

# MOLEKULOVÁ FYZIKA A TERMODYNAMIKA PRO ZAHRANIČNÍ STUDENTY

Zdeněk Pressl

## Molekulová fyzika a termodynamika pro zahraniční studenty

Zdeněk Pressl

Recenzovali:

prof. Ing. Stanislav Pekárek, CSc.

RNDr. Martin Melcer, Ph.D.



**Financováno  
Evropskou unií**  
NextGenerationEU



**Národní  
plán  
obnovy**



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Publikace byla vydána za podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy a Národního plánu obnovy v rámci projektu Transformace pro VŠ na UK (reg. č. NPO\_UK\_MSMT-16602/2022).

Vydala Univerzita Karlova  
Nakladatelství Karolinum  
Praha 2022  
První vydání

© Univerzita Karlova, 2022

© Zdenek Pressl, 2022

ISBN 978-80-246-4543-8

ISBN 978-80-246-4675-6 (online : pdf)



Charles University  
Karolinum Press

[www.karolinum.cz](http://www.karolinum.cz)  
[ebooks@karolinum.cz](mailto:ebooks@karolinum.cz)

# Obsah

Předmluva .....	5
1 Základní poznatky molekulové fyziky a termodynamiky .....	7
1.1 Kinetická teorie stavby látek .....	7
1.1.1 Složení látek .....	7
1.1.2 Pohyb částic .....	7
1.1.3 Síly mezi částicemi .....	9
1.2 Látkové množství .....	12
1.2.1 Rozměry a hmotnosti molekul .....	12
1.2.2 Avogadrova konstanta .....	13
1.2.3 Molární veličiny .....	14
2 Vnitřní energie, teplo .....	17
2.1 Změna vnitřní energie .....	17
2.1.1 Změna vnitřní energie při tepelné výměně, teplo .....	17
2.1.2 Změna vnitřní energie při konání práce .....	19
2.1.3 První termodynamický zákon .....	19
2.2 Teplota .....	22
2.2.1 Celsiova teplotní stupnice .....	22
2.2.2 Termodynamická teplota .....	22
2.2.3 Měření teploty, teploměry .....	24
2.3 Měrná tepelná kapacita .....	28
2.4 Kalorimetrická rovnice .....	31
2.5 Sdílení tepla .....	33
2.5.1 Sdílení tepla vedením .....	34
2.5.2 Sdílení tepla prouděním .....	36
2.5.3 Sdílení tepla zářením .....	36
3 Skupenství látek .....	39
3.1 Plyny .....	39
3.2 Pevné látky .....	39
3.3 Kapaliny .....	39
3.4 Plazma .....	40
4 Plyny .....	41
4.1 Ideální plyn .....	41
4.2 Rychlosti molekul plynu .....	42
4.3 Stavová rovnice pro ideální plyn .....	46
4.4 Tepelné děje v plynech .....	50
4.4.1 Izotermický děj .....	50
4.4.2 Izobarický děj .....	51
4.4.3 Izochorický děj .....	52
4.4.4 Adiabatický děj .....	54
4.5 Reálný plyn .....	56
4.6 Práce plynu .....	57
4.6.1 Práce plynu při izobarickém ději .....	57

4.6.2	Práce plynu při izochorickém ději	58
4.6.3	Práce plynu při izotermickém ději	58
4.6.4	Práce plynu při adiabatickém ději	59
4.6.5	Kruhový děj	60
5	Pevné látky	64
5.1	Struktura pevných látek	64
5.2	Hlavní typy vazeb v pevných látkách	66
5.3	Deformace	67
5.3.1	Typy deformací	67
5.3.2	Deformace tahem	69
5.3.3	Pevnost v tahu	70
5.4	Teplotní roztažnost pevných látek	72
5.4.1	Teplotní délková roztažnost pevných látek	73
5.4.2	Teplotní objemová roztažnost pevných látek	74
5.4.3	Teplotní roztažnost pevných látek v praxi	75
5.4.4	Teplotní změna hustoty	75
6	Kapaliny	78
6.1	Povrchová vrstva kapaliny	78
6.2	Kapilarita	78
6.3	Teplotní objemová roztažnost kapalin	79
7	Změny skupenství látek	82
7.1	Tání a tuhnutí	82
7.2	Sublimace	86
7.3	Vypařování a kondenzace	87
7.4	Sytá pára	88
7.5	Var kapaliny	90
7.6	Fázový diagram	91
7.7	Vlhkost vzduchu	93
7.7.1	Absolutní vlhkost vzduchu	93
7.7.2	Relativní vlhkost vzduchu	93
	Seznam použitých termínů a některých slov	95

## P ř e d m l u v a

Skriptum *Molekulová fyzika a termodynamika pro zahraniční studenty* je v pořadí druhým ze souboru fyzikálních skript pro zahraniční studenty studující na Ústavu jazykové a odborné přípravy Univerzity Karlovy. Po stránce jazykové i fyzikální navazuje na úvodní učební text *Mechanika pro zahraniční studenty* a dále rozvíjí a rozšiřuje fyzikální poznatky v něm uvedené.

*Molekulová fyzika a termodynamika pro zahraniční studenty* obsahuje učivo, které odpovídá učivu českých středních škol, zejména gymnázií, obsahem i rozsahem je však přizpůsobeno jednoroční jazykové a odborné přípravě zahraničních studentů. S učebnicí začínají studenti pracovat na konci 1. nebo na začátku 2. semestru, kdy už ovládají základní českou gramatiku a jejich slovní zásoba jim umožňuje orientovat se v průměrně náročném odborném textu. Nová slova jsou uvedena v podtextovém slovníku na závěr každé hlavní kapitoly. Slova jsou uspořádána v pořadí, ve kterém se vyskytují v textu, nikoli abecedně. Abecední seznam nových slov je uveden na konci skriptu společně s číslem kapitoly prvního výskytu tohoto slova. Dále jsou na konci každé hlavní kapitoly otázky a příklady k procvičování. Do některých kapitol jsou zařazeny řešené ilustrační příklady.

Učebnice má sloužit zahraničním studentům s nižší úrovní předchozích znalostí z fyziky i těm, kteří ze své vlasti přijeli velmi dobře odborně připraveni. Proto byl při tvorbě učebnice kladen velký důraz na logickou stavbu textu a na návaznost kapitol. Pochopení problematiky usnadňuje řada obrázků. Některé velmi náročné partie, které by neměly být předmětem studia slabších studentů, jsou při levém okraji textu označeny svislou čarou. Doporučuje se však seznámit s obsahem těchto kapitol studenty s dobrou předchozí přípravou, a to zvláště pro zvýšení motivace těchto studentů ke studiu fyziky.

Závěrem chci poděkovat RNDr. Martinu Melcerovi, Ph.D., ze střediska jazykové a odborné přípravy ÚJOP UK v Poděbradech a prof. Ing. Stanislavu Pekárkovi, CSc., z elektrotechnické fakulty ČVUT za odbornou recenzi. V neposlední řadě děkuji dalším učitelům fyziky na střediscích ÚJOP UK za další drobné podněty, jimiž bylo doplněno toto skriptum.

Praha, září 2020

Autor



# 1 Základní poznatky molekulové fyziky a termodynamiky

Molekulová fyzika a termodynamika jsou dvě důležité části současné moderní fyziky. Molekulová fyzika je vědní obor, který studuje vlastnosti látek a fyzikální jevy na základě částicové struktury látek. Termodynamika studuje látky bez použití představ o vnitřní struktuře látek. Vychází jen z popisu jevů a z měření veličin.

Například tlak plynu vysvětlujeme v molekulové fyzice jako důsledek pohybu částic. V termodynamice studujeme tlak plynu jako funkci objemu a teploty plynu a nezajímáme se o strukturu plynu.

Molekulová fyzika a termodynamika se při studiu fyzikálních jevů a vlastností látek vzájemně podporují a doplňují.

## 1.1 Kinetická teorie stavby látek

Kinetická teorie stavby látek je fyzikální obor, který studuje vlastnosti látek a fyzikální jevy na základě představy, že látka je složena z velkého počtu částic. Je základem molekulové fyziky.

Kinetická teorie stavby látek je založena na třech základních poznacích, které můžeme experimentálně ověřit:

1. Látky se skládají z částic.
2. Částice se pohybují.
3. Mezi částicemi existují síly.

### 1.1.1 Složení látek

Všechny látky se skládají z částic – z atomů (He, Hg, C), z elektricky neutrálních molekul ( $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $SiO_2$ ) nebo z iontů (NaCl). Tyto částice mají určité vzájemné vzdálenosti a v prostoru mezi nimi žádná jiná látka není. Říkáme, že látky mají nespojitou (nemají spojitou) strukturu.

### 1.1.2 Pohyb částic

Částice se v látce neustále pohybují. V plynech a v kapalinách je jejich pohyb chaotický (neuspořádaný). V pevných látkách částice konají kmitavý pohyb kolem své rovnovážné polohy. Víceatomové molekuly konají ještě vlastní kmitavý pohyb a rotují. Např. molekula kyslíku  $O_2$  ve vzduchu koná chaotický posuvný pohyb, otáčivý pohyb (molekula rotuje) a kmitavý pohyb (atomy molekuly se periodicky navzájem přibližují a opět vzdalují). Všechny tyto tři pohyby koná molekula současně. Každý směr pohybu částice v látce je možný, každý směr je stejně pravděpodobný. Žádný směr pohybu částice v látce nepřevládá.

Rychlosti částic mají různou orientaci a různou velikost. Průměrná velikost rychlosti částic závisí na teplotě látky. Proto se tato forma pohybu nazývá **tepelný pohyb**.

Pohyb částic v látce potvrzují např. tyto jevy:

### a) Difúze

Difúze je pronikání molekul jedné látky mezi molekuly jiné látky.

Pro sledování difúze provedeme tento pokus: Do skleněné nádoby s vodou dáme trochu hypermanganu (manganistanu draselného  $\text{KMnO}_4$ ). Hypermangan klesne ke dnu a pomalu se rozpouští. U dna nádoby vznikne červeně zbarvený roztok, jeho hranice s vodou postupně stoupá k hladině a po několika dnech má voda v nádobě homogenní červené zbarvení, i když ji nikdo nezamíchal.

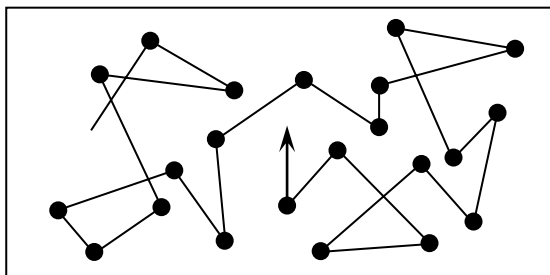
Difúzi můžeme vysvětlit jen neustálým a neuspořádaným pohybem částic. Difúze probíhá rychleji při vyšší teplotě, protože rychlost částic roste s teplotou.

### b) Tlak plynu

V nádobě je uzavřen plyn. Neustálý pohyb molekul plynu způsobuje neustálé nárazy molekul na vnitřní stěny nádoby (nebo na povrch libovolného tělesa, které se v plynu nachází). Při odrazu molekuly od stěny nádoby musí stěna působit na molekulu určitou silou, protože dochází ke změně hybnosti této molekuly (impuls síly = změna hybnosti – viz Mechanika pro zahraniční studenty, kapitola 3.3). Odrazy molekul od stěny nádoby jsou příčinou tlakové síly  $F$  plynu na určitou plochu  $S$ . Tlak plynu  $p$  potom vypočítáme podle známého vzorce  $p = \frac{F}{S}$ .

### c) Brownův pohyb

Brownův pohyb patří mezi nejdůležitější důkazy chaotického a neustálého pohybu částic v kapalinách nebo v plynech. Tento pohyb můžeme dobře pozorovat mikroskopem: Na sklo dáme kapku zředěné černé tuše a pozorujeme při dostatečně velkém zvětšení. Vidíme, že každá částice tuše vykonává neustálý chaotický pohyb (obr. 1-1).



Obr. 1-1 Brownův pohyb – dráha jedné částice

Brownův pohyb vysvětlujeme jako důsledek pohybu molekul prostředí. Molekuly prostředí narážejí na Brownovu částici z různých směrů a odrážejí se od ní. Je-li částice dostatečně malá, dostává od molekul prostředí tak velkou rychlost, že pod mikroskopem

můžeme pozorovat poměrně velké (vzhledem k velikosti částice) posunutí. Platí zde zákon zachování hybnosti.

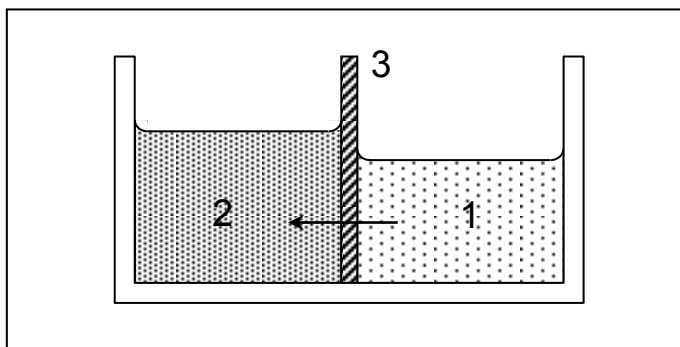
Je-li částice příliš velká, naráží na ni z různých směrů velký počet molekul. Jejich silové působení se ruší a pohyb částice nemůžeme pozorovat. I kdyby na velkou částici narazila v jednom okamžiku jen jedna molekula prostředí, je díky velké hmotnosti částice posunutí tak malé, že je její pohyb nepozorovatelný.

Pokusy ukazují, že rychlost Brownovy částice roste s rostoucí teplotou prostředí. Proto se tento chaotický pohyb částic také nazývá **tepelný pohyb**.

#### d) Osmóza

Existují pevné látky, kterými mohou pronikat (procházet) molekuly kapaliny nebo molekuly některých rozpuštěných solí. Taková pevná látka se jmenuje polopropustná stěna nebo polopropustná blána. Jev, při kterém polopropustnou blánou pronikají molekuly kapaliny z jednoho prostředí do druhého, se nazývá osmóza. Polopropustné materiály jsou např. pergamen nebo buněčná blána (stěna buňky).

Na obr. 1-2 je nádoba rozdělená na dvě části polopropustnou stěnou (3). Šipka znázorňuje pohyb molekul kapaliny z méně koncentrovaného roztoku (1) do roztoku s větší koncentrací (2) rozpuštěných solí. Na konci osmózy nastane osmotická rovnováha.



Obr. 1-2 Osmóza

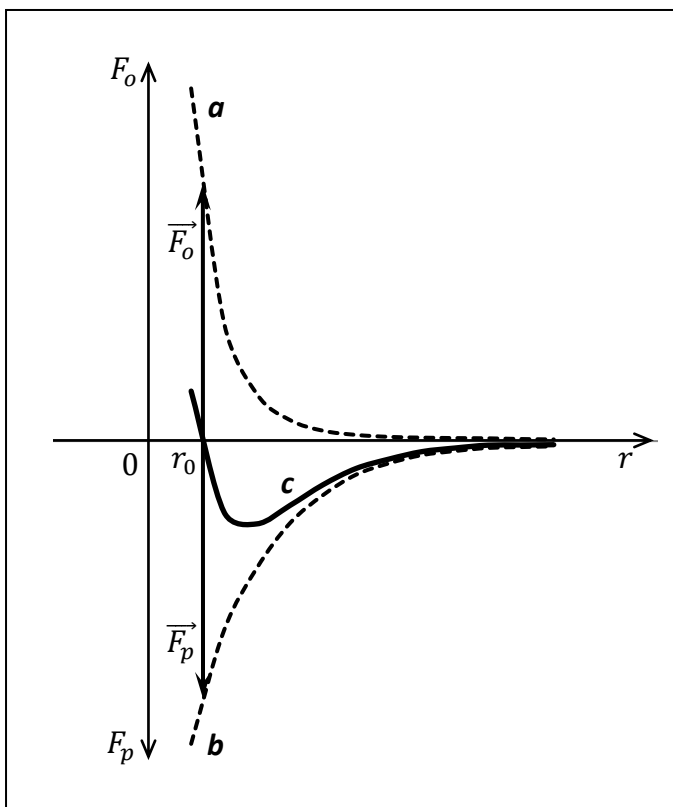
Osmóza je velmi důležitý jev. Využívají ho rostliny a živočichové při hospodaření s vodou a se solemi. Pomocí osmózy lze vysvětlit, proč většina mořských ryb nemůže žít ve sladké vodě a naopak.

Opačný proces se nazývá **reverzní osmóza**. Nastane v případě, kdy na hladinu roztoku (2) s větší koncentrací působíme velkým tlakem. Potom molekuly kapaliny procházejí polopropustnou stěnou směrem z větší koncentrace (2) do menší (1). Tímto způsobem lze vyrábět např. z mořské vody vodu bez solí, tedy vodu sladkou.

### 1.1.3 Síly mezi částicemi

Mezi každými dvěma částicemi v látce existují současně přitažlivé a odpuzivé síly. Na obr. 1-3 je graf závislosti síly mezi dvěma částicemi na jejich vzájemné vzdálenosti.

Když přibližujeme částice k sobě, odpudivá síla  $\vec{F}_o$  (křivka *a*) velmi rychle roste. Roste mnohem rychleji než síla přitažlivá  $\vec{F}_p$  (křivka *b*). Když vzdalujeme částice od sebe, odpudivá síla rychle klesne téměř na nulovou hodnotu a převládá síla přitažlivá. Výslednou sílu mezi částicemi dostaneme jako vektorový součet přitažlivé a odpudivé síly. Závislost výsledné síly mezi částicemi na jejich vzdálenosti znázorňuje křivka *c*.



Obr. 1-3 Síly mezi částicemi

Existuje právě jedna vzdálenost  $r_0$ , ve které se velikost přitažlivé síly rovná velikosti odpudivé síly. Pro vzdálenost  $r_0$  platí  $|\vec{F}_p| = |\vec{F}_o|$ . Ve vzdálenosti  $r_0$  je výsledná síla na každou částici nulová a částice jsou navzájem v rovnovážné poloze. V rovnovážné poloze však částice nikdy nezůstávají z důvodu tepelného pohybu.

Když se dvě částice přiblíží na vzdálenost menší než  $r_0$ , odpudivá síla je vrací zpět. Bude-li vzdálenost větší než  $r_0$ , převládá přitažlivá síla a částice se opět vrací do rovnovážné polohy. Účinek přitažlivé síly se ale s rostoucí vzdáleností rychle zmenšuje. Proto na každou částici v látce působí jen nejbližší částice v jejím okolí.

Protože existuje vzájemné silové působení mezi částicemi, má každá soustava částic potenciální energii. Graf závislosti potenciální energie  $E_p$  soustavy dvou částic na jejich vzájemné vzdálenosti je na obr. 1-4.

Potenciální energie je relativní veličina. Proto bylo určeno, že potenciální energie soustavy dvou částic je nulová, když jsou tyto částice nekonečně daleko ( $r \rightarrow \infty$ ).