

Literatúra

- [1] *3B Scientific Physics: Rotational Motion Apparatus*, [online]. Dostupné z: https://www.3bscientific.com/product-manual/1006785_EN.pdf.
- [2] *Kladivová, M., Kovařáková, M., Gibová, Z., Fričová, O., Hutníková, M., Kecer, J.*: Laboratory experiment for the study of friction forces using rotating apparatus. *European Journal of Physics*, roč. 37 (2016), č. 6, 065055 (s. 1–15).
- [3] <http://web.tuke.sk/feikf/video/videomerania-.html>.
- [4] <http://web.tuke.sk/feikf/video/ota-avy-pohyb-.html>.
- [5] *Gibová, Z., Fričová, O., Hutníková, M., Kecer, J., Kladivová, M., Kovařáková, M.*: Demonstrační experiment s grafickou podporou systému IP-Coach. In: MITAV 2015. Univerzita obrany, Brno 2015, s. 1–6.
- [6] *Time v3.2 – addons.videolan.org* [online]. Dostupné z: <https://addons.videolan.org/p/1154032/>.
- [7] *How to View Milliseconds in VLC Media Player on Windows 10?* [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=A9yq8qT0hqY>.
- [8] *Kovařáková, M., Kladivová, M., Fričová, O., Gibová, Z., Hutníková, M., Kecer, J.*: Viscous friction in standard rotational motion experiments. *European Journal of Physics*, roč. 41 (2020), č. 3, s. 1–10.

Rudolf Clausius

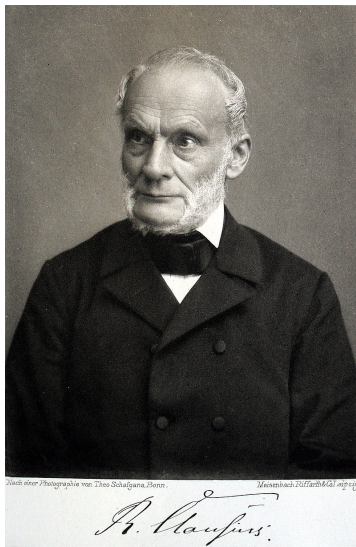
(k dvoustému výročí narození)

JITKA HOŠKOVÁ PROKŠOVÁ

Fakulta pedagogická ZČU, Plzeň

Rudolf Julius Emanuel Clausius patřil k předním německým fyzikům 19. století. V mládí u něj nad zájmem o historii převážilo zaujetí o aplikace matematiky, a ty ho přivedly ke studiu optických a tepelných jevů. V polovině 19. století se zasloužil o vznik termodynamiky jako teoretické disciplíny a o její užití na obecné makroskopické procesy.

Rudolf se narodil 2. ledna 1822 v tehdy pruském Köslinu (nynějším polském městě Koszalinu) v Pomorānsku. Stal se šestým dítětem velké rodiny, která se časem rozrostla až na osmnáct dětí. Jeho otec působil jako ředitel soukromé školy, kterou založil a v níž také sloužil jako protestantský pastor. Školu svého otce navštěvoval Rudolf několik let. Později studoval na gymnáziu ve Štětíně, kde se těšil pověsti velmi spolehlivého a nadaného studenta, jehož úsudku si mnozí vážili. V roce 1840 nastoupil na univerzitu v Berlíně. Přestože ho velmi zajímala historie, rozhodl se nakonec pro přírodní vědy. Po čtyřech letech dokončil studia matematiky a fyziky a svůj první rok praxe strávil výukou na Friedrich-Werder-Gymnasium v Berlíně [1].



Obr. 1 Zdroj [Wikipedie](#)

Dál se vzdělával a pracoval na své disertační práci, týkající se problematiky odrazu a lomu slunečního světla v atmosféře (zabýval se v ní také vysvětlením modré barvy oblohy, soumrakovými jevy a polarizací světla). V roce 1847 ji předložil vědecké radě univerzity v Halle a získal doktorát s vyznamenáním. Později lord Rayleigh (1842–1919) ale ukázal, že místo odrazu a lomu, jak předpokládal Clausius, souvisí modrá barva oblohy s rozptylem světla. I přesto byla ve své době jeho disertační práce velmi ceněná pro nezvykle hlubokou aplikaci matematiky [2].

V následujících letech se Clausius zabýval kalorickou teorií, která považovala teplo za nezničitelné tepelné fluidum, jež si látky vzájemným kontaktem předávají. V té době již byla dobře známá analýza účinnosti parního stroje, kterou v roce 1824 publikoval Sadi Carnot (1796–1832). Závěry této analýzy převedl Emil Clapeyron (1799–1864) o deset let později do matematických vztahů. Koncem čtyřicátých let 19. století se zavedení pojmu energie a hledání co nepřesnější formulace zákona zachování energie věnovala řada vědců – byli to především Julius Mayer (1814–1878), Hermann von Helmholtz (1821–1894) a William Thomson (1824–1907), jejichž úvahy experimentálně doplnil James Joule (1818–1889) [1, 3, 5].

Rudolf Clausius dokázal vyřešit protikladné výsledky jejich závěrů¹⁾ a 18. února 1850 v Berlínské akademii završil své úsilí přednesením příspěvku *O hybné síle tepla* (Über die bewegende Kraft der Wärme), který byl ve stejném roce publikován v *Annalen der Physik* [3]. Tato jeho nejslavnější práce se stala základem pro vznik termodynamiky jako teoretické disciplíny s možností aplikovat ji na obecné makroskopické procesy.

Clausius nejprve rozvedl myšlenku, že maximální práce získaná z tepla přenášeného médiem v Carnotově cyklu mezi teplejším a chladnějším zásobníkem závisí pouze na jejich teplotách. Samovolný přechod tepla tedy není možný z chladnějšího tělesa na teplejší, čímž formuloval druhý termodynamický zákon.²⁾ Dále se věnoval matematickému zápisu prvního termodynamického zákona, který vyjádřil v dodnes používaném tvaru:

$$\partial Q = dU + \partial W',$$

kde ∂Q je teplo dodané do termodynamického systému, které se spotřebuje na změnu vnitřní energie dU a práci vykonanou tímto systémem $\partial W'$.

Clausius přitom vycházel jak z vlastních experimentálních výsledků, tak i ze závěrů Jouleových pokusů. Neúplné diferenciály tepla ∂Q a práce $\partial W'$ tak odlišily procesní veličiny od stavové veličiny vnitřní energie U , jejíž změnu určuje úplný diferenciál dU .

Rok 1850 uzavřel Rudolf Clausius získáním titulu soukromý docent na berlínské univerzitě, kde 18. prosince přednesl svou inaugurační přednášku. Kromě toho už od září tohoto roku působil jako profesor fyziky na Královské dělostřelecké a inženýrské škole v Berlíně.

Jeho vědecká práce se těšila uznání odborné veřejnosti, a tak mu byla o pět let později, v srpnu 1855, nabídnuta profesura na polytechnice v Zürichu.³⁾ Přijal ji a na tomto vynikajícím místě, obklopený významnými matematiky a fyziky, strávil dalších dvanáct let. Přestože se mu stýskalo po vlasti, odmítl v roce 1858 nabídku z polytechniky v Karlsruhe i několik dalších nabídek v následujících letech [1].

V Zürichu se vrhl do vědecké práce s plným nasazením. V roce 1857 uveřejnil článek *O povaze pohybu, který nazýváme teplo* (Über die Art der

¹⁾Na protiklad závěrů Clapeyrona ohledně Carnotovy představy, která zdůrazňovala zachování celkového množství tepla (přenos tepla beze ztrát), a výsledků Jouleových měření, ze kterých vyplýval opak, poukázal jako první William Thomson. Řešení však nenavrhl.

²⁾„Je nemožné pro samovolně pracující stroj, kterému není pomáháno zvnějšku, převádět teplo z tělesa při jedné teplotě na jiné těleso s teplotou vyšší.“ [3]

³⁾ETC Zürich – švýcarský federální technologický institut

Bewegung, welche wir Wärme nennen) [4], ve kterém rozvinul své představy o mikroskopických zákonitostech v plynech. Novou teorii plynů nazval kinetickou a věnoval se zejména určení rychlosti molekul v plynech nebo tlaku plynu na stěnu nádoby. Předpokládal, že molekuly se pohybují přímočaře konstantní rychlostí, přičemž svůj směr mohou měnit buď srážkou s jinou molekulou nebo se stěnou nádoby. Kromě translačního pohybu nevyloučil ani rotaci a vibraci molekul a zavedl pojem střední volné dráhy částic. Jeho výpočty se staly inspirací pro skotského geniálního fyzika Jamese C. Maxwella (1831–1879), který zmíněnou konstantní rychlost molekul nahradil rozdělovací funkcí rychlostí [5].

Jako sedmatřicetiletý založil Rudolf Clausius v Züriču rodinu – 19. listopadu 1859 se oženil s Adelheid Rimpam. Našel zde i celoživotního přítele v Albertu Moussonovi (1805–1890), který vyučoval experimentální fyziku a zajímal se o zoologii [6].

V šedesátých letech 19. století začal věnovat Clausius velkou pozornost matematickému vyjádření termodynamických zákonitostí. V roce 1865 provedl matematický rozbor obecného cyklického děje, ze kterého vyvodil známou, později po něm pojmenovanou, Clausiovu nerovnost:

$$dS \geq \frac{\partial Q}{T}.$$

Touto nerovností zavedl novou stavovou veličinu entropii S .⁴⁾ Ta se později stala jedním z nejdůležitějších pojmů⁵⁾ ve fyzice především díky Ludwigu Boltzmannovi (1844–1906), který našel vztah mezi entropií a pravděpodobností makrostavu zkoumaného systému. Boltzmannova mikroskopická interpretace tohoto pojmu umožnila, aby entropie překročila hranice termodynamiky a uplatnila se v mnoha vědních oborech (jako např. v chemii, biologii, matematice, teorii informace aj.).

V roce 1867 byla Clausiovi nabídnuta profesura na univerzitě v německém Würzburgu, kterou přijal, protože už nemohl déle odolat své touze vrátit se zpět do vlasti. K významným pracím z období 1865–1867 patří např. *Mechanická teorie tepla* (Die mechanische Wärmetheorie) [7], která

⁴⁾Entropie (z řečtiny éntrepein = obracet) byla v němčině vyjadřována slovem Verwandlungsinhalt, což se dá doslovně přeložit jako *změna obsahu*. Lze se setkat i s jinými volnými překlady jako třeba *změna směru* nebo *změna formy*.

⁵⁾Historickou zajímavostí je, že Clausius stanovil i jednotku entropie:

$$1 \text{ Clausius} = 1 \text{ kalorie} / 1 \text{ stupeň Celsia.}$$

V současnosti se entropie vyjadřuje v jednotkách $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$.

kompiluje a zpřesňuje jeho původní práce v termodynamice a kinetické teorii.

Sotva však Clausius pobyl ve Würzburgu jeden rok, projevila o něj zájem mnichovská univerzita. Možnost brzkého stěhování odmítl, ale roku 1869 přijal nabídku univerzity v Bonnu. Nedlouho poté však politické události, které vedly k prusko-francouzské válce, významně ovlivnily i život Clausiův. Přestože se blížil padesátce, jeho vlastenecké cítění mu nedovolilo, aby se nepřihlásil do vojenské služby. Ujal se vedení záchranného sboru, který vytvořil z bonnských studentů, a ve dvou klíčových bitvách⁶⁾ pomáhal mírnit utrpení raněných. Sám však byl během německého tažení zraněn a po zbytek života trpěl silnými bolestmi v noze. Za své zásluhy obdržel v roce 1871 Železný kříž.

O čtyři roky později postihla Clausiovu rodinu tragická událost. Při porodu šestého dítěte zemřela Adelheid a Rudolf zůstal na výchovu svých dětí sám. Spolu s bolestmi z válečného zranění se jen obtížně dokázal v tomto období soustředit na vědeckou práci. Na doporučení lékaře se rozhodl věnovat se jízdě na koni, brzy se stal zkušeným jezdcem a vyrovnal se tak s problémy, které mu přinášelo dlouhé přednášení na univerzitě [1, 6].

V roce 1884 se stal rektorem univerzity v Bonnu a o dva roky později se pak znovu oženil se Sophií Stack. Z jejich krátkého manželství se ještě narodil syn.

Úvahy týkající se prvního i druhého termodynamického zákona a jejich převedení do matematické podoby ho sice provázely řadu let, ale zabýval se i dalšími oblastmi fyziky – společně s Emilem Clapeyronem formulovali důležitou rovnici,⁷⁾ umožňující zjistit, jak změna tlaku ovlivní změnu teploty fázového přechodu 1. druhu. Také se věnoval elektrolýze a vysvětlení termoelektrických jevů a angažoval se při formulování elektrodynamické teorie.

Kromě výše zmíněných charakterních vlastností je třeba k dokreslení Clausiovy povahy zmínit i s ním spojovanou výraznou kritičnost. Vedl spory s významnými vědci své doby o prvenství ve stanovení různých experimentálních dat nebo ohledně tvrzení o rovnocennosti práce a tepla (např. s Williamem Thomsonem nebo Peterem Taitem). Tyto kritiky a rozepře byly patrně nejčastěji motivovány Clausiovým vlastenectvím, kdy se svým ostrým postojem snažil zajistit historické prvenství pro německý

⁶⁾V bitvách u Vionville a Gravelotte (1870–1871) ztratili Němci zhruba 20 tisíc mužů na rozdíl od Francouzů, kteří přišli o 13 tisíc vojáků.

⁷⁾V teorii fázových přechodů je známá jako Clausiova–Clapeyronova rovnice.

národ [6, 8].

Během svého života obdržel řadu ocenění a vyznamenání. Stal se členem Královské společnosti v Londýně (1868), členem Královské švédské akademie věd (1878) a členem Německé akademie věd (1880). Získal Huygensovu (1870) a Copleyho medaili (1879) a za významný vědecký pokrok mu byla udělena Francouzskou akademií věd Ponceletova cena (1883).

Rudolf Julius Emanuel Clausius zemřel v Bonnu 24. srpna 1888.

Literatura

- [1] Rudolf Clausius (1822–1888) – Biography – MacTutor History of Mathematics, [online, 2. 1. 2022]. Dostupné z: <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Clausius/>.
- [2] *Clausius R.*: Über die Intensität des durch die Atmosphäre reflectirten Sonnenlichts. *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, vol. **36** (1848), s. 185–215.
- [3] *Clausius R.*: Über die bewegende Kraft der Wärme. *Annalen der Physik*, vol. **155** (1850), s. 368–397. 1850. Dostupné z: <https://archive.org/details/ueberdiebewegen00claugoog/page/n5/mode/2up>.
- [4] *Clausius R.*: Über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen. *Annalen der Physik*, vol. **176** (1857), s. 353–380. Dostupné z: <https://zenodo.org/record/1423644#.YfUFo0-LreQ>.
- [5] *Lacina A.*: Vznik a vývoj termodynamiky a statistické fyziky, [online, 10. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.physics.muni.cz/kof/clanky/vznikt.pdf>.
- [6] Clausius, Rudolf | Encyclopedia.com, [online, 3. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/clausius-rudolf>.
- [7] *Clausius R.*: Die mechanische Wärmetheorie. Braunschweig (Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn), 1876. Dostupné z: https://books.google.cz/books/about/Die_mechanische_w%C3%A4rmetheorie_bd_Entwick.html?id=yzJLAAAAYAAJ&redir_esc=y.
- [8] *Clausius R.*: Über ein neues Grundgesetz der Elektrodynamik. *Annalen der Physik*, vol. **232** (1875), s. 657–660. Dostupné z <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.18752321215>.