

# Rozhledy matematicko-fyzikální

---

Jana Kalová  
Podivná voda

*Rozhledy matematicko-fyzikální*, Vol. 84 (2009), No. 2, 22–26

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/146298>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2009

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Celkově však na povrch Země dopadne jen 60 % záření. Další část se odrazí od atmosféry a nebo je v ní pohlceno. Výkon záření, s nímž bychom mohli počítat při našich výpočtech, je tedy asi  $1,05 \cdot 10^{17}$  W. Za rok to představuje teplo asi  $3,3 \cdot 10^{24}$  J.

*Celkový závěr:* I když údaje, které jsou zatím k dispozici, nezahrnují dlouhá časová období (nebo pokud údaje existují, jsou na hranici hodnověrných odhadů či hypotéz), jasné je, že během historie Země se střídala období s postupujícími ledovci s obdobími, v nichž ledovce zase ustupovaly. Není možné tvrdit, že lidská bytost je příčinou změn, které nazýváme globální oteplování nebo je s ním spojujeme. Na druhé straně život a práce šesti miliard lidí nutně významně narušuje staletou či tisíciletou rovnováhu v přírodě, a to značným způsobem. Náš článek měl ukázat jen jednu stránku, spojenou s táním ledovců. I když nejmenší nadmořská výška České republiky je v Hřensku na Labi asi 130 m a v Lanžhotu na soutoku Dyje a Moravy asi 150 m, odhadované změny hladiny oceánů by naše území zasáhnout neměly – ale co zbytek Evropy?

## Literatura

- [1] Čeman, R.: *Rekordy. Neživá příroda*. Mapa Slovakia plus, Bratislava, 2004.
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Ice\\_sheet](http://en.wikipedia.org/wiki/Ice_sheet)
- [3] [http://en.wikipedia.org/wiki/Polar\\_ice\\_packs](http://en.wikipedia.org/wiki/Polar_ice_packs)
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/Greenland\\_ice\\_sheet](http://en.wikipedia.org/wiki/Greenland_ice_sheet)

## Podivná voda

*Jana Kalová, VŠTE České Budějovice*

**Abstract.** The progress in investigation of ordinary water in several last years is discussed in the article. The water can exist in liquid state also in temperatures below  $0^\circ\text{C}$ , but the state is metastable. Supercooled water might be able to exist as either a high-density liquid (HDL) or as a low-density liquid (LDL). The dividing line between these two liquids might end in a “critical point”.

Voda je jedním ze čtyř Aristotelových elementů, po tisíciletí je ve středu vědeckého zájmu. Přesto k sobě stále přitahuje pozornost vědců a zdá se, jako by záhad kolem ní neubývalo. Desítky anomálních vlastností vody lze najít na <http://www.lsbu.ac.uk/water/anmlies.html>.

Nejslavnější zvláštností vody však je její hustota při nízkých teplotách – zatímco velká většina kapalin se při ochlazení smršťuje, voda při teplotách blízkých bodu tuhnutí se nejprve smršťuje, ale při dalším ochlazení se začíná rozpínat. Tato vlastnost například způsobuje, že led vzniká na povrchu rybníků a ne na dně a že život v rybnících může přežít pod ledovým příkrovem i tuhé zimy.

Hustota vody dosahuje maxima při  $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ , při dalším ochlazení od  $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  se její hustota zase zmenšuje. Co se stane s vodou při dalším ochlazení pod  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Takovou vodu nazveme „podchlazenou“. Je-li voda dostatečně čistá, nejsou v ní žádné nečistoty, na kterých by se mohly začít vytvářet ledové krystalky, lze ji uchovat v tekutém stavu i při teplotách pod bodem tuhnutí. Na *You Tube* lze najít řadu experimentů s podchlazenou vodou v plastové lahvi, které lze vyzkoušet i doma.

Podchlazená voda ale není stabilní – za nějakou dobu (dříve či později i při chybějících nečistotách) se objeví v podchlazené vodě zárodek ledu a ten způsobí, že voda poměrně rychle zmrzne. Tento stav vody, která zůstává tekutá i při teplotách (a tlacích) pod bodem tuhnutí, se nazývá „metastabilní“. A právě v metastabilní vodě se objevují další a další záhady.

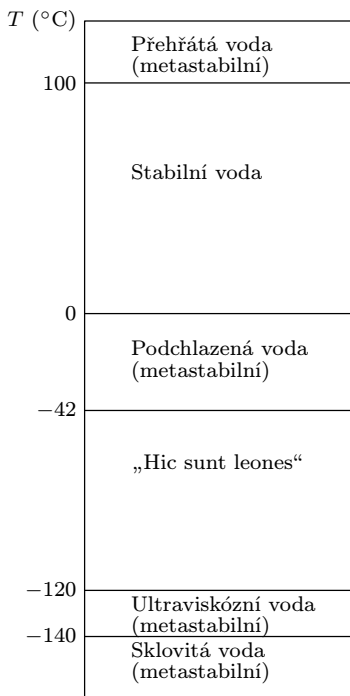
Pojem metastability lze vysvětlit jednoduše na mechanické soustavě. Problémy kolem stability je často vhodné definovat pomocí energetických pojmů. Podívejme se například na jednoduchý mechanický systém – homogenní tuhý válec o hmotnosti  $M$ , s průměrem  $d$  a výškou  $H \gg d$ , v tíhovém poli v horizontální rovině (tužka na stole). Potenciální energie soustavy je minimální, když tužka na stole leží. Stojící tužka je metastabilní, a pokud ji ořežeme a postavíme na špičku, dostaneme nestabilní stav. Pokud je tužka (bez špičky) postavena na stůl v metastabilním stavu, malé odchylky od rovnováhy ji nepřevrhnou, pokud výchylka z rovnováhy nebude taková, že svislá projekce jejího těžiště se dostane mimo základnu válce. Malé výchylky od rovnováhy vedou ke zvýšení potenciální energie tužky. Označíme-li  $\Delta h_1$  maximální převýšení těžiště od klidové polohy bez kmitů, je  $Mg\Delta h_1$  velikost energetické bariéry, kterou je nutné dodat soustavě, aby přešla do stabilního stavu. Pro výchylky  $\Delta h < \Delta h_1$  působí proti výchylce reakce, která vrací válec do původní, metastabilní polohy. Jakmile ale nějaká náhodná výchylka tužky překročí určitou mez, dojde k velké změně v poloze tužky, tužka spadne na stůl. Tužka na stole má přitom menší potenciální energii než tužka stojící. Malé výchylky vedly ke zvýšení potenciální energie, ale při vyšší odchylce tužka zaujme polohu s nižší energetickou bilancí.

Podobně je to s podchlazenou vodou – v podchlazené vodě neustále vznikají krystalky ledu, které pokud jsou malé, se zase rozpouštějí, protože to je energeticky výhodnější. Jakmile ale přeroste zárodek nějakou kritickou velikost, dojde, podobně jako u nakloněné tužky, k překonání energetické bariéry a systém spontánně přejde do energeticky výhodnějšího stavu – dojde k zamrznutí vzorku vody.

Schopnost vody existovat pod bodem tuhnutí se zkoumá již celá staletí. Ale teprve v poměrně nedávné době se zjistilo, že za velmi nízkých teplot neexistuje jen jeden typ vody, ale existují typy dva. Tento jev existence dvou fází kapalné vody předpověděli v roce 1992 fyzik H. Eugen Stanley z Bostonské univerzity a jeho doktorand Peter Poole. Pomocí počítačových experimentů, při kterých se simulovalo chování vody při nízkých teplotách, zjistili, že voda by mohla existovat ve dvou fázích – buď jako kapalina o vysoké hustotě, nebo kapalina s nízkou hustotou. Pokud tomu tak je, a současné experimenty tyto závěry spíše potvrzují, pak by dělicí linie mezi těmito fázemi mohla končit v kritickém bodě, podobně jako ve velmi známém kritickém bodě kapalina–pára v 647 K (374 °C), kde se plynná a kapalná fáze stávají identickými. Hypotetický druhý kritický bod je označován jako kritický bod fázového přechodu kapalina–kapalina. Existence tohoto bodu by mohla vysvětlit podivné chování vody při nízkých nebo i obyčejných teplotách. Stanley používá srovnání vlivu kritického bodu na okolí s Mount Everestem. Ten se také neobjevuje náhle, z ničeho, ale zvedá se postupně, obklopen rozsáhlým pohořím. Stejně tak druhý kritický bod vody by mohl ovlivňovat chování vody v nějakém svém okolí, tedy i při běžných teplotách.

Při ochlazování vody pod bod tuhnutí při atmosférickém tlaku narazíme na teplotu, která pro různé tlaky vytváří tzv. linii homogenní nukleace, pod kterou se lze dostat jen obtížně, protože i velmi čisté a malé vzorky vody rychle zmrznou. Při atmosférickém tlaku je tato teplota –42 °C. Donedávna se předpokládalo, že z oblasti s teplotami pod –42 °C nelze získat žádná experimentální data. Proto se tato oblast značí stejně jako neprozkoumaný terén na mapách – „*hic sunt leones*“ (obr. 1). Druhý kritický bod vody by měl ležet právě v této experimentálně těžko dosažitelné oblasti! Jak jeho existenci průkazně dokázat?

Záhy se přišlo na to, že tuto oblast lze překonat velmi rychlým ochlazením s rychlostmi  $10^5$  K/s. Při těchto rychlostech nestačí voda zkrystalizovat. Přitom s klesající teplotou roste viskozita, prudce se snižuje pohyblivost molekul, voda „zesklovatí“. Toto zesklivatění nastává při teplotách kolem 130 K (–143 °C).



Obr. 1

Vlastnosti zesklivatělé vody se opravdu podobají vlastnostem skla. Díky zpomalení pohybu molekul neproběhne jejich uspořádání do krystalické struktury – mluvíme o amorfním ledu. V tomto stavu jsme ale dostali snímek uspořádání molekul před rychlým zamrznutím. I když amorfní led je svými mechanickými vlastnostmi tuhé těleso, uspořádáním molekul připomíná kapalinu. V amorfním ledu ale byly objeveny dva stavy – led o vysoké hustotě, tzv. HDA (High density amorphous) led a led o nízké hustotě, LDA (Low density amorphous) led! Pokud je tedy sklovitá voda snímkem uspořádání molekul kapaliny, je to odraz situace, že za nízkých teplot může voda existovat ve dvou stavech odpovídajících HDA a LDA. Tyto stavy vody se označují HDL (High density liquid) a LDL (Low density liquid).

V roce 2005 Sow-Hsin Chen z Massachusetts Institute of Technology a jeho kolegové ukázali cestu, jak získat data přímo z nedosažitelné oblasti: za pomoci nového materiálu nazývaného MCM-41. Chung-Yuan Mou z Národní tchaj-wanské univerzity v Tchaj-peji vytvořil MCM-41

pomocí opracování křemíkových nanotrubiček. Materiál se podobá mikroskopickému včelímu plástu s šestiúhelníkovými děrami, všechny jsou stejně velké, pouze několik nanometrů široké. Protože byl Chen zvědavý, jak se bude chovat voda v MCM-41, naplnil hexagonální pole vodou. Pak vodu ochladil na  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$  a bombardoval dané uspořádání neutrony. Mikroskopické buňky MCM-41 nejen zabránily vodě, aby zkrystalizovala, ale umožnily vědcům i zkoumání molekulární struktury vody. Při výzkumu provedli Chen a jeho kolegové řadu experimentů, aby viděli, jak se vlastnosti vody mění při poklesu teploty při atmosférickém tlaku.

Minulý rok Chen a jeho tým opět překvapili vědeckou komunitu, když objevili, že za podmínek velmi silného podchlazení se kapalná voda vrací k „normálnímu“ chování, kdy se při ochlazení její hustota zvětšuje. Pomocí metody rozptylu neutronů a pomocí analýzy měření hustoty vody pod  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ukázali, že voda dosahuje minimální hustoty při  $203\text{ K}$  ( $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Ačkoliv tento typ chování byl předpovězen při počítačových simulacích, nikdy předtím nebyl experimentálně pozorován. Podle Chena se objevy přidávají na dlouhý seznam experimentálních anomálií podchlazené vody a poskytují silný experimentální důkaz pro druhý kritický bod kapalně vody.

## Literatura

- [1] Gaidos, S.: Supercool, and strange. *Science News Online* **173**, č. 4, (2008).
- [2] Angell, A.: Highs and lows the density of water. *Nature Nanotechnology* **2** (2007), 396–398.

\* \* \* \* \*

Jediným šťastím ľudského ducha je nachádzanie pravdy, postupné a tvrdošijné odstraňovanie tajomstiev.

J. Bruller-Vercors (1902–1991)

Akokoľvek ďaleko veda rozšíri svoje poznatky, jej pole bude vždy ohraničené; okolo jej hraníc vznáša sa tajomstvo a čím ďalej sa budú posúvať tieto hranice, tým viac sa rozšíri i tajomstvo.

H. Poincaré (1854–1912)

Budeme hľadať tak, akoby sme mohli nájsť, ale nikdy nenájdem tak, aby sme mohli prestať hľadať.

Aurelius Augustinus (354–430)

*Vybral D. Jedinák*