

# Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

*redakce nakladatelství BEN – technická literatura*  
[redakce@ben.cz](mailto:redakce@ben.cz)



# Informace a organizace

Jak již bylo několikrát řečeno, pokud systém vykazuje organizaci, pak obsahuje informaci. Protože organizace odráží uspořádání podstatných částí systému a protože uspořádanost je opakem neuspořádanosti, je samozřejmé, že informace a neuspořádanost jsou v převráceném vztahu: Čím je systém neuspořádanější, tím menší má informační obsah.

S představou neuspořádanosti souvisí termodynamický pojem pravděpodobnosti. V tradičních termodynamických systémech obecně platí, že čím blíže k rovnováze, tím více neuspořádaný systém a tím pravděpodobnější stav. Proto na jedné straně mají vlastnosti neuspořádanosti, pravděpodobnosti a nedostatku informace tendenci jít spolu ruku v ruce, zatímco na druhé straně korelují organizace, nepravděpodobnost a informace.

Termodynamická pravděpodobnost souvisí s entropií a z předcházející věty vyplývá, že vysoce neuspořádanému, tj. velmi pravděpodobnému stavu odpovídá vysoká entropie<sup>\*)</sup>, zatímco organizovanému stavu s vysokou informací odpovídá nízká entropie.

Zorganizování systému, tj. vyvedení systému z rovnovážného stavu do méně neuspořádaného stavu, vyžaduje práci. Informační obsah systému může být proto vztahen k množství práce potřebné k jeho vytvoření. „Užitečná“ práce je zde definována jako práce, která *snižuje* entropii vesmíru oproti např. pouhému zahřátí plynu. Užitečná práce vykonaná na systému většinou zvyšuje jeho termodynamickou nepravděpodobnost a zvyšuje jeho organizaci. Aplikace užitečné práce představuje jednu z cest jak zvýšit informační obsah systému. Víme ze zkušenosti, že všechny systémy, na něž je vynakládána užitečná práce, mění svou entropii a organizaci. Tudíž práce způsobuje změny v informačním obsahu systému – tento vztah bude prozkoumán podrobně v kapitole 7. Tato kapitola se zaměří na přesný vztah mezi změnami v entropii a změnami v informaci.

## Druhý zákon termodynamiky

Druhý zákon termodynamiky předpokládá, že pro každý systém existuje rovnovážný stav, k němuž se systém pohybuje spontánně, a naopak, pokud existuje změna v systému *směrem od* rovnovážného stavu, může se to dít pouze na úkor přemístování jiného systému směrem k rovnováze. Pohybuje-li se takový systém v daném směru proti spojitě působící síle, která má tendenci obrátit směr

---

<sup>\*)</sup> Tento inverzní vztah mezi informací a entropií je protikladný k tomu, který navrhl Claude Shannon. Toto téma bude podrobně probráno v kapitole 5. (Pozn. autora.)

jeho pohybu, může být systém přinucen konat užitečnou práci. Je možné zjistit maximum užitečné práce, kterou lze získat z takového systému. Tato změna je označována jako *změna volné energie* a označuje se symbolem  $\Delta F$  popř.  $\Delta G$ . Velikost  $\Delta G$  udává maximální množství práce, která může být získána ze systému při libovolném souboru podmínek.

### **Druhý zákon termodynamiky je často vyjadřován ve tvaru:**

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (3.1)$$

kde  $\Delta H$  je změna „entalpie“, tj. změna obsahu tepla při konstantním tlaku,  $T$  je absolutní teplota a  $\Delta S$  je změna „entropie“.

Entropie je jedním z nejhůře vytvořených pojmů, se kterým se můžeme ve fyzice a inženýrských vědách střetnout. Pro studenta, vstupujícího na pole vědy nebo inženýrství, není příliš těžké pochopit pojmy spojené s  $\Delta G$ ,  $\Delta H$  nebo  $T$ : *změna volné energie* představuje maximum získatelné užitečné práce, *změna tepelného obsahu* systému je výsledkem absorbované (nebo odejmuté) energie a absolutní teplota se zdá být mírou tepelného obsahu systému \*).

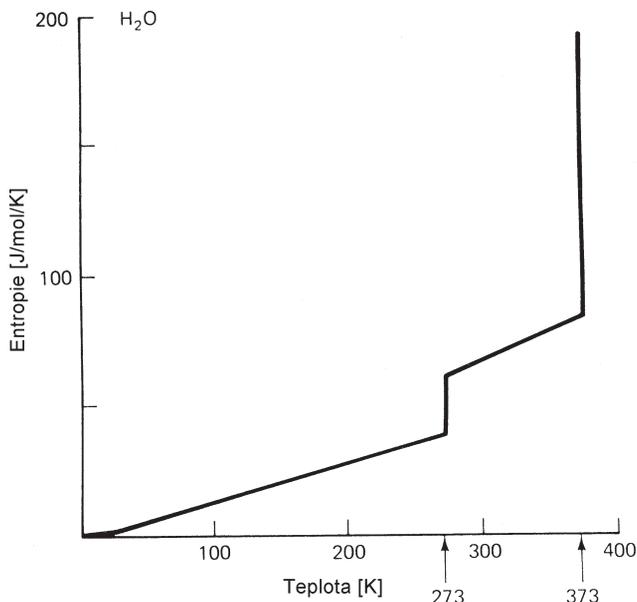
Až na výjimku ve vztahu mezi teplem a teplotou, která je často zastírána, vše dává smysl. Entropie se objevuje jako abstraktní matematická veličina, jejíž fyzikální realitu není možné zviditelnit. Ani skutečnost, že změny v entropii mohou být přesně měřitelné, nesejme roušku z tajemství. Na rozdíl od tepla, které může být také přesně měřeno, není entropie vnímatelná našimi smysly. Entropie stojí mimo oblast našich přímých zkušeností a tak zaráží všechny ty, kteří nejsou schopni nebo nechtějí uvěřit v realitu matematických abstrakcí.

Entropie je vlastně matematický výraz popisující neuspořádanost. Není výrazem tepelného obsahu nebo jeho míry – teploty, avšak souvisí s oběma.

Že je entropie spíše funkcí organizace systému než jenom funkcí jeho tepelného obsahu (teploty), ilustruje *obr. 3.1*, který zobrazuje vztah mezi entropií a teplotou vody \*\*). I když větší část křivky ukazuje na přímou závislost mezi teplotou a entropií, tj. když se zvýší teplota, zvýší se i entropie, existují zde dvě velké nespojitosti: jedna okolo 273 K, druhá na 373 K. To jsou ovšem teploty, při nichž taje led a voda se mění v páru.

\*) Teplota vlastně měří tepelný obsah na jednotku hmoty. Pokud se ukáže, že základní myšlenka informační fyziky je správná, pak je teplota přímou mírou tepelného obsahu systému. „Latentní teplo“ nebo teplo krystalizace představuje veličiny, které souvisí nikoli s energií, ale s informací. Latentní teplo je energie, kterou je nutno přidat nebo odebrat, aby se hmota změnila z jednoho stavu uspořádání do jiného. Tato problematika je probírána v následující kapitole. (Pozn. autora.)

\*\*\*) Autor je zavázán panu D. Kaoukisovi za provedení počítačového zobrazení tohoto grafu. (Pozn. autora.)



**Obr. 3.1** Vztah mezi teplotou vody a její entropií

To, že tyto dramatické nárůsty entropie, tyto zřejmé nespojitosti, se objevují přesně při těchto teplotách, kdy můžeme na vlastní oči vidět takovou hlubokou změnu ve struktuře hmoty (v tomto případě vody), není pouze náhodná shoda.

Dalším zkoumáním *obr. 3.1* si potvrdíme, že entropie musí být funkcí neorganizovanosti nebo neuspořádanosti, protože koreluje s rostoucím náhodným pohybem molekul vody. Je to tato vzrůstající náhodnost pohybu, která občas vedla ke zdání, že entropie je přímou funkcí tepelného obsahu. Ohřívání hmotného tělesa způsobuje, že částice, z nichž se systém skládá, vibrují a náhodně se pohybují se vzrůstající rychlostí. Ovšem takovýto proces vede ne k jednomu, ale ke dvěma jevům: ke vzrůstu energetického obsahu systému, měřitelnému jako vzrůst teploty a k poklesu uspořádanosti systému, měřitelnému jako vzrůst entropie. Ačkoli tyto dvě veličiny jdou často ruku v ruce, představují dva zcela odlišné procesy. To se jasně projeví, když porovnáme změny v entropii se změnami teploty v těch oblastech, kde se odehrávají důležité změny ve struktuře hmoty: velká změna entropie může být doprovázena nulovou změnou teploty.

Změna entropie může být proto způsobena nejen změnou tepelného obsahu systému, ale také změnou jeho organizace: můžeme dezorganizovat systém působením tepla tak, jako se např. kostka ledu roztaví *odejmutím tepla* svému okolí. Obdobně můžeme dezorganizovat systém změnou jeho struktury, jako např. rozpuštěním kostky cukru ve vodě. Poznamenejme, že v tomto druhém případě, rozpouštějící se kostka cukru *uvolňuje teplo* do svého okolí.

V souladu se základním postulátem, že organizace je odrazem informačního obsahu systému, můžeme vyslovit následující teorém:

*Entropie systému může být měněna buď změnou tepelného obsahu, nebo změnou organizace systému. Obojí má za následek změnu informačního obsahu dotyčného systému.*

## Boltzmanova-Schrödingerova rovnice

Pokud vzrůst entropie představuje ztrátu organizace, tj. ztrátu informace o struktuře, jaký je pak přesný vztah mezi entropií a informací? Abychom mohli dále probádat tyto obecné představy, začněme s některými zajímavými myšlenkami, se kterými přišel před více než čtyřiceti lety Erwin Schrödinger ve své knize *What is Life?* [32]. Na základě Boltzmanových objevů uvažoval Schrödinger statistický význam entropie.

### **Boltzmanova rovnice tak, jak ji uvedl Schrödinger zní:**

$$\text{entropie} = k \log D \quad (3.2)$$

kde  $k$  je Boltzmanova konstanta  $3,2983 \cdot 10^{-24}$  cal/deg a  $D$  je „kvantitativním měřítkem atomické neuspořádanosti zkoumaného objektu“.

Schrödinger jde ještě dál a tvrdí, že neuspořádanost  $D$  odráží „částečně tepelný pohyb, částečně pohyb, který spočívá v tom, že se náhodně smíchají různé typy atomů a molekul místo toho, aby zůstaly pěkně odděleny, např. molekuly cukru a vody“. Tj. postupné pronikání cukru hmotou kapaliny (jako např. v šálku čaje) představuje nárůst neuspořádanosti  $D$ . Podobně, „přidání tepla zvyšuje zmatek tepelného pohybu“, a proto zvyšuje neuspořádanost  $D$ . Schrödinger zvláště zdůrazňuje, že když roztavíme krystal, „zničíme krásné a stálé uspořádání atomů a molekul a změníme krystalickou mřížku na trvale se měnící náhodné uspořádání“.

Podtitul Schrödingerovy knihy je Fyzikální aspekty živých buněk. Kromě dalších otázek by Schrödinger rád věděl, jak vyjádřit pomocí statistických výrazů tendenci živých systémů udržovat tak nízké úrovně entropie. Nabízí hypotézu, že živé organizmy „se živí negativní entropií“. Argumentuje tím, že pokud  $D$  je mírou neuspořádanosti, pak převrácená hodnota  $1/D$  může být považována za přímé měřítko uspořádanosti.

### **Proto formuluje Boltzmanovu rovnici následujícím způsobem:**

$$-(\text{entropie}) = k \log (1/D) \quad (3.3)$$

Jinými slovy: „Entropie uvažovaná se záporným znaménkem je sama o sobě mírou uspořádanosti“. Tímto způsobem Schrödinger vysvětluje, jak organizmus udržuje svou nízkou hladinu entropie. Provádí to tak, že „vysává uspořádanost ze svého okolí“.

## Informace jako inverzní exponenciální funkce entropie

Naším východiskem budiž Schrödingerova rovnice (3.3).

### Začneme dvěma Schrödingerovými předpoklady:

1. Neuspořádanost  $D$  je ekvivalentní Boltzmannově termodynamické pravděpodobnostní funkci  $W$ , jak je vyjádřeno v Boltzmannově původní rovnici

$$S = k \log W \quad (3.4)$$

2. Uspořádanost je reciproká vůči neuspořádanosti, tj.

$$Or = 1/D, \quad (3.5)$$

kde  $Or$  je míra uspořádanosti systému.

Zavedeme nyní třetí předpoklad: Informace je funkcí uspořádanosti

$$I = f(Or) \quad (3.6)$$

Zpřesněme tento třetí předpoklad tím, že definujeme informaci tak, že informace a organizace jsou spolu v přímé a lineární relaci. Tento předpoklad je jak nutný, tak i rozumný. Je nutný, protože jiné předpoklady vedou k pojmovým obtížím při odhadu změn informačního obsahu spojených se změnou entropie. Je rozumný, protože právě čím více látky systém obsahuje, tím větší je jeho hmotnost, takže tím více informace obsahuje a tím větší je jeho stav organizovanosti. Jak budeme diskutovat v další kapitole, množství informace obsažené v systému je, alespoň částečně, funkcí počtu vazeb spojujících subsystémy do organizovaného celku (vazeb, které mohou být rozrušeny ohřátím systému nebo jeho rozpuštěním). Avšak na tomto místě stačí učinit předpoklad, že informace a organizace jsou přímo a lineárně vázány, takže rovnice (3.6) může být vyjádřena jako

$$I = c(Or) \quad (3.7)$$

kde  $c$  je konstanta, která bude definována později.

Nebo naopak můžeme uvažovat pořádek jako funkci informace, tj.

$$Or = I/c \quad (3.8)$$

což znamená:

$$D = 1/Or = c/I \quad (3.9)$$

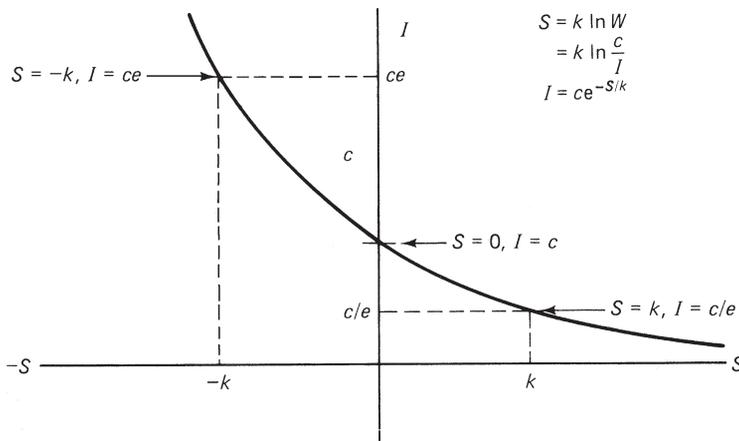
Provedeme-li dosazení výrazu  $c/I$  do původní Boltzmannovy-Schrödingerovy rovnice (3.2), dostaneme

$$S = k \log(c/I) \quad (3.10)$$

Řešením pro  $I$  dostaneme

$$I = ce^{-S/k} \quad (3.11)$$

Rovnice (3.10) a (3.11) definují základní vztah mezi informací  $I$  a entropií  $S$ . Graf této závislosti je zobrazen na obr. 3.2.



**Obr. 3.2** Závislost mezi informací  $I$  a entropií  $S$

## Konstanta $c$

Z rovnice (3.1) a obr. 3.2 vyplývá, že konstanta  $c$  představuje informační konstantu systému při nulové entropii.

Např. pro krystal kuchyňské soli při 0 K je

$$c = I_0 \quad (3.12)$$

kde  $I_0$  je informace obsažená v krystalu při  $S = 0$ .

Zatímco  $c$  zůstává konstantní pro všechny hodnoty  $I$  a  $S$  v rámci systému, není konstantní pro jiné systémy.

To je intuitivně zřejmé, když porovnáme jednoduchý krystal, jako je např. chlorid sodný, s krystalem DNA. Pro libovolnou srovnatelnou teplotu pod bodem tavení nebo rozpuštění, včetně 0 K, bude DNA samozřejmě obsahovat více informace než sůl. Podobně dva plyny – vodík ( $H_2$ ) a kyslík ( $O_2$ ) budou obsahovat rozdílná množství informace, protože atomy tvořící tyto dva plyny obsahují podstatně rozdílné množství informace: Vodíkové jádro se skládá z jediného protonu, zatímco jádro kyslíku se skládá z osmi protonů a osmi neutronů vázaných do soudržného celku. Proto v základním stavu při 0 K bude informace daná strukturou podstatně větší v dokonalém krystalu kyslíku než informace v dokonalém krystalu vodíku.

Rovnice (3.11) by proto mohla být rozšířena do ještě obecnější podoby, a to:

$$I = (I_0) e^{-S/k} \quad (3.13)$$

Tento rozdíl v ( $I_0$ ) může zohlednit tu skutečnost, že dva různé plyny zahřáté a expandující za stejných podmínek tlaku a teploty vykazují značné rozdíly ve změně entropie.

Vrátíme-li se k Boltzmannově-Schrödingerově rovnici (3.2), tj.  $S = k \log D$ , můžeme rovnici (3.13) přepsat do tvaru

$$S = k \log (I_0 / I) \quad (3.14)$$

který zvýrazňuje, že kvantitativním vyjádřením neuspořádanosti je podíl informačního obsahu systému při nulové entropii a při entropii odpovídající skutečnému stavu.

Tento zlomek může být vyjádřen jako pravděpodobnostní funkce, přičemž jeho hodnota odpovídá Boltzmannově originálu  $W$ . Je důležité si uvědomit, že Boltzmannovy rovnice byly odvozeny při zkoumání plynů [6], v nichž  $I$  nikdy nepřesáhlo  $I_0$ . Proto by  $S$  nikdy nemohlo nabýt záporných hodnot. Navíc, pokud omezíme analýzu na uspořádanost versus neuspořádanost, nikdy nenarazíme na  $S$ , které nabude negativní hodnoty, protože byl-li systém jednou „dokonale organizován“, nemůžeme mu přidat více řádu. To, co je již dokonale uspořádáno, nemůže již být uspořádáno více. Na druhé straně by bylo docela možné přidat více informace k systému, který je již dokonale uspořádán tím, že z něj uděláme ještě komplexnější systém. Vezmeme analogii z biologie – aplikací proteinového pláště na řetězec dokonale organizované DNA vyrobíme zralý virus.