

**16. ročník, úloha V. E ... paradox zmrzlináře (8 bodů; průměr 4,50; řešilo 18 studentů)**

Traduje se historka, že jeden zmrzlinář, když potřeboval rychle vyrobit led, dával do mrazáku ohřátou vodu místo studené. Ověřte, zda je skutečně možné, aby na počátku teplejší voda zmrzla rychleji než stejné množství vody studené. Specifikujte při jakých podmínkách se to může stát.

**Teorie**

Je známo, že popsáný efekt skutečně existuje. V literatuře ho můžete najít pod heslem Mpembův jev. Důvod, proč by studená voda měla zmrznout dříve než teplá, je jasný na první pohled, o důvody, proč by tomu mělo být naopak, se fyzici přou dodnes. Shrňme zde ty nejčastěji uváděné.

**• Vypařování**

Teplá voda se bude zjevně vypařovat intenzivněji. Tím ztratí něco ze své hmotnosti, ale hlavně přijde o ty nejenergetičtější molekuly. Tím se může poměrně intenzivně ochladit (na tomto principu pracují například vývěvové zkapalňovače helia). Bohužel fyzikální popis vypařování je neobvykle složitý, takže odhadnout, jak velký dopad bude mít na mrznutí vody, je značně netriviální.

**• Složení vody**

Běžně dostupná voda obsahuje kromě molekul  $\text{H}_2\text{O}$  spoustu dalších iontů, molekul plynů apod. Tyto příměsi hrají významnou roli jako krystalizační jádra při vzniku ledu. Dá se předpokládat, že v převařené vodě bude těchto příměsí méně, což by mohlo ovlivnit proces zamrznutí. Není ovšem zdaleka jasné, zda by voda bez příměsí měla zamrznat rychleji než voda „špinavá“.

**• Vznik teplotního gradientu**

Hustota vody se mění s teplotou, a tak voda v nádobce bude mít tendence se horizontálně vrstvit. Podle některých názorů bude toto vrstvení vypadat jinak u studené vody a u vody původně teplé ochlazené na stejnou teplotu. Podle našeho názoru zde hraje spíše roli to, za jak dlouho se takové rozvrstvení vytvoří. Dá se předpokládat, že u teplé vody se utvoří rychleji. Potom bude nejteplejší voda u hladiny, což urychlí vypařování. U studené vody se bude rozvrstvení vytvářet pomaleji, což zpomalí i vypařování. Kvantitativní vyjádření tohoto jevu je opět netriviální a jen proměření teplotního gradientu bez nějakého infra-snímače prakticky neproveditelné.

**• Odvod tepla podložkou**

Nádobka s teplou vodou by mohla rozmrazit led pod sebou v mrazáku a tím zlepšit odvod tepla.

**Experiment**

Naše vybavení sestávalo ze 2 kelímků od pomazánkového másla (průměr  $d = 7,88$  cm) a ledničky s teplotou mrazáku  $-8^\circ\text{C}$  a objemem 30 l. Teplá voda měla přibližně  $65^\circ\text{C}$ .

Výše uvedené důvody naznačují, že při chladnutí hrají podstatnou roli i jiné faktory než jen počáteční teploty. Abychom mohli proměřit jejich kvantitativní vliv, měli bychom uspořádat sérii experimentů a v každém se zaměřit právě na jeden z vlivů. Pro začátek jsme měřili mrznutí vody ve dvou nádobkách o stejné počáteční teplotě.

**• Pokus 1**

Do první nádobky jsme nalili obyčejnou vodu z vodovodu, do druhé, pečlivě vyčištěné, stejné množství destilované vody (která by měla obsahovat méně příměsí). Obě vody začaly

mrznout v prakticky stejný okamžik (po 68 minutách), ale struktura ledového obalu byla rozdílná. U destilované vody šlo o hladkou vrstvičku okolo dna, stěn a hladiny. Obyčejná voda vytvářela zajímavější krystaly a vrstva nebyla souvislá. K efektu podchlazení nedošlo, pravděpodobně vlivem mechanických vibrací vyvolaných motorem ledničky.

### • Pokus 2

Tentokrát jsme použili stejnou vodu, ale jednu nádobku jsme uzavřeli, čímž jsme znemožnili unikát vodním parám. Voda v otevřené nádobce zmrzla po 60 minutách, zatímco v uzavřené po 83, což potvrzuje, že vypařování je významným jevem při procesu ochlazování.

### • Pokus 3

Opět jsme použili stejné vody a stejné počáteční teploty, ale jednu nádobku jsme zespoda odizolovali. Voda v izolované nádobce zmrzla o trochu později, ale rozdíl (3 minuty) byl na hranici měřitelnosti.

Tyto pokusy ukázaly, že jediným opravdu významným faktorem při ochlazování je vypařování. Budeme předpokládat, že intenzita vypařování souvisí s plochou hladiny. Další k experimenty provedeme s rozdílnými počátečními teplotami a postupně budeme měnit množství použité vody a tím i poměr plochy hladiny a objemu.

Jak je patrné z tabulky, teplá voda sice vždy zmrzla později, ale čím byl poměr plochy hladiny a objemu větší, tím těsnější byl rozdíl. Za určitých okolností (např. s mrazákem o nižší teplotě) by pravděpodobně bylo možné Mpembův jev pozorovat.

$S/V$ [cm <sup>-1</sup> ]	$t_{\text{hot}}$ [min]	$t_{\text{cold}}$ [min]	$t_{\text{hot}}/t_{\text{cold}}$
2,3	85	60	1,42
3,8	70	55	1,30
7,7	27	23	1,17

### Závěr

Mpembův jev jsme sice přímo nepozorovali, ale potvrdili jsme, že počáteční teploty nejsou jediný důležitý faktor ovlivňující dobu ochlazování. Pokud bychom měli zhodnotit příspěvek výše zmíněných procesů, pak se nám jako hlavní jeví vypařování. Vliv teplotního rozvrstvení jsme samostatně neproměřovali a zahrnuli ho do efektu vypařování. Naopak jsme nezjistili zásadní vliv způsobený složením vody, ani únikem tepla podstavou nádobky. To ale může být způsobené naším uspořádáním experimentu a za jiných podmínek se jejich vliv nedá vyloučit.

### Literatura

[1] *Vesmír*, 11/2002, str. 615

[2] <http://library.thinkquest.org/C008537/cool/freeze/freeze.html>,  
mirror na <http://fykos.mff.cuni.cz/cz/rocnik16/freeze/>

*Michael Komm*

michael@fykos.mff.cuni.cz

---

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty UK MFF. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci UK MFF a podporován Ústavem teoretické fyziky UK MFF, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.