplota nezávislé len dve (čo znamená, že hodnoty dvoch jednoznačne určujú hodnotu tretej)
- stav plynu ako termodynamického systému teda budeme (lebo môžeme) určovať objemom a tlakom, údaj teplomera vôbec nemusíme brať do úvahy

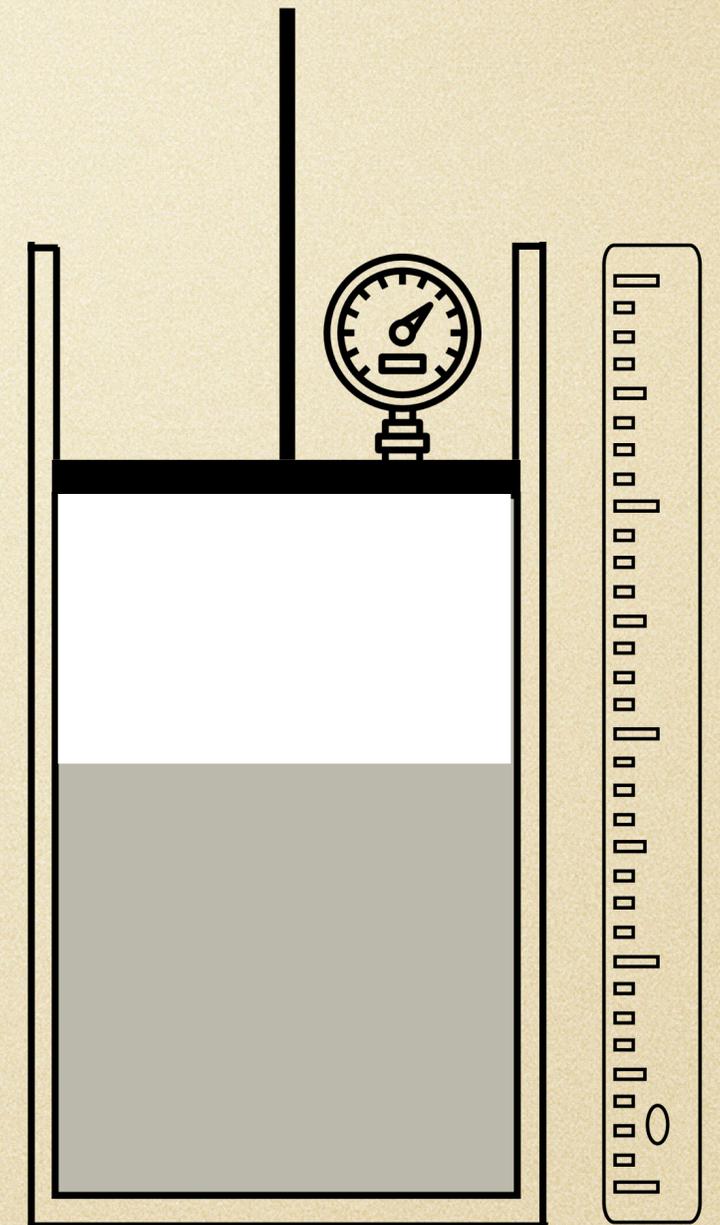


prečo práve plyn?

- z historického hľadiska viedol práve výskum vlastností plynov k objavu základných termodynamických zákonov
- plyn je preto z historického, ale aj z didaktického hľadiska akýsi ikonický termodynamický systém, na ktorom sa dajú priamo a jednoducho ilustrovať všetky základné termodynamické zákony
- základy termodynamiky sa dajú najľahšie pochopiť práve na príklade plynu
- rozšírenie týchto zákonov na zložitejšie systémy je vcelku priamočiare (takže ho necháme na tie prednášky, v ktorých to bude potrebné)

pozor: nie je stav ako stav

- pozor: objem a tlak plynu nie sú vždy dobre definované
- ak napríklad piest prudko odtiahneme, plynu chvíľu trvá, kým zaberie celý objem a nadobudne všade rovnaký tlak
- počas tejto chvíle (ktorá môže byť niekedy dosť dlhá) nie je stav plynu opísaný dvojicou veličín P, V
- dvojica veličín P, V opisujúcich termodynamické stavy plynu teda neopisuje všetky jeho stavy, ale len také, v ktorých je objem rovnomerne zaplnený, tlak všade rovnaký a nemenia sa (hovorí sa im rovnovážne stavy)

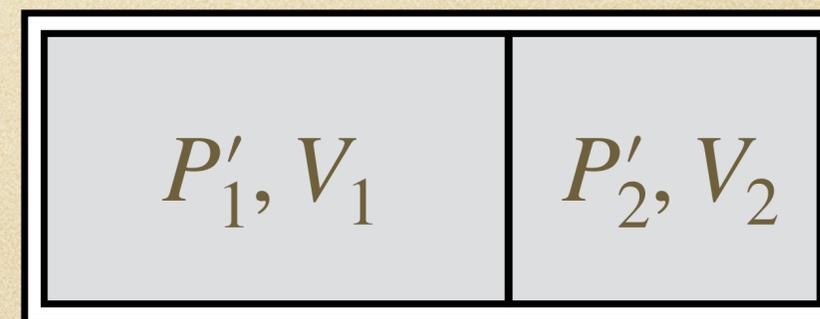
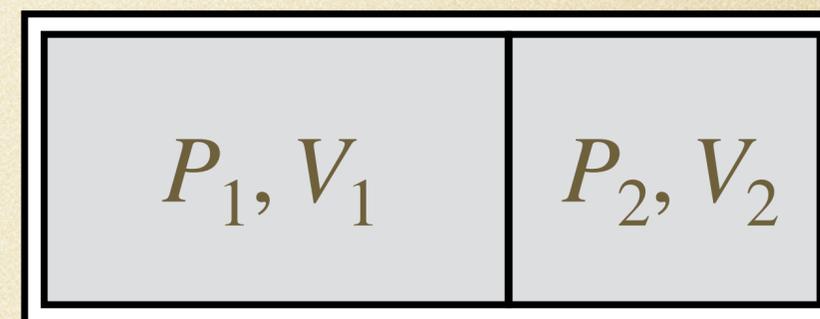


termodynamické deje

- termodynamický systém má oveľa viac stavov ako termodynamických stavov
- termodynamika nevytvára len o termodynamických stavoch, ale aj o tom, ako sa termodynamické systémy do týchto stavov dostávajú, čiže o takzvaných termodynamických dejoch
- definícia teploty je špecifická v tom, že si všíma iba také deje, ktoré vlastne nijakými dejmi nie sú, pretože sa nič nedeje
- naozajstné termodynamické deje (také, v ktorých sa niečo deje) vedú potom k definícii ďalších dôležitých termodynamických veličín, a to tepla a entropie

vyrovnávanie teplôt bez teplôt

- našu empirickú skúsenosť s vyrovnávaním teplôt (subjektívne pociťovaných) môžeme sformulovať na príklade plynu aj bez pojmu teploty:
- ak dáme do tzv. **tepelného kontaktu** (v termoske ich priložíme ich k sebe cez bežnú nehybnú stenu) plyny v stavoch P_1, V_1 a P_2, V_2 , ich stavy sa spravidla budú meniť dovtedy, kým nenadobudnú nové rovnovážne hodnoty P'_1, V_1 a P'_2, V_2 (objemy sa meniť nemôžu)
- ak sa počiatočné stavy P_1, V_1 a P_2, V_2 nemenia (nijaký dej) hovoríme, že plyny sú (od začiatku) v rovnováhe



nultá veta termodynamická

- zaujímavá vlastnosť tohto sveta (sformulovaná bez pojmu teploty):
- ak **A** je v rovnováhe (vo vyššie uvedom zmysle) s **B** a zároveň **B** je v rovnováhe s **C**, potom aj **A** je v rovnováhe s **C**
- všetkým termodynamickým systémom, ktoré sú navzájom v rovnováhe, priradíme rovnaké číslo θ , ktoré nazveme teplota (ak nie sú v rovnováhe, tak rôzne čísla θ)

zákon rovnoramenných váh

- ❖ vlastnosť nášho sveta (sformulovaná bez pojmu hmotnosť)
- ❖ ak **A** je v rovnováhe s **B** a **B** je v rovnováhe s **C** potom **A** je v rovnováhe s **C**
- ❖ na základe tohto zákona môžeme zaviesť hmotnosť takto: závažie hmotnosti e = čokoľvek v rovnováhe s etalónom **A** má hmotnosť m v jednotkách e , ak je v rovnováhe s $m e$
- ❖ a teraz môžeme sformulovať uvedenú vlastnosť sveta takto: telesá sú v rovnováhe práve vtedy, keď majú rovnakú hmotnosť



súvis zákona a veličiny

- ❖ všimnime si, ako tu (a je to tak aj v iných prípadoch) súvisí prírodný zákon a fyzikálna veličina
- ❖ prírodný zákon sa dá sformulovať bez tej veličiny
- ❖ veličina sa rozumne definuje pomocou toho zákona
- ❖ zákon sa elegantne sformuluje pomocou tej veličiny

pripomienka: definícia hmotnosti

nová teplota $\theta(P, V)$ a teploměry

- abstraktná teplota $\theta(P, V)$ nemá (zatiaľ) nič spoločné s údajmi teplomerov
- je to len číslo, ktoré nám hovorí, či nejaké dva termodynamické systémy budú alebo nebudú vo vzájomnej termodynamickej rovnováhe
- túto abstraktnú veličinu však možno dať do súladu s údajmi teplomerov: jednému konkrétnemu termodynamickému systému, ktorý je zároveň teplomerom, priradíme čísla $\theta(P, V)$ tak, aby sa zhodovali s hodnotami teploty meranej týmto teplomerom
- teplota je definovaná bez teplomerov tak, aby bola tým, čo merajú teploměry

ako vyzerá funkcia $\theta(P, V)$

- pre riedke plyny sa ukazuje, že teplota je lineárnou funkciou súčinu $P \cdot V$

$$\theta(P, V) = \alpha P V + \beta$$

kde $\alpha = \frac{1}{m R'}$ (m je hmotnosť plynu, R' je pre daný plyn konštanta) a $\beta \approx -273^\circ\text{C}$

- tento vzťah (ktorému sa hovorí stavová rovnica ideálneho plynu) sa mierne zjednoduší, ak budeme používať tzv. termodynamickú teplotu $T = \theta - \beta$

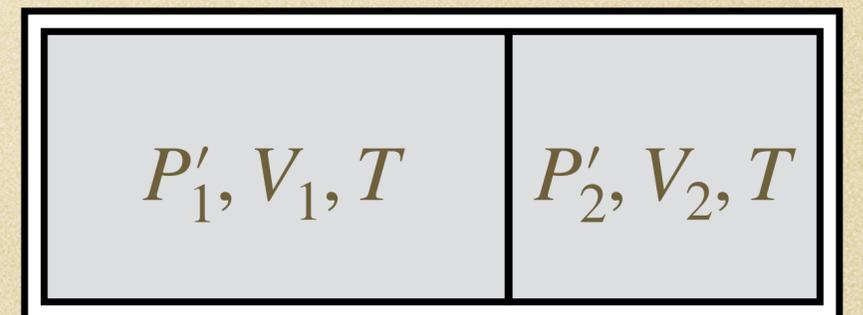
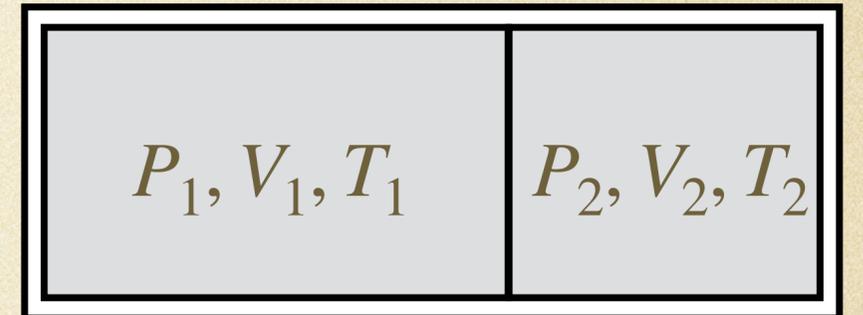
$$P V = m R' T(P, V)$$

- uvedený experimentálny vzťah pre teplotu riedkeho plynu má bohatú históriu, ktorou sa tu ale nebudeme zaoberať – spomenieme len dva zásadné míľniky:

1662	$P \propto 1/V$	(pri izbovej teplote)	Boyle-Marriotov zákon
1800	$V \propto T$	(pri normálnom tlaku)	Gay-Lussacov zákon

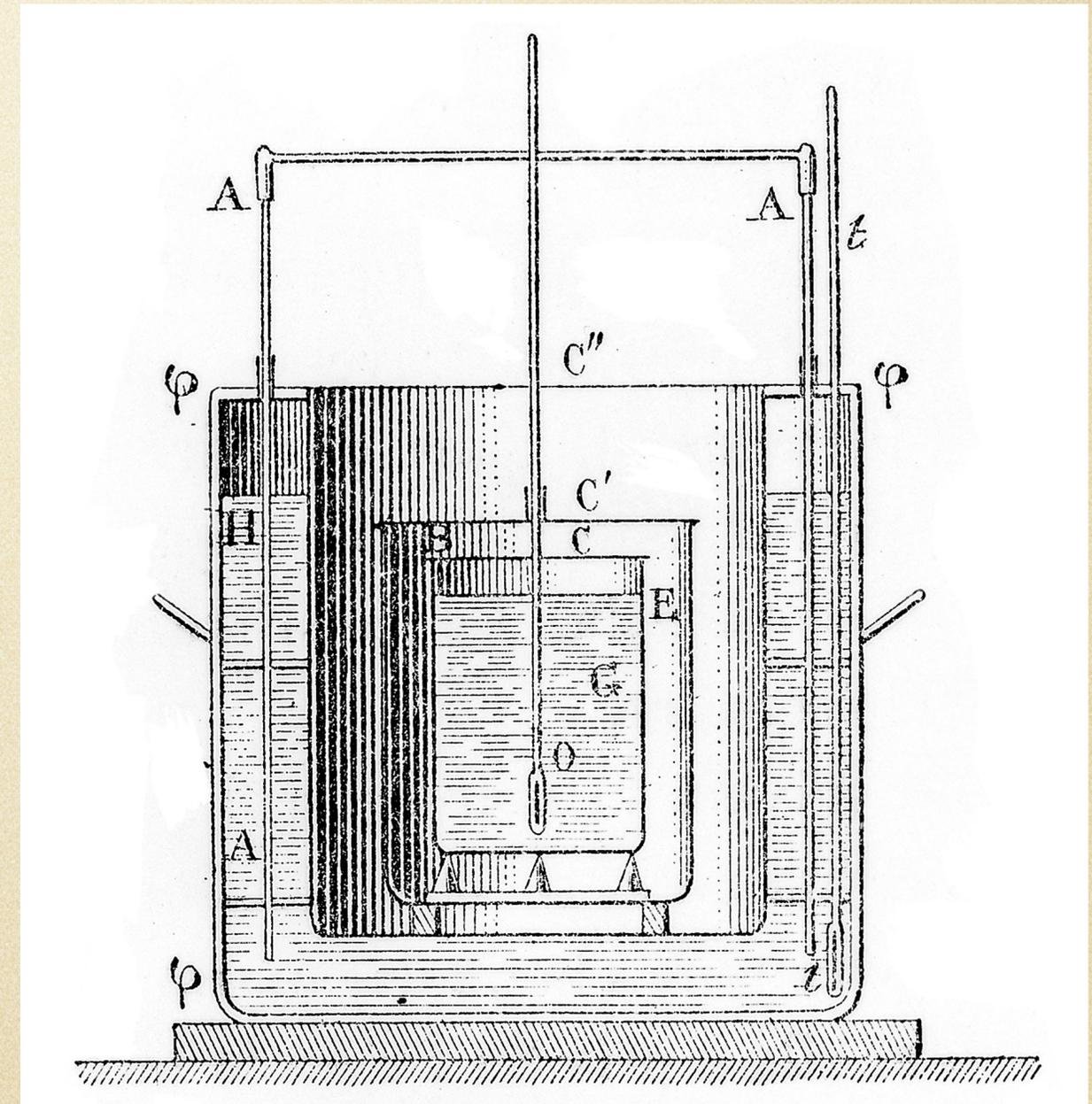
výsledok vyrovnávania teplôt

- teplotu sme definovali pomocou špecifických dejov, pri ktorých sa vlastne nič nedialo
- teraz, keď už ju máme definovanú, môžeme sa pýtať čo sa deje, ak sú pôvodné teploty systémov rôzne
- vieme, že takéto systémy sa po určitom čase dostanú do rovnováhy, čiže budú mať rovnakú teplotu
- ak mali plyny pôvodné teploty T_1 a T_2 , aká bude ich výsledná teplota T ?



rovnaké množstvá rovnakej látky

- presné experimentálne skúmanie vyrovnávania teplôt sa robí ľahšie pre kvapaliny ako pre plyny (pomocou kalorimetrov, čo je termoska + teplomer)
- experimentálny výsledok: ak sa zmiešajú rovnaké množstvá rovnakej látky (väčšinou kvapaliny), tak výsledná teplota je po čase priemerom pôvodných teplôt, čiže $\theta = (\theta_1 + \theta_2)/2$
- pre rôzne množstvá rovnakej látky, a tiež pre rôzne látky, však už takýto jednoduchý vzťah neplatí
- čo pre ne platí?



rôzne množstvá rovnakej látky

- aká bude výsledná teplota θ po zmiešaní rôznych množstiev látky s teplotami θ_1 a θ_2 ?
- zmiešajme v kalorimetri 2 kg a 1 kg vody s teplotami θ_1 a θ_2 (v $^{\circ}\text{C}$)
- niekoľko výsledkov je uvedených v tabuľke
- úloha: doplňte prázdne miesta v tabuľke
- ak si zo strednej školy pamätáte kalorimetrickú rovnicu, mala by to byť pre vás nudná hračka, ak si ju nepamätáte, máte možnosť ju odhaliť

θ_1	θ_2	θ
50	20	40
30	90	50
40	10	30
60	10	43.3
20	50	
30		45
	30	10

$$m_1 (\theta - \theta_1) = m_2 (\theta_2 - \theta)$$

rovnaké množstvá rôznych látok

- teraz dajme do kalorimetra 1 kg vody a 1 kg benzínu s teplotami θ_1 a θ_2 (v °C)
- niekoľko výsledkov je uvedených v tabuľke (tabuľka je naschvál rovnaká ako minule, ale týka sa iného experimentu)
- úloha: doplňte prázdne miesta v tabuľke
- ak si zo strednej školy pamätáte kalorimetrickú rovnicu, mala by to byť pre vás nudná hračka, ak si ju nepamätáte, máte možnosť ju odhaliť

θ_1	θ_2	θ
50	20	40
30	90	50
40	10	30
60	10	43.3
20	50	
30		45
	30	10

$$c_1 (\theta - \theta_1) = c_2 (\theta_2 - \theta)$$

rôzne množstvá rôznych látok

- a nakoniec dajme do kalorimetra 1 kg vody a 2 kg benzínu s teplotami θ_1 a θ_2 (v °C)
- pár výsledných teplôt je uvedených v tabuľke, opäť doplňte prázdne miesta
- opäť platí, že ak si nepamätáte všeobecný tvar kalorimetrickej rovnice, práve máte možnosť ho odhaliť
- poznámka: v skutočnosti bola kalorimetrická rovnica objavená práve na základe výsledkov takýchto experimentov

θ_1	θ_2	θ
50	20	35
30	90	60
40	10	25
60	10	35
20	50	
30		45
	30	10

$$m_1 c_1 (\theta - \theta_1) = m_2 c_2 (\theta_2 - \theta)$$

merné teplo a teplo

merné teplo

- veličinu c voláme merné teplo danej látky
- merné teplo pre jednu konkrétnu látku si môžeme zvoliť, pre iné látky určíme ich merné teplá z kalorimetrickej rovnice
- štandardná voľba: $c = 1$ pre vodu
- tento výber je vlastne výberom jednotiek pre merné teplo a teplo (jednotkou tepla pri tomto výbere je kilokalória)

teplo

- veličinu $m c \Delta\theta$ voláme teplo
- táto veličina na nás sama od seba vykukla z kalorimetrickej rovnice, ktorá sa nám ukázala pri skúmaní vyrovnávania teplôt
- je to zjavne niečo iné ako teplota
- napriek tomu si ich na intuitívnej úrovni často pletieme, takže v termodynamike býva intuícia dosť zlý radca

súvis teploty a tepla

teplota

- bežne používame na pomenovanie istého subjektívneho pocitu
- toto pomenovanie je správne
- ako fyzikálna veličina charakterizuje stav termodynamického systému
- je to prekvapujúco abstraktná veličina, ale bez tej abstraktnosti vlastne nevieme, o čom hovoríme

teplo

- bežne používame na pomenovanie toho istého subjektívneho pocitu
- toto pomenovanie je nesprávne
- ako fyzikálna veličina charakterizuje proces vyrovnávania teplôt
- je to prekvapujúco abstraktná veličina, ale bez tej abstraktnosti vlastne nevieme, o čom hovoríme

zaujímavosť na záver

- čudné číslo nulte vety je odrazom čudnej histórie celej termodynamiky
- ako prvý bol objavený prírodný zákon, ktorý dostal neskôr meno druhá veta ako druhý bol objavený prírodný zákon, ktorý dostal neskôr meno prvá veta až po nich bol sformulovaný tretí zákon, ktorý je však ešte fundamentálnejší ako prvé dva, a tak dostal meno nultá veta (termodynamická)
- všetky tri vety hovoria niečo dôležité o termodynamickovej rovnováhe: nultá hovorí o vzájomnej rovnováhe dvoch termodynamických systémov prvá a druhá hovoria o termodynamických dejoch a o výslednej rovnováhe systému (alebo viacerých systémov), ktoré pôvodne v nerovnováhe neboli