



Výfučení: William Thomson

Jméno William Thomson vám možná připadá neznámé a nepovědomé. Přesto jméno tohoto vědce slycháváme během výpočtů v několika oborech fyziky. Pan Thomson je totiž více známý pod jménem baron Kelvin, a ještě známější je po něm pojmenovaná jednotka termodynamické teploty, kelvin. Baron Kelvin však nebyl pouze jednostranně nadaný vědec, vynikal i ve sportu, hudbě a celý život byl hluboce věřící.¹

Stručný životopis

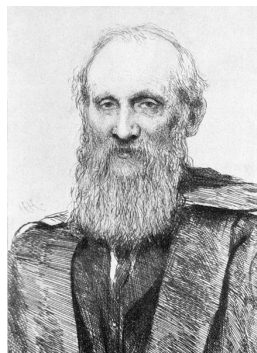
William Thomson se narodil roku 1824 v Belfastu (Severní Irsko). Pocházel z početné rodiny učitele matematiky Jamese Thomsona. Měl 3 bratry a 2 sestry. Thomson přišel o matku, když mu bylo pouhých 6 let. Základní vzdělání se mu dostalo od otce, který děti vyučoval doma. Zásadní změna nastala, když rodina odešla v roce 1833 do Glasgow (Skotsko), kde bylo Thomsonově otci nabídnuto místo. Mladý William se poté sám vydal na studia ve Francii, Německu a Nizozemsku. Již na škole byl velmi úspěšný a získal několik ocenění v překladatelské či literární soutěži. Od roku 1841 studoval v Anglii na univerzitě v Cambridgi. Zde pravidelně publikoval v časopise Cambridge Mathematical Journal. Thomson byl renesanční člověk, a kromě výše zmíněné literatury, jazyků a samozřejmě fyziky se zajímal i o hudbu – pomohl založit Cambridge University Musical Society a vynikal též jako veslař.

Během své profesní kariéry se věnoval především termodynamice, k té se ale dostaneme později. Stal se profesorem přírodních věd na Univerzitě v Glasgow, kde působil přes 50 let. Po odchodu do penze v roce 1900 se věnoval především svým vynálezům, které mu zajistily nemalé jmění. Profesor Thomson zemřel v roce 1907 ve Skotsku ve věku 83 let. Je pochován ve Westminsterském opatství vedle sira Isaaca Newtona. Lord Kelvin po sobě zanechal 70 patentů a přes 660 článků a publikací.

Za zmínku stojí určitě i Kelvinovy zásluhy v oblasti telekomunikace. V roce 1858 se mu po mnoha problémech na druhý pokus podařilo položit transatlantický telekomunikační kabel, kterým poprvé v historii propojil Americký a Evropský kontinent (konkrétně kanadský Newfoundland a irskou Valencii). Kabel ovšem vydržel jen několik měsíců a brzy byl poškozen. Po konci americké občanské války v roce 1866 byl kabel obnoven a tím zjednodušil a zrychlil celosvětovou komunikaci.

Termodynamika

Jak název napovídá, termodynamika se zabývá jakožto odvětví fyziky teplem a teplotou. Teplotou se myslí vlastnost látek, kterou měříme např. teploměrem; udává, jak chladná nebo horká látka je (pro nás je zatím důležité, že teplota popisuje stav látky, na její přesnou definici zde bohužel nezbývá místo). Teplo je na druhou stranu forma energie. Čím více tepla těleso přijme, tím může (ale nemusí) být teplejší (například tuhé, chemicky nereagující těleso se obvykle



¹Obrázek Williama Thomsona převzat z Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:William_Thomson_1st_Baron_Kelvin.jpg.

ohřeje, zatímco třeba plyn v pístu se může i roztáhnout bez výrazného zvýšení teploty – teplo se přemění na mechanickou práci). Na termodynamice je důležité si povšimnout, že se obvykle nezabývá pevnými tělesy, jako to činí např. Newtonova mechanika, nýbrž všemi skupenstvími látek. Protože ty se však skládají z obrovského množství molekul (v případě vzácných plynů dokonce jednotlivých atomů), nelze popsat vlastnosti všech částic najednou – popisujeme tedy jen úhrnné vlastnosti systému, kterými jsou např. u plynů často tlak, objem a teplota. Pro úplný popis se často používá trojice: objem, teplota, počet částic, přičemž tlak je možné dopočítat, ale o tom více na střední škole.

Jak už bylo výše zmíněno, po baronu Kelvinovi je pojmenována jedna ze základních jednotek SI, a to jednotka termodynamické teploty. William Thomson je totiž autorem absolutní teplotní stupnice, tj. stupnice s počátkem v absolutní nule, jejíž jednotkou je právě kelvin (značíme K bez kroužku!). Absolutní nulou rozumíme takovou teplotu, při které již je fyzikálně nemožné těleso více ochladit.

Kelvinova stupnice má dílky stejně velké jako nám známější stupnice Celsiova, proto je mezi nimi jednoduchý přepočít: 0 K odpovídá zhruba $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, takže $T/[\text{K}] = t/[^{\circ}\text{C}] - 273,15$. Abychom ve vzorcích snáze odlišili termodynamickou teplotu (v kelvinech) od teploty ve stupních Celsia, bývá zvykem termodynamickou teplotu značit velkým písmenem T , zatímco Celsiovu teplotu značíme malým písmenem t .

V další části Výfucení si představíme jednotlivé termodynamické zákony. U každého z nich se můžeme setkat s několika různými formulacemi, ale všechny jsou ve výsledku ekvivalentní, tedy platí všechny a žádná formulace není fyzikálně lepší než jiná (ačkoli některé mohou být snáze pochopitelné). Tyto zákony tvoří základní postuláty termodynamiky, tedy všechny další výpočty a závěry v rámci termodynamiky z nich vychází. Postulát (obecně) je fyzikální tvrzení, které přijímáme za pravdivé ze zkušenosti a nedokazujeme jej. V rámci termodynamiky tedy termodynamické zákony vycházejí z našeho pozorování a není známé žádné jejich porušení. Nicméně za hranicemi termodynamiky, například v mikrosvětě, již platné být nemusí a známe jevy, které se jimi neřídí.

1. termodynamický zákon

První termodynamický zákon nám říká, že celková energie izolované soustavy je stálá (její množství se nemění), nemůže libovolně vznikat a zanikat, ale může se přeměňovat z jednoho druhu na jiný. Jinými slovy se jedná o zákon zachování energie (ZZE). Z prvního termodynamického zákona proto plyne, že teplo je pouze jedním z druhů energie a jeho mechanickou obdobou je práce. Práce i teplo jsou tedy druhy energie, ale zatímco práce je energie potřebná k provedení makroskopického pohybu, teplo je změna energie jednotlivých částic, která ale nemusí být makroskopicky viditelná. Tento zákon rovněž vyvrací funkčnost takzvaného perpetua mobile prvního druhu (stroje, který může donekonečna konat práci, aniž by mu byla dodávána energie).

2. termodynamický zákon

Z prvního termodynamického zákona již víme, že energie se může přeměňovat z jednoho druhu na jiný. Podle druhého termodynamického zákona nemohou tyto změny probíhat libovolně v obou směrech. Například pokud jedeme z kopce na kole, naše potenciální energie se přeměňuje na kinetickou, ale protože nechceme jet příliš rychle, začneme brzdit. Místo toho, aby se zvyšovala naše kinetická energie, třou brzdné kotouče o ráfky a tím se zahřívají. Potenciální

energie, kterou jsme měli nahoře na kopci, se nyní dole pod kopcem přeměnila v teplo uložené v zahřátých brzdách a ráfku. Ovšem již není možné, abychom pomocí zchlazení ráfků bez námi vložené energie (šlapání) vyjeli zpět na kopec. Tato přeměna energie tedy funguje pouze v jednom směru a jedná se o změnu nevratnou.

Druhý termodynamický zákon tak vyjadřuje přesně tuto situaci. Tvrdí, že některé přenosy energie se nedějí samovolně. Konkrétně že pokud jsou dvě tělesa v kontaktu, tak bez vykonání práce vždy předává energii teplejší těleso chladnějšímu. Pokud nevykonáme žádnou práci (např. použitím ledničky), přenos neproběhne v opačném směru. Opět si uvedeme příklad z praxe. Pokud hodíme do teplé limonády kostku ledu, teplá tekutina začne předávat energii ledu a ten se rozpustí. Teplota ve sklenici se ustálí tak, aby nastal rovnovážný stav a obě látky měly stejnou teplotu. Tento proces popisuje kalorimetrická rovnice. Není možné, aby děj samovolně nastal obráceně – led se ochladil a limonáda ještě zteplala.

Druhá věta termodynamická vznikla řešením otázky, jak přeměnit teplo na práci. Baron Kelvin se podílel na dvou formulacích této věty. Společně s Maxem Planckem ji definoval takto: „Nelze sestavit periodicky pracující tepelný stroj, který by trvale konal práci pouze tím, že by ochlazoval jedno těleso, a k žádné další změně v okolí by nedocházelo.“ ... a s Wilhelmem Ostwaldem jako: „Nelze sestavit perpetuum mobile druhého druhu.“ (tj. perpetuum mobile pracující díky porušení druhého termodynamického zákona)

3. termodynamický zákon

Třetí termodynamický zákon popisuje chování látek blízko absolutní nuly (0 K, $-273,15\text{ }^\circ\text{C}$). Říká, že konečným procesem nelze ochladit čistou pevnou látku na absolutní nulu. Tělesa tedy můžeme libovolně zahřívat, ale nelze je libovolně ochlazovat. Rovněž z ní pro určité fyzikální veličiny vyplývá, že blízko absolutní nuly jsou téměř nulové. Příkladem jedné z těchto veličin je tepelná kapacita, o níž se budeme bavit za chvíli.

Kalorimetrická rovnice

V této sekci se ještě vrátíme ke kalorimetrické rovnici, která vyplývá z 2. termodynamického zákona. Jak jsme si již řekli, při styku dvou nestejně teplých těles dojde k přenosu tepla, a to z teplejšího tělesa na chladnější. Přitom platí, že teplo (zn. Q), které chladnější těleso přijme, je rovno teplu, které teplejší těleso odevzdá. Můžeme to zapsat rovnicí takto:

$$Q_1 - Q_2 = 0.$$

Teplo obsažené v tělese při dané teplotě závisí na hmotnosti tělesa m . Dalším důležitým parametrem je měrná tepelná kapacita daného materiálu, kterou značíme c a její jednotka je $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Její hodnota je pro různé látky uvedena v tabulkách.² Posledním parametrem je teplota tělesa T . S touto rovnicí můžeme pracovat v mnoha výpočtech. Běžně nás zajímá teplo, které těleso přijalo či vydalo při změně své teploty, pro tento případ platí vztah:

$$Q = mc\Delta T,$$

kde ΔT je rozdíl výchozí a konečné teploty tělesa, tedy při ohřátí tělesa z teploty T_1 na teplotu T_2 je $\Delta T = T_2 - T_1$. Za povšimnutí jistě stojí, že ať už dosadíme do vzorce teplotu v Kelvinech či ve stupních Celsia, vyjde hodnota ΔT číselně shodná, což vyplývá z převodního vztahu.

²Tepelná kapacita závisí na teplotě, nicméně změna její hodnoty se výrazněji projevuje až při extrémních změnách teplot nebo v blízkosti absolutní nuly. Pro běžné výpočty na ni proto postačí nahlížet jako na konstantu.

Kalorimetrickou rovnicí můžeme ve tvaru, v jakém je výše, používat bez problémů při jakémkoli ohřívání či ochlazování těles, dokud nedojde ke změně jejich skupenství. Pokud se má totiž například z ledu stát voda nebo z vody pára, musí být dodáno navíc takzvané skupenské teplo, aby byla změna uskutečněna. Skupenská tepla pojmenováváme podle procesu, kterého se týkají, tedy skupenské teplo tání, tuhnutí, vypařování, kondenzace, sublimace či desublimace. Skupenské teplo běžně značíme L s dolním indexem dle procesu, kterého se týká, tedy například skupenské teplo tání značíme L_t . Jedná se o druh tepla, proto jeho jednotkou je joule (J).

Ze skupenského tepla můžeme samozřejmě také definovat i skupenské teplo měrné, tj. vztahené k jednotce hmotnosti látky. Podobně jako tomu bylo u měrné tepelné kapacity, značíme ji také malým písmenem, a tedy pomocí l s jednotkou $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (J/kg). Indexuje se stejným způsobem jako skupenské teplo a jeho hodnoty nalezneme pro různé látky v tabulkách.

Představme si nyní proces ledu vhozeného do limonády: nejdříve se led ohřeje na 0°C dle kalorimetrické rovnice, poté se začne rozpouštět a během této části přijme skupenské teplo tání, díky kterému se z něho stane voda, jejíž teplota je také 0°C , voda se smísí s limonádou a dále se ohřeje opět dle kalorimetrické rovnice na takovou teplotu, kterou bude zchlazená limonáda mít. Chceme-li spočítat celkové teplo, které led změněný na vodu během tohoto procesu přijal, jednoduše sečteme tato tři tepla – z ohřátí na 0°C , skupenské teplo tání, a ohřátí na výslednou teplotu.

Skupenské teplo závisí pouze na látce, o níž se zajímáme, a na její hmotnosti dle vzorce

$$L = l \cdot m,$$

kde l značí měrné skupenské teplo. Toto teplo je pro danou látku a daný přechod mezi skupenstvími stejné, tedy měrné skupenské teplo tání ledu je stejné jako měrné skupenské teplo tuhnutí vody (tento fakt odstraňuje problém s volbou indexu skupenského tepla způsobeného stejným počátečním písmenem tání a tuhnutí). Rovněž platí, že sublimační teplo je součtem tepel tání a vypařování. Pokud se tedy setkáme s úlohou sublimace ledu ve vodní páru, můžeme potřebné měrné skupenské teplo získat sečtením měrného skupenského tepla tání ledu a vypařování vody.

Přenos tepla

Již jsme se seznámili s tím, jak se počítá množství tepla, které nějaké těleso vydá či přijme, ale jak jej může vydat či přijmout? Zaměřme se nyní na to, jak se teplo přenáší. Jedná se o poměrně složitý proces, který lze zjednodušit do tří základních modelů: tepelná výměna vedením (neboli kondukcí), prouděním (konvekci) a sáláním (nebo též zářením či radiací). V mnoha reálných situacích pak dochází k přenosu tepla více modely zároveň, ale jeden z nich často bývá dominantní a tím se budeme zabývat (zbytek zanedbáme).

Pro popis přenosu tepla používáme veličinu tepelný tok, jež vyjadřuje množství tepla, které projde zkoumanou oblastí za určitý čas ve směru od teplejšího místa k chladnějšímu. Tepelný tok značíme \dot{Q} (Q s tečkou), jeho základní jednotka je watt (W), neboli $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$ a vypočte se z předaného tepla Q (v joulech) za čas τ (v sekundách) takto:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\tau}.$$

Zcela stejně je možné značit a počítat tepelný výkon, tedy veličinu, která udává, kolik tepla za určitý čas dodá zkoumaný zdroj tepla.

V tomto textu se nakonec zaměříme na dva ze tří zmíněných způsobů přenosu tepla: vedení a proudění. Záření se od nich liší tím, že nepotřebuje žádné hmotné prostředí a děje se skrze elektromagnetické vlnění, které vydávají všechna teplá tělesa. Tento přenos tepla (nebo obecně energie) jsme důkladně prozkoumali již ve druhém Výfuctení o Maxu Planckovi³.

K přenosu tepla vedením dochází nejtýpěji v pevných látkách. V části tělesa, kde je vyšší teplota, mají částice vyšší energii, kterou předávají částicím o nižší energii v chladnější části tělesa pomocí vzájemných srážek. Pokud při tomto předávání kmitají částice kolem jedné stálé polohy, tedy nepohybují se volně v prostoru, a narážejí pouze do sousedních částic, jedná se o přenos tepla vedením. Je-li teplo vedeno skrz homogenní desku ve směru kolmém na její plochu, je možné tepelný tok spočítat pomocí vztahu:

$$\dot{Q} = \lambda \frac{S}{d} \Delta T,$$

kde λ značí součinitel tepelné vodivosti (konstanta pro daný materiál), S je plocha průřezu desky, kolmo ke kterému se teplo šíří, d je šířka desky (dráha, kterou v desce teplo urazí) a ΔT je rozdíl teplot konců desky. Jednotkou λ je $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a hodnoty najdeme v tabulkách.

Přenášeli-li se teplo z pevného tělesa (stěny) do kapaliny nebo plynu, či naopak, dochází k přenosu tepla prouděním. Můžeme si to představit například tak, že teplá kapalina je „přitahována“ chladnou stěnou, proto se jí dotýká, nicméně dotykem předá tenká vrstva kapaliny své teplo stěně, čímž se ochladí. Další vrstva kapaliny se chce ale také dostat ke stěně, a tak tu již ochlazenou „odsune“ a sama předává teplo stěně atd. Proudění tedy vzniká samo od sebe, bez lidského zásahu. Při sdílení tepla prouděním platí pro tepelný tok rovnice:

$$\dot{Q} = \alpha S \Delta T,$$

kde S je velikost plochy, na které k výměně dochází, ΔT je opět rozdíl teplot a α značí součinitel přestupu tepla mezi kapalinou/plynem a pevnou látkou v jednotkách $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Součinitel přestupu tepla nelze jednoduše matematicky předpovědět, je třeba jej změřit pro každou situaci zvlášť.

Pokud se teplo šíří různými prostředními, musí se tepelný tok ve všech prostředích rovnat. Představme si tedy, že se nám šíří teplo ven z budovy skrz stěnu. Nejdříve se šíří ze vzduchu v budově na stěnu prouděním, čímž získáme rovnici pro tepelný tok \dot{Q}_1 . Poté se přenáší stěnou vedením, z toho získáme rovnici pro tepelný tok \dot{Q}_2 . Nakonec se šíří ze stěny do venkovního vzduchu opět prouděním s tepelným tokem \dot{Q}_3 . Uvažujeme pouze ustálený přenos tepla, proto musí platit $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3$ a rovnice poté můžeme sečíst, čímž získáme $3\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3$, kde \dot{Q} je výsledný tepelný tok a za \dot{Q}_{1-3} dosadíme z původních rovnic.

³http://vyfuk.mff.cuni.cz/_media/ulohy/r8/vyfucteni/vyfucteni_2.pdf

Závěr

Povídání o Williamu Thomsonovi a termodynamice uzavřeme jeho vlastním citátem: „Často říkám, že jestliže můžete cokoliv, o čem hovoříte, změřit nebo vyjádřit čísly, pak o tom vždy víte víc. . .“

Martina Daňková

Simona Gabrielová
simca@vyfuk.mff.cuni.cz

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

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