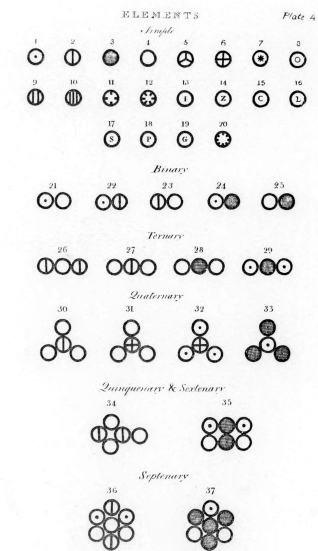


## Seriál: Látkové množstvo a teplota

Vo štvrtom dieli tohtoročného seriálu opustíme mechaniku a pozrieme sa na veličiny spojené s termodynamikou a chémiou – teplotu a látkové množstvo, ktorých historický vývoj bol do istej miery spoločný a motivovaný podstatou hmoty a jej zložením.

### Látkové množstvo

Ako sme spomenuli už v predošlom dieli, hmotnosť častíc – atómov a molekúl – nebola dlho známa. Chemici koncom 18. storočia objavovali základné princípy, ktorými sa chemické reakcie riadia – zákon zachovania hmotnosti (A. Lavoisier), ekvivalentných hmotností, stochiometrie a zákon stálych zlučovacích pomerov (J. B. Richter, J. L. Proust). Na ich práce v roku 1805 nadviazal J. Dalton svojou atomárnou teóriou vysvetľujúcou tieto pozorovania ako preskupovanie základných blokov – atómov – počas chemických reakcií. Zostavil aj prvé tabuľky relatívnych hmotností, pričom najľahšiemu prvku – vodíku – priradil hmotnosť jeden. Progres Gay-Lussaca s experimentami s reakciami plynov zase viedl Avogadra k domnienke, že za rovnakých podmienok nadobúdajú rovnaké množstvá dvoch rôznych plynov rovnaký objem. Toto sa v nasledujúcich desaťročiach rozvinulo v kinetickú teóriu ideálneho plynu, ktorej sa budeme venovať v ďalšej kapitole.



Obrázek 1: Daltonova tabuľka atómov z A New System of Chemical Philosophy publikované v roku 1808<sup>1</sup>

Na experimentálne určovanie hmotností chemických zlúčenín sa však vodík príliš nehodil. Kyslík na rozdiel od neho reaguje so skoro všetkými známymi prvkami. J. Berzelius tak za základnú hodnotu zvolil relatívnu hmotnosť atómu kyslíku rovnú 100. Toto sa však dlho neudržalo a prešlo sa k definícii  $M(\text{O}) = 16$ , ktorá je pri vtedajšej presnosti merania zhodná s pôvodnou definíciou pomocou vodíka. S touto definíciou sa spájajú nasledujúce veličiny a jednotky:

- Avogadrova konštanta  $N_A$  – množstvo častíc v 32 g molekuly kyslíka  $\text{O}_2$ ,
- Dalton 1 Da – hmotnosť  $1/32$  hmotnosti molekuly kyslíka  $\text{O}_2$ ,
- mól 1 mol – jednotka látkového množstva  $n$ , udáva koľko častíc danej látky sa nachádza vo vzorke v jednotkách Avogadrovej konštanty  $n = N/N_A$ .

S objavom izotopov stabilných prvkov bolo nutné v polovici 20. storočia prejsť k novej definícii. Fyzici začali používať izotop  $^{16}\text{O}$ , chemici však preferovali používať prírodné izotopické zloženie kyslíka. To sa ale ukázalo nehomogénne z rôznych zdrojov, preto sa v roku 1960 prešlo k novej definícii využívajúcej izotop uhlíka:

Jeden mól je rovný počtu atómov v 12 g izotopu  $^{12}\text{C}$ .

S touto zmenou sa pochopiteľne zmenili aj definície daltonu a Avogadrovej konštanty.

Látkové množstvo bolo prijaté ako základná veličina do systému SI v roku 1971. Dnešná definícia mólu preniesla svoju podstatu na prírodnú konštantu

Mól (značka mol) je jednotka látkového množstva, veličiny úmernej počtu elementárnych častíc látky. Jeden mol obsahuje presne  $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$  elementárnych častíc, pričom sa môže jednať o atómy, molekuly, ióny, alebo iné častice. Toto číslo je rovné fixovanej hodnote Avogadrovho čísla  $N_0$  a predstavuje numerickú hodnotu Avogadrovej konštanty v jednotkách  $\text{mol}^{-1}$ .

S látkovým množstvom sú spojené aj niektoré odvodené jednotky

- molárna hmotnosť – hmotnosť jedného mólu látky,
- molárny objem – objem jedného mólu látky (za definovaných podmienok),
- látková koncentrácia – látkové množstvo danej látky vo vzorke/roztoku o danom objeme (obvykle v jednom litre),
- látkový zlomok – podiel počtu častíc danej látky k celkovému počtu častíc v roztoku/zmesi.

Látkové množstvo sa dnes obvykle určuje presným vážením a následným prevodom pomocou známej hodnoty molárnej hmotnosti určenej z atómového zastúpenia skúmanej látky.

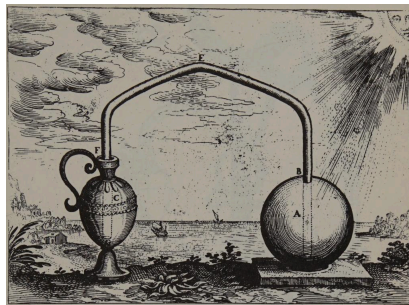
## Teplota

### Mrzne?

Teplotu objektov okolo seba ľudia vnímali odjakživa. Väčšinou však postačilo určiť, či je niečo príliš/dost teplé alebo studené. Prvé zdokumentované experimenty s teplom vykonávali v antickom Grécku, kde Filón Byzantský a Herón z Alexandrie vytvorili aparatúry premiestňujúce

<sup>1</sup>[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A\\_New\\_System\\_of\\_Chemical\\_Philosophy\\_fp.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_New_System_of_Chemical_Philosophy_fp.jpg)

vodu pomocou expanzie ohriateho vzduchu. Neskôr rímsky lekár Galén vytvoril stupnicu teploty zmiešavaním rôznych množstiev vriacej vody a ľadu. Na tieto pokroky (ako aj na veľa iných vedeckých myšlienok) sa však v Európe zabudlo a až v renesancii s návratom antických textov výskum pokračoval, napríklad, v práci Galileia Galileiho, ktorý zopakoval antické experimenty a skonštruoval termoskop. Ak zahriatu sklenenú banku ponoríme hrdlom nadol do vody, chladnuci vzduch vodu do nádoby natiahne. Neskôr podľa polohy vody vieme usudzovať teplotu. Prvý vzduchový teplomer vznikol pridaním jednoduchej stupnice. Tieto prístroje sú ale ovplyvnené zmenou atmosférického tlaku.



Obrázek 2: Nákres aparatury Filóna Byzantského<sup>2</sup>

Zmenu priniesli výkresy J. S. Delmediga, na základe ktorý dal v polovici 17. storočia Ferdinando II. de Medici zostrojiť prvý kvapalinový teplomer. Z banky naplnenej brandy vystupovala tenká kapilára, ktorá bola na vrchu vzduchotesne odtavená. Vplyvom zmeny teploty expanduje samotná kvapalina indikujúca teplotu na priloženej stupnici. Podobné prístroje sa rýchlo rozšírili po Európe, ale problémom bola štandardizácia – či už použitej náplne (zmes liehu a vody sa používala na zníženie teploty tuhnutia zmesi), či stupnice samotnej. Koncom storočia tak vedci volali po štandardizácii stupníc využitím rôznych referenčných teplôt. Pokrok v presnosti merania nastal prácou D. G. Fahrenheita, ktorý v roku 1714 zkonštruoval teplomer obsahujúci ortuť. Takýto teplomer mal väčší rozsah meraných hodnôt a pevne dané zloženie obsahu. Fahrenheit definoval aj novú stupnicu, ktorá nesie jeho meno, s nulovým bodom pri teplote zmesi ľadu a chloridu amónneho a hodnotou 90 °F pri teplote ľudského tela.

Tieto hodnoty však nie sú dostatočne presne reprodukovateľné, preto sa ujala teplotná škála A. Celsia používajúca ako referenčné body teplotu topenia ľadu a varu vody za štandardného atmosférického tlaku na hladine mora rozdelené na sto stupňov.<sup>3</sup> Kalibrácia meradla teda prebiehala zaznamenaním polohy stĺpca tekutiny v kapiláre v rovnovážnej zmesi ľadu a vody, polohy vo variacej vode a následným rovnomerným rozdelením stupnice na sto dielov. Pre praktické použitie bola významná aj konštrukcia indexujúcich teplomerov, ktoré zaznamenávajú maximálnu, alebo minimálnu hodnotu teploty, ktorej boli vystavené – ako napríklad kedysi bežný lekársky ortuťový teplomer. Problémom takýchto teplomerov sú ale samotné vlastnosti použitých kvapalín – ich tuhnutie a var limituje použiteľný rozsah meraných teplôt. Navyše ani objemová

<sup>2</sup>[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fludd\\_figure\\_of\\_philo\\_experiment.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fludd_figure_of_philo_experiment.png)

<sup>3</sup>Pôvodná definícia mala hodnoty obrátene, ako ich poznáme dnes – var vody pri 0 stupňoch a topenie ľadu pri 100 stupňoch.

rozťažnosť nie je vo všeobecnosti konštantná s meniacou sa teplotou – ako príklad uvedme vodu, ktorá pri teplote pod štyrmi stupňami Celzia dokonca pri chladnutí objem zväčšuje.

Nakoniec ešte zmieňme, že na princípe teplotnej rozťažnosti fungujú aj bimetalické teploměry. Navinutý pásik, ktorého dve strany tvoria dva rôzne kovy s rôznou tepelnou rozťažnosťou, pri zmene teploty expanduje na jednej strane viac, a tak otáča ručičkou umiestnenou na jeho konci. S týmto typom teplomerov sa v domácnosti obvykle stretáme napríklad pri pečení.

### *Nížšie to už nejde!*

Výskum termodynamiky sa začal rozvíjať v druhej polovici 17. storočia. Experimentami s plynmi pri zmenách teploty  $t$ , tlaku  $p$  a objemu  $V$  boli odvodené:

- v roku 1662 Boylov-Mariottov zákon, kde pri konštantnej teplote platí  $pV = \text{konst}$ ,
- Gay-Lussac tiež overil závislosť pri konštantnom objeme, kde  $\Delta p/p = \beta \Delta t$ , známy ako Charlesov zákon
- a závislosť pri konštantnom tlaku  $\Delta V/V = \gamma \Delta t$  dnes známu ako Gay-Lussacov zákon.

Posledné tri závislosti ukazovali, že pri teplote vtedy určenej ako  $t_0 = -267^\circ\text{C}$  (neskôr nazvanej absolútna nula) sa súčin tlaku a objemu akéhokoľvek množstva plynu blíži k nule. Tieto zákony v kombinácii s Avogadrovým zákonom tvoria stavovú rovnicu ideálneho plynu

$$\frac{pV}{nT} = R_m,$$

kde  $R_m$  je molárna plynová konštanta,  $n$  je látkové množstvo plynu a  $T = t + t_0$  je tzv. absolútna termodynamická teplota, ktorá bola meraná pôvodne v stupňoch kelvina – na počesť W. Thomsona (lord Kelvin), ktorý túto škálu navrhol.

Teplotná škála v stupňoch kelvina má počiatok pri teplote absolútnej nuly a rovnako veľký diel ako stupnica Celzia.

Neskoršie merania ukázali, že teplota topenia ľadu taktiež závisí na tlaku (Celsius to vedel už aj o teplote varu), prešlo sa teda od teploty topenia a varu pri štandardnom tlaku k presnejšej definícii pomocou trojného bodu vody – rovnovážneho stavu medzi vodnou parou, kvapalnou vodou a ľadom, ktorý nastáva pri tlaku asi 611 Pa a teplote o  $0,01^\circ\text{C}$  vyššej, ako teplota topenia. Po presnom určení hodnoty absolútnej nuly v roku 1954 a po zmene formulácie v roku 1968, ktorá vypustila stupeň z názvu jednotky pre zosúladenie pomenovania s ostatnými jednotkami, nadobudla definícia nasledujúcu podobu.

Jednotkou termodynamickej teploty je kelvin, jeho veľkosť je daná ako  $1/273,16$  hodnoty termodynamickej teploty vody.

Teplota topenia a varu vody sa tak stala meranou veličinou. Ukázalo sa však, že teplota trojného bodu závisí na izotopickom zložení. V roku 2005 bola preto prijatá rezolúcia, že meranie sa má vykonávať s Viedenským štandardom strednej oceánskej vody. Okrem kelvina sa niekedy používa aj Rankin, ktorý je škálou absolútnej teploty založenou na stupňoch Fahrenheita, namiesto Celzia.

Vo vzťahu pre tlak ideálneho plynu vystupuje súčin  $nR$ . Po určení počtu častíc látky meraním Avogadrovej konštanty  $N_A$  tak bolo možné prejsť od látkového množstva k počtu častíc plynu

$$pV = Nk_B T,$$

kde  $k_B = R/N_A$  je Boltzmannova konštanta. Táto konštanta je zásadná pre štatistický popis termodynamiky. V druhej polovici 19. storočia R. Clausius, J. C. Maxwell a L. Boltzmann rozvinuli kinetickú teóriu plynov, kde uvažujeme jednotlivé pružné zrážky medzi molekulami navzájom a stenou nádoby. Podarilo sa im odvodiť zákon ideálneho plynu a taktiež Maxwell-Boltzmannovo rozdelenie rýchlostí častíc plynu – počet častíc  $f(v)$ , ktoré sa pohybujú s rýchlosťou  $v$

$$f(v) \propto 4\pi v^2 e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}},$$

ktoré plyn dosahuje v dynamickej rovnováhe medzi jeho časticami. Nasledovným zovšeobecnením je Boltzmannovo rozdelenie energií

$$p_i \propto e^{-\frac{E_i}{k_B T}},$$

popisujúce pravdepodobnosť  $p$  obsadenia stavu  $i$  o energii  $E_i$  pri danej teplote. Jedným so známých dôsledkov týchto vzťahov je ekvipartičný teorém – na jeden kvadratický stupeň voľnosti pohybu systému v termodynamickej rovnováhe pripadá kinetická energia  $E = k_B T/2$ . Pre významnosť tejto konštanty a s cieľom odviazať definíciu kelvinu od látkových vlastností bola prijatá v roku 2019 nová definícia kelvinu

Kelvin, symbol K, je SI jednotka termodynamickej teploty. Je definovaný fixovaním číselnej hodnoty Boltzmanovej konštanty  $\{k_B\} = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}$  vyjadrenej v jednotkách  $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Na základe vzťahov pre ideálny plyn je tak možné merať priamo absolútnu teplotu. Jednou z možností je využiť plynový teplomer – buď meraním zmeny tlaku pri konštantnom objeme, alebo zmeny objemu pri konštantnom tlaku. Reálne plyny však nie sú ideálne – vzájomná silová interakcia medzi časticami van der Waalsovými silami a ich samotný rozmer spôsobuje odchýlky, ak sú častice pri sebe blízko. Pre presný teplomer tak potrebujeme čo najredší plyn. Variáciou s vyššou presnosťou je akustický plynový teplomer merajúci rýchlosť zvuku  $u$  v plyne, pre ktorú platí

$$u^2 = \frac{\gamma k_B T}{m},$$

kde  $m$  je hmotnosť molekúl plynu a  $\gamma$  je podiel tepelnej kapacity pri konštantnom tlaku a objeme (pre jednoatómové plyny je rovná  $5/3$ ). Samotná rýchlosť zvuku sa určuje so vzniknutých stojatých vln o známej frekvencii v kavite naplnenej plynom, ktorej rozmer bol určený napr. pomocou mikrovlnných rezonancií. Meranie sa vykoná pre rôzne hodnoty tlakov plynu a extrapoluje do limity nulového tlaku, pre ktorý sa reálny použitý plyn správa ako plyn ideálny, pre ktorý bol vyššie uvedený vzťah odvodený. Takto určené hodnoty teploty môžu mať relatívnu presnosť až  $1 : 10^6$ .

Pri nízkych teplotách narážame na iný problém – plyny skvapalňujú. Teplota kondenzácie dusíka je 77 K, najnižšiu teplotu kondenzácie za atmosférického tlaku má hélium, iba 4,2 K pre izotop  $^4\text{He}$  a 3,2 K pre hélium  $^3\text{He}$ . Pri nižších teplotách je tak nutné použiť iné meracie metódy. Pre meranie je vhodné určovať tlak nasýtených pár hélia  $^3\text{He}$ , avšak jeho závislosť je nutné kalibrovať inou primárnou metódou určenia absolútnej teploty.

### *Hreje to, sála, sviati*

Ako iste každý, kto niekedy sedel pri ohni, vie, horúce telesá prenášajú energiu do okolia nie len priamym kontaktom, ale aj žiarením. Už v stredoveku ľudia pracujúci v metalurgii odhadovali pomocou farby, či je žhavené teleso dostatočne teplé. Kvantitatívny výskum tepelného

a svetelného žiarenia horúcich telies sa začal rozvíjať v druhej polovici 19. storočia prácami B. Stewarta a G. Kirchhoffa, ktorý vyvrcholil formuláciou Kirchhoffovho zákona tepelného žiarenia – v tepelnej rovnováhe je pre každé teleso o teplote  $T$  pomer vyžarovanej energie a zlomku dopadajúceho absorbovaného žiarenia na danej vlnovej dĺžke  $\lambda$  rovnaký a daný funkciou  $B(\lambda, T)$  charakterizujúcou absolútne čierne teleso.

Určenie tejto funkcie bolo pomerne náročnou úlohou, postupom času a zdokonalením experimentálnych techník prišlo k objavu Wienovho vyžarovacieho zákona, úvahami teoretickej fyziky naopak k odvodeniu Jeansovho zákona. Tieto dva vzťahy však dobre popisovali experimentálne hodnoty len v krátkovlnnej, respektíve dlhovlnnej oblasti spektra, v iných oblastiach spektra však zhliňovali. Dnes ich poznáme ako aproximácie Planckovho vyžarovacieho zákona, ktorý bol v prvej publikácii v roku 1900 empirickým fitom nameraných hodnôt. V roku 1901 prišiel Planck s matematickým odvodením tohto zákona použitím kvant žiarenia. To, že žiarenie sa môže vyskytovať len v istých balíčkoch energie, bolo dokázané v roku 1905 A. Einsteinom teoretickým vysvetlením fotoelektrického javu. Dnes má vyžarovací zákon absolútne čierneho telesa tvar

$$B_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1},$$

kde  $B_{\lambda}$  je množstvo energie vyžiarenej na jednotku vlnovej dĺžky do jednotkového priestorového uhla z jednotky plochy povrchu.

V praxi meranie teploty horúcich telies prebieha práve využívajúc vlastností tepelného žiarenia. Primárna radiačná termometria tak pozostáva z merania optického výkonu telesa pomocou rádiometra o známej spektrálnej citlivosti a série clôn vymedzujúcich priestorový uhol. Možné je samozrejme merať aj relatívne intenzity v porovnaní so známymi kalibračnými bodmi. Táto metóda je preferovaná nad teplotou 1235 K – bod topenia striebra – a pri teplote 2800 K je schopná dosahovať chyby merania 0,1 K. Kalibrácia rádiometrov obvykle prebieha určením teploty topenia kovov ako striebra, zlata, či medi.

Podobne fungujú aj pyrometre – bezdotykové teploměry – detekujúce žiarenie v širokom spektrálnom obore a využívajú Stefanov-Boltzmannov zákon – integrálny tvar Planckovho zákona popisujúci celkovú vyžiarenú energiu na všetkých vlnových dĺžkach. Tepelné žiarenie je preto jednou z mála metód určovania teploty objektov, ktorých sa nie sme schopný dotknúť, ako hviezd, planét, či iných objektov vo vesmíre.

### *Elektrické vlastnosti látok*

Meranie teploty v praxi často neprebíha primárnou metódou, ktorá meria priamo teplotu, ale sekundárnou metódou meraním inej veličiny, ktorej závislosť na teplote je presne známa. S pokrokmí v meraní elektrických veličín preto nie je prekvapením, že dnes často používanými meradlami teploty sú odporové teploměry, termistory a termočlánky.

Elektrický odpor vodičov je spôsobený brzdením vodivých elektrónov v látke zrážkami s jadrami v kryštálovej mriežke kmitajúcimi tepelným pohybom. So znižujúcou sa teplotou tieto kmity ustávajú a odpor sa preto znižuje až ku stálej hodnote danej poruchami kryštálovej mriežky a prímiesí pri veľmi nízkych teplotách rádu kelvinov. Táto závislosť bola prvýkrát pozorovaná W. Siemensom v roku 1871, ktorý krátko na to zostavil prvý teplomer založený na zmene elektrického odporu. V stredoškolských učebniciach fyziky sa obvykle nachádza vzťah

$$R = R_0 (1 + \alpha (T - T_0))$$

popisujúci závislosť elektrického odporu na teplote ako lineárnu funkciu. Pre väčší rozsah teplôt a vyššiu presnosť merania je však nutné použiť polynomiálny rozvoj s väčším počtom koeficientov. Z meranej hodnoty odporu potom vieme numerickým výpočtom určiť hodnotu teploty. Presné odporové teplomery sú zostavené z platinového odporu (obvykle zvinutého tenkého drôtu) na konci sondy pripojenej k odporovému mostíku, na ktorom galvanometrom meriame napätie. Využitie platinového odporového teplomeru umožňuje meranie teploty v rozmedzí od asi 10 K do 1 300 K s presnosťou pod 1 mK vo väčšine tohto rozsahu teplôt jediným prístrojom.<sup>4</sup>



Obrázek 3: Štandardný platinový odporový teplomer<sup>5</sup>

Inou možnosťou je použitie termistoru – polovodičovej súčiastky, ktorej elektrický odpor sa mení s teplotou zmenou množstva voľných nosičov náboja v polovodiči. Ich zmena elektrického odporu je teda výrazne väčšia ako v prípade odporových teplomerov, takže použiť sa dajú len v menšom rozsahu teplôt okolo stovky kelvinov s presnosťou rádovo desiatiny kelvinu. Poznáme dva druhy – so záporným koeficientom  $\alpha$ , zložené z oxidov kovov skupiny železa, a s kladným koeficientom z dopovaných keramických materiálov. V praxi obvykle slúžia ako technicky jednoduchý spôsob merania teploty, či regulácie prúdu namiesto poistiek.

Ďalším príbuzným zariadením je termočlánok využívajúci termoelektrický jav. V roku 1821 T. J. Seebeck pozoroval, že ak ohrejeme jeden koniec vodivého drôtu, medzi jeho koncami vznikne merateľné napätie. Pre rôzne kovy má rôznu hodnotu – spojením dvoch rôznych kovov do slučky a udržiavaním spojov na rôznej teplote tak môžeme vytvoriť stály prúd. Napätie na termočlánku s teplotami spojov  $T_1$  a  $T_2$  má hodnotu

$$U = \int_{T_2}^{T_1} (S_B - S_A) dT,$$

<sup>4</sup>Veľké množstvo referenčných materiálov pre vysokopresné meranie teploty je k dispozícii na stránkach Ústavu pre miery a váhy <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guides-to-thermometry>

<sup>5</sup>[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SPRT\\_Glass\\_Capsule\\_-\\_RTD.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SPRT_Glass_Capsule_-_RTD.jpg)

kde  $S_i$  sú Seebeckove koeficienty vodičov, ktoré sú sami nelineárnymi funkciami teploty. Pre meranie teploty termočlánok nepotrebuje vonkajšie napájanie, jeho presnosť je však pomerne malá v porovnaní s predchádzajúcimi metódami (len v jednotkách kelvinov). Okrem merania teploty je možné termočlánok využiť na generáciu elektrickej energie z tepla, ako napríklad v rádioizotopovom termoelektrickom generátore. Zaujímavým uplatnením tohto javu je aj Peltierov článok – chladiaci prvok využívajúcu elektrickú energiu fungujúci na opačnom princípe.

Vo všetkých predchádzajúcich prípadoch, podobne ako pre kvapalinové teploměry, je nutné vykonať kalibráciu teplomera. Pre tento účel bol zostavený zoznam presných hodnôt teplôt rôznych presne reprodukovateľných stavov, ako teplôt topenia a trojných bodov čistých látok, reprezentujúci štandardy teploty – Medzinárodná teplotná škála roku 1990 (ITS 1990) medzi trojným bodom vodíka pri 13,8 K a teplotou topenia medi 1 357,8 K neskôr doplnená až k teplote 0,65 K. Pre meranie nízkych teplôt bola v roku 2000 zostavená škála PLTS-2000 siahajúca od 1 K až k 0,9 mK, ktorá však vyžaduje iné techniky merania. V oboch prípadoch sú definované postupy, ako má byť stav, kalibrácia a použitá kalibračná funkcia realizovaná. Pravidelne sa taktiež objavujú tabuľky odchýlok hodnôt v týchto teplotných škálach od novších presnejších meraní primárnymi metódami.

### Pokročilé techniky

Existuje aj mnoho iných techník merania teploty. Polarizačná plynová termometria určuje hustotu plynu meraním jeho elektrických vlastností. Použitím Clausiusovej-Mossottiho rovnice a rovnice ideálneho plynu máme pre riedky plyn vzťah medzi relatívnou elektrickou permitivitou  $\varepsilon_r$ , tlakom  $p$  a teplotou  $T$  plynu

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{A_e p}{RT},$$

kde  $A_e$  je molárna elektrická polarizovateľnosť daná chemickým zložením použitého plynu. Táto hodnota musí byť určená z teoretických kvantovomechanických výpočtov, s dostatočnou presnosťou je známa len pre atomárny plyn hélium  $A_e = 0,52 \text{ cm}^3/\text{mol}$ . Meranie samotné prebieha meraním kapacity kondenzátora  $C$ , medzi ktorého doskami sa nachádza plyné hélium na základe vzťahov obdobných známemu vzťahu

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d},$$

ktorý využíva istých zjednodušení a platí v limite veľkej plochy dosiek  $S$  v porovnaní so vzdialenosťou medzi nimi  $d$ . Inou možnosťou je merať index lomu vzduchu a teplotu určiť pomocou rovníc z minulej seriálovej úlohy.

Úplne iný princíp využíva Johnsonov šumový teplomer. Na elektrickom odpore o veľkosti  $R$  vplyvom tepelných pohybov vzniká istý šum na meranom napätí, alebo prúde. Ak meranie prebieha pri konštantného napätia  $V$ , jeho hodnota bude fluktuovať okolo priemernej hodnoty s rozptylom

$$\sigma_V^2 = 4k_B T R \Delta f,$$

kde  $k_B$  je Boltzmannova konštanta a  $\Delta f$  je šírka rozsahu frekvencií, na ktorých šum meriame. Tento rozsah frekvencií si môžeme predstaviť napríklad následovne – jeden meraný bod sa získava po dobu  $t_1$  a celé meranie trvá dobu  $t_2$ . Nie je preto možné zaznamenať šum na dlhších a kratších časových škálach. Existuje viacero meracích konfigurácií využívajúcich tento jav, ktoré umožňujú merať teplotu od niekoľkých stoviek kelvinov až k desiatkam milikelvinov.



*Ovodené veličiny*

Z teplotou sa viaže veľké množstvo odvodených veličín popisujúcich zmenu vlastností objektov a materiálov ako napríklad teplotná rozťažnosť s jednotkami  $\text{m}^3/\text{K}$ , či tepelná vodivosť s jednotkou  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Taktiež ste sa už iste stretli s tepelnou kapacitou popisujúcou zmenu teploty telesa pri dodaní istého množstva energie s jednotkou  $\text{J}/\text{K}$  (pre materiály sa často stretávame tiež s mernou tepelnou kapacitou vztiahnutou na jednotku hmotnosti). Tieto materiálové konštanty sa obvykle merajú z definičných vzťahov merajúc zmenu danej vlastnosti na teplote.

Jedna fyzikálna veličina má však odlišné postavenie – entropia. Táto veličina popisuje mieru schopnosti systému konať prácu. Druhý zákon termodynamický tvrdí, že entropia uzatvoreného systému je v čase neklesajúca veličina. Podobne je známy aj vzťah zo štatistickej fyziky

$$S(E) = -k_{\text{B}} \sum_i p_i(E) \ln p_i(E),$$

kde je entropia daná ako násobok Boltzmanovej konštanty a členu popisujúceho pravdepodobnosti  $p_i(E)$ , že sa systém bude nachádzať v stave  $i$  pri celkovej energii systému  $E$ . Z tohto vzťahu môžeme vidieť, že entropia rastie s neusporiadanosťou systému – teda rovnomernejším zastúpením jednotlivých stavov. Otázkou však ostáva, ako entropiu merať. K tomuto je najvhodnejší vzťah z klasickej termodynamiky

$$dS = \frac{\delta Q}{T},$$

kde malý prírastok entropie systému je daný podielom dodaného tepla a teploty systému počas vratného procesu. Pre určenie zmeny entropie látky medzi dvomi stavmi je tak nutné zrealizovať vratný proces medzi nimi a merať prenos tepla v systéme. Pre absolútnu hodnotu entropie je nutné použiť fakt postulovaný v treťom termodynamickom zákone – ideálny kryštál pri teplote absolútnej nuly má nulovú entropiu.

---

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.  
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.