

Jan Obdržálek

**Úvod do termodynamiky,
molekulové a statistické fyziky**

VYDAL MATFYZPRESS

PRAHA 2015

Úvod do termodynamiky,
molekulové a statistické fyziky

Jan Obdržálek

Matfyzpress Praha

Ideálnímu plynu, vratnému ději, adiabatické stěně ... s láskou připomínám:

Jeden poněkud prostořeký filosof, myslím, že to byl Hamlet, princ dánský, pravil, že je mnoho věcí na nebi a na zemi, o kterých se v našich příručkách nedočteme.

Narážel-li tím ten prostoduchý člověk, který jak známo neměl všech pět pohromadě, na naše kompéndia fyziky, můžeme mu klidně odpovédět: Dobrá, ale zato je v našich příručkách spousta věcí, které se nenajdou ani na nebi, ani na zemi.

G. Ch. Lichtenberg: Myšlenky, postřehy, nápady.

Překlad J. Čermák. Odeon, Praha 1983

Lichtenberg Georg Christoph (1742–99), profesor experimentální fyziky, matematiky a astronomie v Göttingenu. Jeden z nejlepších německých aforistů, vynikající popularizátor fyziky a přírodních věd.

O tom, co je a co není, a o modelech vůbec, se dočtete na str. 20.

Obsah

| | |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| Předmluva | 11 |
| 1 Výchozí představy termodynamiky | 13 |
| 1.1 Předmět zkoumání termodynamiky | 13 |
| 1.1.1 Celkový rámec | 13 |
| 1.1.2 Teplo, teplota, entropie | 14 |
| 1.1.3 Vymezení termodynamiky | 16 |
| 1.2 Základní pojmy termodynamiky; terminologie | 18 |
| 1.2.1 Termodynamická soustava a její stav | 18 |
| 1.2.2 Pojmy známé z mechaniky | 21 |
| 1.2.3 Látka; množství látky; mol | 22 |
| 1.2.4 Částice | 26 |
| 1.2.5 Stěna | 28 |
| 1.2.6 Stav soustavy; termodynamický děj | 28 |
| 1.2.7 Typy stavových veličin | 30 |
| 2 Nultý zákon termodynamiky; empirická teplota | 35 |
| 2.1 Rovnovážný stav | 35 |
| 2.2 První postulát termodynamiky | 36 |
| 2.2.1 Relaxace | 37 |
| 2.3 Druhý postulát (nultý zákon termodynamiky) | 38 |
| 2.3.1 Teplota; empirická teplota | 38 |
| 2.3.2 Druhý postulát – nultý zákon termodynamiky | 40 |
| 2.3.3 Rovnováha dvou soustav | 41 |
| 2.3.4 Praktické měření teploty | 42 |
| 3 První zákon termodynamiky; teplo | 49 |
| 3.1 Základní idea | 49 |
| 3.2 Práce | 50 |
| 3.2.1 Práce v mechanice | 50 |
| 3.2.2 Práce u soustavy tvořené plynem | 51 |
| 3.2.3 Práce při zobecněných souřadnicích a silách | 53 |
| 3.3 Teplo | 55 |
| 3.3.1 Energie | 55 |
| 3.3.2 Teplo | 55 |
| 3.4 Chemická práce; chemický potenciál | 57 |
| 3.5 Formulace prvního zákona termodynamiky | 58 |
| 3.5.1 1.ZTd s neproměnným látkovým množstvím | 58 |
| 3.5.2 Plné znění prvního zákona termodynamiky | 59 |
| 3.5.3 Historický význam prvního zákona termodynamiky | 59 |
| 3.5.4 Fluidová teorie, fluidum „calor“ | 59 |

| | | |
|----------|---------------------------------------------------|------------|
| 4 | Termika. Důsledky zavedení teploty a tepla | 61 |
| 4.1 | Stavová rovnice | 61 |
| 4.1.1 | Stavová rovnice termická a kalorická | 61 |
| 4.1.2 | Ideální plyn | 63 |
| 4.1.3 | Van der Waalsův plyn | 67 |
| 4.1.4 | Jiné modely | 75 |
| 4.2 | Některé materiálové veličiny | 82 |
| 4.2.1 | Tepelná kapacita | 82 |
| 4.2.2 | Měrná tepelná kapacita (měrné teplo) | 84 |
| 4.2.3 | Latentní teplo (skupenské, výparné, ... teplo) | 84 |
| 4.2.4 | Teplotní roztažnost | 85 |
| 4.2.5 | Teplotní rozpínavost | 86 |
| 4.2.6 | Stlačitelnost | 87 |
| 4.2.7 | Přenos tepla | 87 |
| 4.3 | Kalorimetrie | 90 |
| 4.3.1 | Adiabatický kalorimetr | 90 |
| 4.3.2 | Kalorimetrická rovnice | 91 |
| 4.3.3 | Tepelně vodivostní kalorimetr | 93 |
| 4.4 | Jednoduchý systém | 93 |
| 4.4.1 | Základní idea | 93 |
| 4.4.2 | Izochorický děj ($V = \text{konst}$) | 96 |
| 4.4.3 | Izobarický děj ($p = \text{konst}$); entalpie | 97 |
| 4.4.4 | Izotermický děj ($T = \text{konst}$) | 99 |
| 4.4.5 | Adiabatický děj ($Q = 0$) | 100 |
| 4.4.6 | Polytropický děj ($C = \text{konst}$) | 102 |
| 4.4.7 | Obecné děje | 103 |
| 4.4.8 | Joulův-Thomsonův pokus | 106 |
| 4.5 | Systémy s více proměnnými | 108 |
| 5 | Druhý zákon termodynamiky | 111 |
| 5.1 | Základní idea | 111 |
| 5.2 | Termodynamické stroje | 112 |
| 5.2.1 | Cyklický stroj | 112 |
| 5.2.2 | Idea tepelného motoru | 113 |
| 5.2.3 | Idea chladničky | 114 |
| 5.2.4 | Idea tepelného čerpadla | 115 |
| 5.2.5 | Nevratné stroje | 115 |
| 5.3 | Druhý zákon termodynamiky | 116 |
| 5.4 | Carnotův cyklus | 119 |
| 5.4.1 | Hlavní idea | 119 |
| 5.4.2 | Nešlo by to jednodušeji? | 120 |
| 5.4.3 | „Složený Carnotův cyklus“ | 121 |
| 5.5 | Účinnost termodynamických strojů | 121 |
| 5.6 | Účinnost Carnotova stroje | 123 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------|------------|
| 5.6.1 | Účinnost vratného stroje | 123 |
| 5.6.2 | Účinnost nevratného stroje | 124 |
| 5.7 | Termodynamická teplota | 125 |
| 5.8 | Entropie | 127 |
| 5.8.1 | Clausiova rovnost a nerovnost | 127 |
| 5.8.2 | Zavedení entropie | 127 |
| 5.8.3 | Entropie mimo rámec termodynamiky | 128 |
| 5.8.4 | „Spojené zákony termodynamické“ | 129 |
| 5.8.5 | Souvislost kalorické a termické stavové rovnice | 130 |
| 5.8.6 | Entropie konkrétních soustav | 130 |
| 5.9 | Termodynamické energie (potenciály) | 132 |
| 5.9.1 | Energie v různých proměnných; Legendrova transformace | 132 |
| 5.9.2 | Magický čtverec | 134 |
| 5.9.3 | Gibbsovy-Helmholtzovy rovnice | 135 |
| 5.10 | Podmínky rovnováhy | 136 |
| 5.10.1 | Přechod izolovaného systému k rovnováze | 136 |
| 5.10.2 | Entropie nerovnovážného stavu | 137 |
| 5.10.3 | Podmínky rovnováhy uvnitř systému | 138 |
| 5.11 | Entropie v termodynamice a ve statistické fyzice | 139 |
| 5.12 | Návod na perpetuum mobile 2. druhu | 140 |
| 6 | Třetí zákon termodynamiky | 143 |
| 6.1 | Základní idea | 143 |
| 6.2 | Formulace třetího zákona termodynamiky | 144 |
| 6.2.1 | Nedosažitelnost absolutní nuly | 145 |
| 7 | Otevřené systémy | 147 |
| 7.1 | Základní idea | 147 |
| 7.1.1 | Základní pojmy | 147 |
| 7.1.2 | Změna množství systému | 149 |
| 7.2 | Chemický potenciál | 150 |
| 7.3 | Gibbsův paradox | 151 |
| 7.3.1 | Entropie ideálního plynu | 151 |
| 7.3.2 | Chemický potenciál dokonalého plynu | 155 |
| 7.4 | Grandkanonický potenciál Ω | 155 |
| 7.5 | Zákon působících hmot (Guldbergův-Waageův zákon) | 156 |
| 8 | Fázové přechody | 161 |
| 8.1 | Základní idea | 161 |
| 8.2 | Fázový diagram jednosložkového systému | 161 |
| 8.3 | Rovnováha v heterogenním systému | 166 |
| 8.4 | Gibbsovo fázové pravidlo | 167 |
| 8.5 | Ehrenfestova klasifikace fázových přechodů | 169 |
| 8.6 | Fázové přechody 1. druhu | 170 |

| | | |
|-----------|---------------------------------------------|------------|
| 8.6.1 | Charakteristika | 170 |
| 8.6.2 | Clausiova-Clapeyronova rovnice | 171 |
| 8.6.3 | Přehřátí a podchlazení | 172 |
| 8.7 | Spojité fázové přechody | 173 |
| 8.7.1 | Charakteristika | 173 |
| 8.7.2 | Ehrenfestovy rovnice | 173 |
| 8.8 | Jiné fázové přechody | 174 |
| 8.9 | Dvojsložková soustava; destilace | 175 |
| 9 | Základy nerovnovážné termodynamiky | 177 |
| 9.1 | Idea | 177 |
| 9.1.1 | Základní představa | 177 |
| 9.1.2 | Nové prvky v přístupu | 178 |
| 9.1.3 | Podrobnosti | 179 |
| 9.2 | Nové pojmy | 179 |
| 9.2.1 | Zobecněná síla | 179 |
| 9.2.2 | Tok, hustota toku | 180 |
| 9.2.3 | Vztah mezi zobecněnými silami a toky | 180 |
| 9.3 | Základní vztahy | 181 |
| 9.3.1 | Popis | 181 |
| 9.3.2 | Změny vnitřní a vnější | 181 |
| 9.3.3 | Rovnice kontinuity | 183 |
| 9.3.4 | Hustoty veličin | 183 |
| 9.3.5 | Produkce entropie | 183 |
| 9.4 | Lineární systémy bez paměti | 184 |
| 9.5 | Příklad: termoelektrické jevy | 185 |
| 9.5.1 | Kinetické rovnice, produkce entropie | 185 |
| 9.5.2 | Teplotná a elektrická vodivost | 186 |
| 9.5.3 | Seebeckův jev | 187 |
| 9.6 | Dodatek: Onsagerovy relace | 189 |
| 10 | Molekulová fyzika | 191 |
| 10.1 | Základní představy | 191 |
| 10.1.1 | Molekulová fyzika versus statistická fyzika | 191 |
| 10.1.2 | Mikroskopické složení látky | 192 |
| 10.2 | Trojí skupenství látky | 193 |
| 10.2.1 | Model pevné látky | 193 |
| 10.2.2 | Model kapaliny | 193 |
| 10.2.3 | Model plynu | 193 |
| 10.3 | Molekulárně kinetická teorie plynu | 194 |
| 10.3.1 | Konkrétní makroskopické veličiny | 195 |
| 10.3.2 | Brownův pohyb | 207 |
| 10.3.3 | ↔Problémy modelu ideálního plynu | 209 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 11 Základy statistické fyziky | 211 |
| 11.1 Vztah termodynamiky a statistické fyziky | 211 |
| 11.1.1 Termodynamika – shrnutí | 211 |
| 11.1.2 Statistická fyzika – shrnutí | 212 |
| 11.1.3 Klasický popis | 213 |
| 11.1.4 Semiklasický popis | 213 |
| 11.1.5 Kvantový popis | 214 |
| 11.2 Základní potřebné pojmy z klasické fyziky | 215 |
| 11.2.1 Označení | 215 |
| 11.2.2 Liouvilův teorém; invariance fázového objemu | 218 |
| 11.3 Rozdělovací funkce; ergodická hypotéza | 219 |
| 11.3.1 Rozdělovací funkce | 219 |
| 11.3.2 Středování | 220 |
| 11.3.3 Ergodická hypotéza | 221 |
| 11.4 Základní pojmy z kvantové mechaniky | 221 |
| 11.5 Přehled důležitých typů souborů | 223 |
| 11.6 Mikrokanonický soubor | 224 |
| 11.7 Kanonický soubor | 225 |
| 11.7.1 Fyzikální odvození z modelu | 225 |
| 11.7.2 Přehled užitých statistických veličin | 226 |
| 11.7.3 Vztahy mezi termodynamickými a statistickými veličinami | 227 |
| 11.7.4 Odvození výrazů pro teplo, teplotu a entropii | 229 |
| 11.8 Grandkanonický soubor | 230 |
| 11.9 Ideální plyn (M-B, B-E, F-D) | 232 |
| 11.9.1 Označení | 232 |
| 11.9.2 Kanonické rozdělení | 235 |
| 11.9.3 Grandkanonické rozdělení | 235 |
| 11.9.4 Kombinatorické odvození | 237 |
| 11.9.5 Porovnání klasického a kvantového plynu | 242 |
| 12 Aplikace statistické fyziky (RNDr. Z. Koupilová, Ph.D.) | 243 |
| 12.1 Neideální plyn – odvození stavové rovnice | 243 |
| 12.2 Fotonový plyn | 246 |
| 12.3 Degenerovaný plyn | 249 |
| 12.4 Tepelná kapacita krystalu | 252 |
| 12.4.1 Einsteinův model | 253 |
| 12.4.2 Debyeův model | 254 |
| A Potřebná matematika | 257 |
| A.1 Primitivní funkce $\int \frac{dx}{x}$ aneb matematik vs. fyzik | 257 |
| A.2 Parciální derivace: znak ∂ | 258 |
| A.3 Značení parciálních derivací | 261 |
| A.4 Derivace inverzní funkce | 263 |
| A.5 Derivace implicitní funkce | 263 |

| | | |
|-------------------|-------------------------------------------------------------|------------|
| A.6 | Totální diferenciál | 264 |
| A.7 | Pfaffova forma | 266 |
| A.8 | Geometrická představa integrability Pfaffovy formy | 267 |
| A.9 | Integrace totálního diferenciálu | 269 |
| A.10 | Úpravy termodynamických vzorců („magický čtverec“) | 273 |
| A.10.1 | Legendrova transformace v mechanice | 274 |
| A.10.2 | Geometrický význam Legendrovy transformace | 275 |
| A.11 | Některé statistické integrály | 276 |
| B | Fyzika a jazyk | 279 |
| B.1 | Základní fyzikální pojmy podle norem | 279 |
| B.1.1 | Veličina | 279 |
| B.1.2 | Děj | 280 |
| B.1.3 | Součinitel, činitel, koeficient, modul, číslo | 280 |
| B.2 | Různé konkrétní termíny | 281 |
| B.3 | Etymologie některých slov cizího původu | 285 |
| B.3.1 | Etymologie obecně | 285 |
| B.3.2 | Slova cizího původu, termíny a slovníček | 287 |
| C | Rejstřík osob | 291 |
| D | Aplikace; rozbor činnosti některých strojů | 299 |
| D.1 | Subjektivní pocit teploty | 299 |
| D.2 | Porovnávací cyklus | 300 |
| D.3 | Parní stroj: nejjednodušší schéma | 300 |
| D.4 | Realistický parní stroj | 301 |
| D.5 | Výbušný motor (čtyřtákní benzínový) | 303 |
| D.6 | Vznětový motor (Dieselův, naftový) | 305 |
| D.7 | Stroje s lázněmi konečné tepelné kapacity | 306 |
| E | Data | 307 |
| E.1 | Základní fyzikální konstanty | 307 |
| E.2 | Porovnání nejnovější teplotní stupnice t_{90} | 307 |
| E.3 | Termomechanické tabulky | 308 |
| E.3.1 | Vlastnosti některých pevných látek | 308 |
| E.3.2 | Vlastnosti některých kapalin | 308 |
| E.3.3 | Vlastnosti některých plynů | 309 |
| E.3.4 | Hustota suchého vzduchu a vody | 309 |
| E.3.5 | Teploty a měrná skupenská tepla fázových přeměn | 310 |
| E.3.6 | Molární hmotnosti M a Poissonova konstanta κ plynů | 310 |
| Literatura | | 311 |
| Rejstřík | | 317 |

Předmluva

Tato kniha vznikla podstatným přepracováním druhého vydání skript [32] (napsaných, když jsem učil budoucí učitele fyziky na UJEP v Ústí n. Labem), rozšířením a úpravou těchto skript na úvodní učebnici pro MFF UK v Praze. Poslouží však, zejména spolu se sbírkou řešených příkladů [Příkl] (podobného původu) jistě i každému jinému, kdo si chce zopakovat či rozmyslet základy termodynamiky, statistické fyziky, molekulové fyziky a jejich vzájemné souvislosti.

Omlouvám se proto čtenářům jinak orientovaným, že některé partie (třeba výklad molu na str.23) zůstaly ve slohu vhodném také pro SŠ; zploštěny ale nejsou.

Pro lepší čtivost jsou použity různé grafické úpravy:

Výroky zásadní důležitosti jsou vysázeny kurzivou a v rámečku.

Tučné písmo zdůrazňuje především nové termíny; bývá na ně odkaz v indexu.

Kurziva slouží ke zdůraznění části textu.

Partie vysázené *petitem* jsou zpravidla rozlišeny už svým úvodním znakem:

♣ Takto značíme vysvětlující poznámky a ilustrativní příklady.

↔ Takto začínají petitový odstavec při prvním čtení přeskočte. Upřesňuje probíranou látku nebo ji uvádí do souvislosti s něčím, co bude probíráno později, takže při prvním čtení nemusí být ve všem srozumitelný.

¶ Takto jsou označeny jazykové či terminologické poznámky, aby zbytečně netrhaly text. Často odkazují na jazykový dodatek (Dod. B).

Značka konst značí obecně konstantu. I těsně po sobě jdoucí značky konst mohou mít různé číselné hodnoty i fyzikální rozměry.

Fyzikální konstanty jsou zaokrouhleny; přesnější hodnoty viz Dod. E.

[7] nebo [ISO] je odkaz na literaturu na konci knížky [v hranatých závorkách].

(4.1) je odkaz na rovnici (4.1) (v kulatých závorkách).

Anglické (britské) termíny (*english terms*) jsou ve složených závorkách. (Neuvádíme mírně odlišné americké varianty typu US -zation, GB -sation; US vapor, GB vapour.)

Joule [džúl], Gibbs [gi-]: doporučená zjednodušená výslovnost [v hranatých závorkách].

U vlastních jmen uvádíme pro stručnost zpravidla jen příjmení. Plné jméno a ostatní údaje viz Dod. C.

Ke struktuře:

Dodatek A shrnuje potřebné praktické znalosti z matematiky.

Dod. B shrnuje jazykové a terminologické poznámky. Jejich zařazení přímo do textu by text tříštilo a při opakovaném čtení by čtenáře jen rozptylovalo.

Dod. C uvádí základní osobní data většiny osob zmíněných v textu knížky; další informace viz např. Wikipedie.

Dod. D je „Různé“: rozebírá jednak subjektivní vjem teploty, jednak ukazuje, jak lze užít termodynamiku při rozboru a výkladu některých známých strojů: parního, vznětového a zážehového. Rozbor strojů s lázněmi konečných kapacit je praktickou ukázkou „práce s diferenciály“.

Dod. E uvádí jednak hodnoty užitých základních konstant z nejčerstvějšího (léto 2014) zdroje CODATA [2010], jednak některé materiálové hodnoty z tabulek [20].

V celé publikaci jsem se přes veškerou snahu o čtivý styl bedlivě držel fyzikální terminologie a značení podle mezinárodních norem ISO (především [ISO]) a IEC (hlavně [IEV], dostupné coby Electropedia na webu) v jejich originální verzi i v českém překladu (jak mne zavazují mé funkce v ISO a IEC ©).

**Přeji čtenářům, aby jim studium z této učebnice bylo tak příjemné,
jako mně bylo její psaní.**

Jak bylo uvedeno, vznikla tato učebnice přepracováním skript [32], mé společné publikace se zesnulým PaedDr. Aloisem Vaňkem, PF UJEP, Katedra fyziky, Ústí n. L., jemuž vděčím především za inspiraci k sepsání oněch skript a za postřehy z jeho dlouholeté pedagogické praxe. Rád mu zde za jeho přínos vyslovuji upřímný dík. Rovněž děkuji velice RNDr. Zdeňce Koupilové, Ph.D., odborné asistentce KDF MFF UK, za technickou i didaktickou pomoc při revizi textu pro potřeby Katedry didaktiky fyziky na MFF UK. Napsala rovněž kap. 12 – Aplikace statistické fyziky.

Všem čtenářům budu vděčen za všechny kritické připomínky, které povedou ke zlepšení učebnice pro praktické používání. Děkuji předem za jejich zaslání na mou adresu –

jan.obdrzalek@mff.cuni.cz

1 Výchozí představy termodynamiky

1.1 Předmět zkoumání termodynamiky

1.1.1 Celkový rámec

Znaky ♣, ¶, ↔ viz Předmluva. A zkuste tuhle knížku číst popořadě. Víím, proč to radím.

Ve svém dosavadním studiu jste se seznámili s různými klasickými fyzikálními disciplínami; např. s mechanikou, s naukou o elektřině a magnetismu, s teorií elektromagnetického pole, s akustikou, s optikou. V každé z těchto disciplín byla svým způsobem definována extenzivní veličina zvaná **energie** a byl formulován princip jejího zachování, platný však jen za dodržení jistých podmínek.

♣ Tak např. v mechanice hmotného bodu se pro platnost zachování mechanické energie, která je součtem energie kinetické (pohybové) a potenciální (polohové), předpokládají konzervativní síly (zachovávající mechanickou energii). Naproti tomu výskyt disipativních sil (rozptylujících energií) typu tření způsobuje, že mechanické energie ubývá.

♣ V mechanice kontinua se odvozuje Bernoulliho rovnice popisující proudění kapaliny; není-li kapalina ideální, „ztrácí“ se část energie (ztrátová výška) vlivem vnitřního tření.

♣ V nauce o elektřině, resp. v klasické elektrodynamice se odvozuje vzorec nejen pro energii nabitých částic v poli, ale i pro energii samotného pole (hustota energie, hustota toku energie apod.); odvozuji se i vlnové rovnice, popisující šíření rozruchů v elektromagnetickém poli. Ukazuje se však, že v prostředí s nenulovou konečnou vodivostí σ dochází k disipaci energie pole v souvislosti s Ohmovým zákonem a se vznikem Joulova tepla – které se ovšem v rámci fenomenologické teorie pole dále nezkoumá.

↔ S teorií relativity se zde však *nesejdeme*. V našem pojetí se termodynamika zabývá výhradně soustavou v rovnováze. Ale soustava, která se vůči mně celek pohybuje (buď „jen“ rovnoměrně přímočaře), nemůže být se mnou v rovnováze. Viz též str. 17.

Ukazuje se, že energii mechanickou, tj. kinetickou a potenciální, ale i elektrickou, magnetickou, ... lze za vhodných podmínek převádět jednu na druhou. (Precizněji: existuje např. cyklický děj s piezoelektrickým krystalem, kterému dodáváme mechanickou práci a odebíráme práci elektrickou, případně obráceně – ovládním elektrického napětí na něm konáme jemný mechanický posuv.) To umožňuje zavést společný pojem **extenzivní¹ stavové¹ veličiny energie** tak, že uvedené dějové

¹ Definice různých typů veličin (stavová, technická, jmenovitá vlastnost, ...) viz Dod. B.1.1.

veličiny – „formy energie“ – jsou jejími speciálními druhy.

Termodynamika, která je rovněž součástí klasické fyziky, navazuje na všechny předchozí vědy, ale navíc k nim přejímá z experimentální zkušenosti nový způsob přenosu energie, totiž *přenos tepla*, a popisuje *dějovou* veličinu *teplo* (první zákon termodynamiky). Přitom vyvozuje další fyzikální důsledky: zejména zavádí stavovou veličinu *teplotu* (nulový² zákon empirickou teplotu coby technickou¹ veličinu, poté druhý zákon zavede obvyklou termodynamickou teplotu) a stavovou veličinu *entropii* (druhý a třetí zákon). Tímto rozšířením umožňuje termodynamika mj. formulovat (jako první zákon) princip zachování energie, nyní už univerzálně platný, působící jako jednotící pojítko mezi všemi odvětvími klasické fyziky. Termodynamika tím fakticky završuje výstavbu klasické fyziky. Dále, zavedením entropie je určen směr toku času (který by v klasické mechanice i elektrodynamice mohl též téct opačným směrem). Konečně třetí zákon termodynamiky určuje počátek odečítání entropie i všech energií, které do té doby byly zavedeny jen svým přírůstkem. ↔ Po zavedení teploty se např. zjišťuje, že prakticky všechny materiálové konstanty známé z mechaniky, elektrodynamiky, optiky, akustiky apod. jsou závislé na teplotě; tyto závislosti pak určují termickou stavovou rovnici daného materiálu, viz kap. 4.1.1.

1.1.2 Teplo, teplota, entropie

První dvě slova známe z běžného jazyka: dítě má *teplotu* (= zvýšenou), sálá z něj *teplo*. Zhruba v těchto smyslech je přejímá i termodynamika; jejich význam ovšem precizuje a – zejména u tepla – zužuje.

Teplo

Čerstvá voda steklá z ledovce naší ruku mrazí, po chvíli odstátí v místnosti už jen studí. Tutéž vodu můžeme dále na vařiči ohřívat; zpočátku je vlažná, poté hřeje a zakrátko je lepší přestat se zkoušením, protože by nás opařila – je vařící. Její mechanické vlastnosti (objem, hustota) i elektromagnetické a optické (barva, průzračnost, index lomu, vodivost, permitivita, ...) se přitom změnily jen minimálně; přesto se studená a horká voda výrazně liší vlastností, kterou nazveme **teplota**³.

Pocit naší ruky (v jistém rozmezí a s jistou přesností) nám určí, zda mají předměty teplotu stejnou nebo různou. Různé teploty navíc můžeme uspořádat do stupnice, jejíhož slovního vyjádření jsme užili v prvních dvou větách. Fyzika, jakožto exaktní věda, chce ovšem jevy popsat nejen kvalitativně (co do jakosti), ale i pokud možno také kvantitativně, tedy chce veličiny také *měřit*; nějakou míru na teplotu budeme muset dříve nebo později stanovit, abychom mohli své zkušenosti předávat i jiným lidem. Zatím nám k tomu účelu poslouží zcela libovolné očíslování, jaké známe např. ze rtuťového teploměru; takovému údaji říkáme **empirická teplota**,

² Nedivte se pak, že zákony termodynamiky nejsou tři, ale čtyři. Jako Tři mušketýři.

³ Její hodnoty jsme zatím definovali slovně, je to tedy zatím *imenovitá vlastnost*, Dod. B.1.1

chceme-li zdůraznit libovolnost⁴ volby očíslování.

Poznámka k subjektivnímu pocitu teploty viz kap. D.1.

Charakteristická vlastnost (atribut) teploty je přesně formulována nultým zákonem termodynamickým, viz kap. 2.3; prozatím jen lapidárně řečeno:

*Je-li soustava v úplné rovnováze, lze jí přiřadit teplotu.
Jsou-li dvě soustavy navzájem v rovnováze, mají stejnou teplotu.*

↔ Teplota souvisí sice s kinetickou energií mikročástic tvořících soustavu, ale u každé látky jinak.

Teplo

Teplota vody z ledovce se zvýšila, ať už prostým stáním v místnosti nebo na vařiči. Snadno nahlédneme, že důvody byly v obou případech stejné, totiž kontakt s jiným předmětem (okolním vzduchem, žhavým hořícím plamenem svítiplynu, topnou spirálou), který měl teplotu vyšší. Jak později rozebereme, energie vody při tom vzrostla. Takový přenos energie, rozdílný od dosud známých (konání práce), nazýváme **přenos tepla** a energii přenesenou touto cestou nazýváme stručně **teplo**.

Pro měření tepla nemusíme zavádět novou jednotku. Teplo je totiž energie (přenesená jistým způsobem), takže ho měříme v joulech, J [džúl].

↔ Přenos tepla probíhá úplně každým prostředím, ba i vakuem: elektromagnetické vlnění je též schopno zprostředkovat přenos energie jak typu práce (monochromatická vlna), tak i typu tepla (zařzení černého tělesa).

Entropie

Entropie se na SŠ běžně nezavádí, ačkoli pojem sám není obtížnější na pochopení než např. energie.

Na úrovni fenomenologické – v termodynamice – je entropie extenzivní stavovou veličinou definovanou pro každou soustavu ve stavu rovnováhy, a i pro mnohý stav nerovnovážný. Její základní vlastností je, že je aditivní a že při samovolných nevratných dějích roste, při vratných se nemění. (To stačí pro definici *empirické entropie*, podobně jako jsme právě zavedli empirickou teplotu). Zavedení „opravdové“ entropie S a teploty T , resp. jejich výběr z možných empirických veličin, vyžaduje, aby byly definovány co nejobecněji (bez vazby na konkrétní náhodně zvolené materiály) a aby byly spojeny s přenosem Q tepla za teploty T vztahem

$$Q \leq T\Delta S \quad , \quad (1.1)$$

kde rovnost platí pro proces vratný, nerovnost pro nevratný. Viz 2. zákon termodynamiky.

⁴ Empirická teplota je tedy *technickou* neboli *řadovou veličinou*, Dod. B.1.1.

↔ Na úrovni mikroskopické: každý makrostav lze realizovat obrovským počtem N navzájem různých mikrostavů; entropie je úměrná logaritmu tohoto počtu, $S \sim \ln N$. Protože pravděpodobnost stavu je tím vyšší, čím je větší N a protože pravděpodobnost je multiplikativní, je zřejmě S aditivní. Tato úvaha naznačuje, proč větší entropie vyjadřuje větší makroskopickou pravděpodobnost stavu a mikroskopicky „větší chaos“, čímž je v souladu s denní zkušeností, že v okolí rovnováhy chaos zpravidla samovolně roste (odmyslíme-li si samovolně se udržující či organizující soustavy, které – jsou-li živé – jsou úplně rovnováze velmi vzdálené).

1.1.3 Vymezení termodynamiky

Termodynamika se zabývá rovnovážnými stavy, a to makroskopicky a fenomenologicky. Klíčové nové pojmy jsou teplo, teplota a entropie.

Takové vymezení je snad rozumným kompromisem mezi stručností a výstižností. Dále k tomu uvedeme ještě několik poznámek a vysvětlení.

Úlohy typické pro termodynamiku jsou tohoto typu:

Soustava S v rovnováze je rozdělena stěnami a působí na ni známé vnější vlivy; je ve stavu S_i {initial}. Jaký rovnovážný stav S_f {final} se ustálí poté, co

- některé vnitřní stěny odstraníme? (a umožníme tím mezi jednotlivými částmi soustavy vyměňovat částice a energii)
- některé stěny posuneme? (a vyměníme tím mezi soustavou a okolím energii)
- některé vnější vlivy změním? (a vyměníme tím mezi soustavou a okolím energii)
- některé vnější stěny odstraníme? (a umožníme tím mezi soustavou a okolím vyměňovat částice a energii)

Několik poznámek:

- **Fenomenologický přístup** je ten, který se omezuje jen na popis a výklad, a to jen na úrovni daných jevů, a nikoli hlouběji. Nezahrnuje tedy výklad či vysvětlení těchto jevů samotných. Termodynamika pouze konstatuje přenos tepla a vyvozuje z něj další důsledky. (Modelem přenosu tepla jakožto neuspořádaného přenosu energie molekul se zabývá molekulová fyzika.) Označení vědy za fenomenologickou je pochopitelně relativní, protože výklad jakéhokoliv jevu fakticky znamená konečnou jeho převedení na důsledky jiných jevů, které bereme jako známé.
- Studium rovnovážných stavů by se mělo spíše nazývat „termostatikou“. (Podobně se totiž rozlišuje statika od dynamiky, resp. elektrostatika od elektrodynamiky, viz kap. 1.2.6.) Název „termodynamika“ je však historicky ustálený a není rozumné chtít ho změnit. Chceme-li zdůraznit zájem o jiné stavy než statické a jiné děje než kvazistatické, mluvíme např. o **nerovnovážné termodynamice** (Přesněji řečeno, jde o stacionární děje.).
- Jak napovídá jméno „termodynamika“, půjde zejména o děje spojené s jevy jako je přenos tepla, závislost veličin na teplotě apod. Celý obzor termodynamiky je však podstatně širší, zahrnuje např. i fázové přechody, chemické rovnováhy aj.