Univerza v Mariboru

Fakulteta za naravoslovje
in matematiko

MPEMBOV POJAV

Seminar iz fizike na bolonjskem študijskem programu 1. stopnje Izobraževalna fizika

Aljaž Šabeder

Vodja seminarja: prof. dr. Nataša Vaupotič

Maribor, 2013

ŠABEDER, A.: Mpembov pojav
Seminar iz fizike, Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za fiziko, 2013.

POVZETEK
V seminarju obravnavamo Mpembov pojav, to je pojav, pri katerem voda z višjo začetno temperaturo zmrzne hitreje kot voda z nižjo začetno temperaturo. Izvedemo poskuse, pri katerih preverimo vpliv konvekcije, izhlapevanja vode, oblike posode in podhladitve vode na nastanek Mpembovega pojava.

Ključne besede: Mpembov pojav, konvekcija, izhlapevanje, oblika posode, podhladitev vode

ABSTRACT
In this seminar we study the Mpemba effect. This is an effect, in which the water with a higher initial temperature freezes faster than water with a lower initial temperature. We perform experiments, by which we check the influence of convection, evaporation of water, shape of the container and supercooling of water on the existence of the Mpemba effect.

Key words: Mpemba effect, convection, evaporation of water, shape of container, supercooling of water

KAZALO

1 UVOD 1
2 MPEMBOV POJAV 1
3 OPAZOVANJE MPEMBOVEGA POJAVA 3
4 ZAKLJUČEK 5

1 UVOD

Prvi znani zapis o pojavu, da vroča voda zmrzne prej kot hladna voda, sega v čas Aristotela, ki je zapisal [1]: «Dejstvo je, da voda, ki je bila predhodno segreta, hitreje zmrzne, zato mnogi ljudje postavijo vodo na sonce, da bi hitreje zmrznila.« Leta 1969 je bil tanzanijski študent Erasto Mpemba prvi, ki je ta pojav na podlagi lastnih meritev opazil, zato se pojav imenuje Mpembov pojav. Idejo je dobil pri izdelovalcih sladoleda, ki so zatrjevali, da je sladoled prej gotov, če dajo v hladilnik vročo mešanico. Istega leta je o pojavu pisal tudi Kanadčan G. S. Kell, ki je opazil, da je drsališče bolje napolniti z vročo vodo, da čim prej zmrzne, in da je avto v zimskih mesecih bolje oprati s hladno vodo, saj se v nasprotnem primeru na njem naredi led [2].

Voda z višjo začetno temperaturo lahko hitreje zmrzne od tiste z nižjo začetno temperaturo le, če so pojavi, ki vplivajo na ohlajanje in zmrzovanje vode, dovolj izraziti. Med te pojave uvrščamo konvekcijo, prevajanje, izhlapevanje in podhladitev vode. Izrazitost teh pojavov je močno odvisna od oblike in sestave posode ter raztopljenih plinov v vodi, zato ne moremo vnaprej napovedati, da bomo opazili Mpembov pojav [3].

V seminarju bom kvalitativno opisal fizikalno ozadje Mpembovega pojava (poglavje 2). Predstavil bom eksperiment, pri katerem sem opazoval ohlajanje in zmrzovanje vode v zamrzovalniku (poglavje 3). Opazoval sem ohlajanje vode z enako začetno temperaturo in ji spreminjal začetno maso. Opazoval sem tudi ohlajanje vode z enako začetno maso in ji spreminjal začetno temperaturo. Zanimalo me je, v katerih primerih bom opazil Mpembov pojav. Preveril sem tudi, kako začetna masa vpliva na hitrost zmrzovanja vode.

2 MPEMBOV POJAV

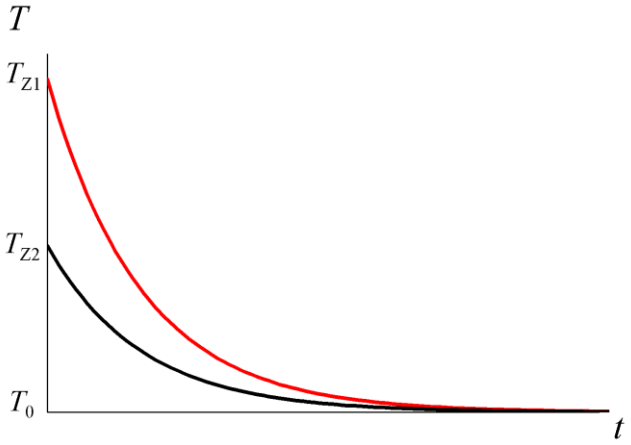
Voda pri ohlajanju in zmrzovanju oddaja toploto okolici in logično bi bilo, da vroča voda zmrzne kasneje kot hladna, saj mora vroča voda najprej oddati toploto, da se ohladi. Pričakujemo, da bo hitrost ohlajanja (dT/dt) premo sorazmerna razliki temperature med temperaturo vode (T) in okolice (T_o):

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_\mathrm{o}), \tag{1}$$

kjer je k konstanta, ki je odvisna od mase in specifične toplote vode ter toplotne prevodnosti in toplotne prestopnosti. Diferencialno enačbo (1) integriramo od začetne temperature vode T_z do temperature vode $T(t)$ ob času t in dobimo:

$$T(t) = T_0 + (T_\mathrm{z} - T_0)e^{-kt}. \tag{2}$$

Iz enačbe (2) sledi, da voda, ki ima višjo začetno temperaturo, potrebuje več časa za ohlajanje kot voda, ki ima nižjo začetno temperaturo (slika 1), zato bi pričakovali, da potrebuje več časa tudi za zmrzovanje, če merimo čas od trenutka, ko se prične ohlajati. To velja le, če privzamemo, da je konstanta k v obeh primerih enaka. Ob določenih pogojih je konstanta k lahko različna in takrat opazimo pojav, pri katerem enaka količina vroče vode zmrzne hitreje od enake količine hladne vode. Pojav imenujemo Mpembov pojav.



Slika 1: Ohlajanje vode z različnima začetnima temperaturama T_{Z1} in T_{Z2} do temperature okolice T_0 v odvisnosti od časa t

Mpembov pojav opazimo le pod določenimi pogoji. Odvisen je od mnogih dejavnikov, ki vplivajo na ohlajanje in zmrzovanje vode. Od odkritja pojava se je z njim ukvarjalo veliko fizikov. Ugotavljali in opazovali so parametre, ki vplivajo na nastanek pojava. Kot prvi razlog lahko navedemo konvekcijo. Če so temperaturne razlike velike, se v vodi sprožijo konvekcijski tokovi, ki pospešijo njeno ohlajanje. Ti konvekcijski tokovi so v vroči bolj intenzivni kot v hladni vodi, zato se zaradi bolj učinkovitega mešanja voda z višjo začetno temperaturo prej ohladi. D. G. Osborne [2] je meril čas ohlajanja vode do 0°C. Ugotovil je, da je ta čas največji za vodo z začetno temperaturo približno 20°C. Za vodo z nižjo in tudi za vodo z višjo začetno temperaturo je čas krajši. Drugi zelo pomemben proces je izhlapevanje vode. Pri ohlajanju vode do 0°C voda izhlapeva. V vroči vodi je izhlapevanje izrazitejše kot v hladni in vroča voda lahko z izhlapevanjem izgubi tudi do 25% začetne mase. Posledično ima voda z višjo začetno temperaturo pri začetku zmrzovanja manjšo maso kot voda z nižjo začetno temperaturo. Voda, ki ima pri zmrzovanju manjšo maso, tudi hitreje zmrzne, zato je izhlapevanje vode ključni dejavnik, ki določa, ali bomo pojav opazili. Vendar to ne pomeni, da bomo pojav opazili le ob uporabi odprtih posod. Leta 1988 je Wojciechowski [3] opazoval ohlajanje vode v zaprtih posodah in kljub temu, da izhlapevanja ni bilo, je Mpembov pojav opazil. Pojav je odvisen od velikega števila dejavnikov, zato ga lahko opazimo kljub temu, da kakšen dejavnik izločimo iz opazovanja.

Oblika posode, v kateri vodo ohlajamo, in material, iz katerega je posoda izdelana, je prav tako lahko razlog, da opazimo Mpembov pojav. Pri posodi z večjo površino imamo več možnosti, da pojav opazimo, zato ker je izhlapevanje vode izrazitejše. Prav tako je pomembno, ali ohlajanje vode opazujemo v plastičnih posodah, ki imajo majhno toplotno prevodnost, ali v kovinskih posodah, ki dobro prevajajo toploto. Voda v plastični posodi se v večji meri ohlaja zaradi izhlapevanja, medtem ko na ohlajanje vode v kovinski posodi vpliva še prevajanje. Prevajanje pospeši ohlajanje vode, zato je manj izhlapi, kar zmanjša verjetnost, da bomo v kovinski posodi opazili Mpembov pojav.

Na koncu omenimo še podhladitev vode. Podhladitev vode je pojav, ko se tekočina ohladi pod temperaturo tališča in pri tem ne spremeni faze. Takšen sistem je v metastabilnem stanju in vsaka nenadna sprememba v okolici lahko povzroči, da se sistem vrne v stabilno stanje in spremeni fazo. Na podhladitev vode vpliva oblika posode in koncentracija raztopljenih plinov

v vodi. Višja kot je temperatura vode, manj je v njej raztopljenih plinov. Iz meritev, ki jih je izvedel Auerbach [4], se izkaže, da se voda z višjo začetno temperaturo, podhladi manj kot voda z nižjo začetno temperaturo. Posledično lahko hladna voda zmrzne pri nižji temperaturi kot topla voda, kar nas spet privede do Mpembovega pojava.

Veliko število dejavnikov, ki vplivajo na nastanek Mpembovega pojava je vzrok, da pojava še ne moremo teoretično opisati. Poleg navedenih, na nastanek Mpembovega pojava vpliva še oblika hladilnika, koncentracija primesi v vodi idr., ki poskrbijo, da nobena meritev ni identična prejšnji.

3 OPAZOVANJE MPEMBOVEGA POJAVA

V nadaljevanju bom predstavil, kako izvesti eksperiment, da opazimo Mpembov pojav. Za izvedbo eksperimenta potrebujemo zamrzovalnik, plastični lonček ali posodo, tehtnico, računalniški vmesnik Vernier LabPro in termočlen, s katerim merimo temperaturo vode. Vodo, ki jo opazujemo, nalijemo v posodo in stehtamo ter postavimo v zamrzovalnik. V vodo postavimo termočlen, ki ga priključimo na računalniški vmesnik. Računalniški vmesnik sproti beleži temperaturo vode (T) v odvisnosti od časa (t) in izrisuje graf.

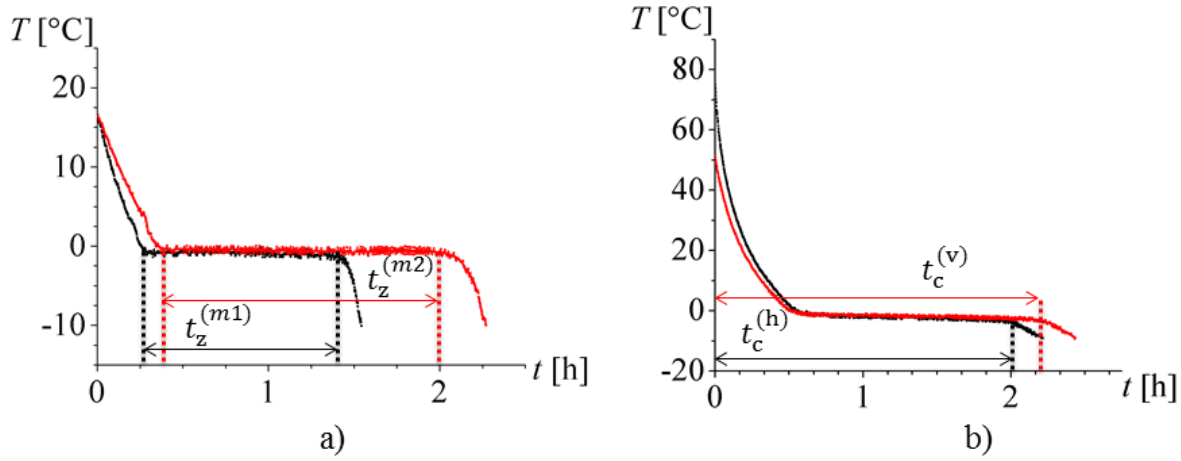
Meril sem čas, v katerem voda zamrzne in poskušal opaziti Mpembov pojav. Vodi z enako začetno maso sem spreminjal začetno temperaturo. Zanimalo me je tudi, kako masa vpliva na čas zmrzovanja, zato sem vodi z enako začetno temperaturo spreminjal začetno maso. Zmrzovanje vode sem opazoval v plastičnih lončkih in plastični posodi z večjo površino, kot jo ima lonček. Za boljšo predstavo naj omenim, da je bil premer lončka 2-krat manjši od premera posode, kar pomeni, da je bila površina posode 4-krat večja od površine lončka.

Slika 2 prikazuje temperaturo vode (T) v odvisnosti od časa (t) za primer, ko vodi z enako začetno temperaturo spreminjamo začetno maso (slika 2a) in za primer, ko vodi z enako začetno maso spreminjamo začetno temperaturo (slika 2b). Iz meritev lahko odčitamo čas (t_z), v katerem voda, ki se je ohladila na 0°C, zmrzne (slika 2a) in čas (t_c), v katerem se voda ohladi in zmrzne (slika 2b).

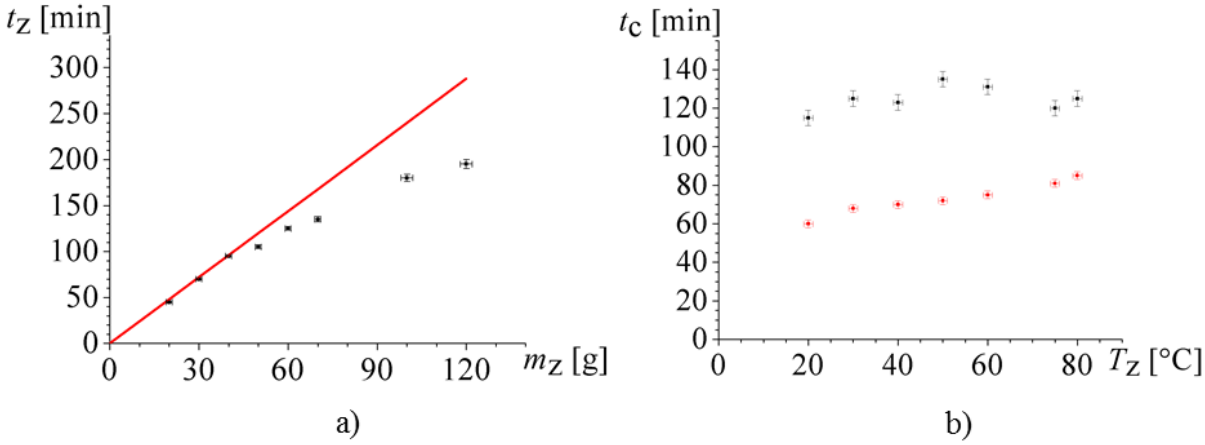
Graf časa zmrzovanja vode (t_z) v odvisnosti od začetne mase vode (m_z) je prikazan na sliki 3a. Za primerjavo sem dodal tudi teoretične rezultate, kjer se masa vode pri ohlajanju in zmrzovanju ne spremeni. V tem primeru preverjamo linearno povezavo med časom zamrznitve vode in njeno maso. Če maso vode povečamo za faktor 2, se čas zmrzovanja prav tako poveča za enak faktor. V tem primeru nismo dobili linearne povezave, ker sem zmrzovanje vode opazoval v plastičnih posodah, kjer je prisotno izhlapevanje vode, ki dodatno vpliva na rezultate. Na rezultate je vplivala tudi prostorska omejenost zamrzovalnika, sej vode nisem mogel mešati.

Graf celotnega časa ohlajanja in zmrzovanja vode (t_c) v odvisnosti od začetne temperature vode (T_z) je prikazan na sliki 3b. V tem primeru preverjamo obstoj Mpembovega pojava. Prikazani so rezultati opazovanja v plastični posodi, kjer sem opazil Mpembov pojav (črne točke), in rezultati opazovanja vode v plastičnih lončkih, kjer pojava nisem opazil (rdeče točke). Iz grafa lahko vidimo, da voda z višjo začetno temperaturo zmrzne hitreje kot voda z nižjo začetno temperaturo. Mpembovega pojava pri meritvah vode v plastičnih lončkih nisem

opazil, zato lahko sklepam, da je bilo izhlapevanje vode v mojem primeru ključnega pomena za nastanek pojava. Pri eksperimentu sem izmeril, da je voda v plastičnih posodah z začetno temperaturo 80°C izgubila 15% mase, medtem, ko je voda v plastičnih lončkih izgubila okoli 5%. Pri opazovanju sem pričakoval, da bom opazil podhladitev vode, vendar do tega ni prišlo.



Slika 2: a) Temperatura vode (T) v odvisnosti od časa (t) za vzorca z enako začetno temperaturo $(T_z = 16°C)$ in različno začetno maso (m_z). Črna krivulja: $m_z = 30$ g; čas zamrznitve $t_z^{(m1)} = 70$ min. Rdeča krivulja: $m_z = 50$ g; čas zamrznitve $t_z^{(m2)} = 105$ minut. b) Temperatura vode (T) v odvisnosti od časa (t) za vzorca z enako začetno maso ($m_z = 200$ g) in različno začetno temperaturo. Čas ohlajanja in zamrznitve za vodo z začetno temperaturo 50°C (rdeča krivulja) je $t_c^{(h)} = 135$ min, za vodo z začetno temperaturo 75°C (črna krivulja) pa $t_c^{(v)} = 120$ min. V tem primeru je viden Mpembov pojav; vroča voda zmrzne 15 minut prej kot hladna.



Slika 3: a) Čas zamrznitve vode (t_z) v odvisnosti od njene začetne mase (m_z). Točke predstavljajo eksperimentalne meritve, črta pa teoretično napovedan čas zmrzovanja, če predpostavimo, da je masa vode ves čas konstantna. b) Celotni čas ohlajanja in zamrznitve vode (t_c) v odvisnosti od začetne temperature vode (T_z). Črne točke: rezultati opazovanja vode v plastičnih posodah; opazimo Mpembov pojav. Rdeče točke: rezultati opazovanja vode v plastičnih lončkih; Mpembovega pojava ne opazimo.

4 ZAKLJUČEK

V seminarju sem predstavil Mpembov pojav, to je pojav, pri katerem voda z višjo začetno temperaturo zmrzne hitreje kot voda z nižjo začetno temperaturo. Pojav je odvisen od velikega števila dejavnikov, med katerimi lahko izpostavimo konvekcijo, izhlapevanje, obliko in vrsto posode ter podhladitev vode.

Meril sem čas zamrznitve vode v odvisnosti od začetne temperature. Poskuse sem izvedel v plastičnih lončkih in plastični posodi. Mpembov pojav sem opazil le v plastični posodi, ki ima večjo površino, zato sklepam, da je bilo v tem poskusu izhlapevanje ključnega pomena za nastanek pojava.

Bralcu, ki ga pojav še posebej zanima, priporočam izvedbo eksperimenta in osredotočanje na kakšen drug parameter, ki vpliva na pojav. Zanimivo bi bilo pojav opazovati tudi v zaprtih posodah, kjer izhlapevanje ni možno.

VIRI IN LITERATURA

[1] M. Jeng, *The Mpemba effect: When can hot water freeze faster than cold?*, Am. J. Phys. **74**, 514-522 (2006).

[2] J. Strnad, *Mpembov pojav ali zmrzovanje vroče in hladne vode*, Presek **1** (8), 24-31 (1980).

[3] M. Jagnjić, *Zagonetka Mpembina efekta ili paradoks smrzavanja vode*, Priroda **6**, 44-48 (2012).

[4] J. Strnad, *Še o Mpembovem pojavu*, Presek **1** (24), 42-46 (1996).

[5] Z. Bradač in J. Dobnikar, *Ohlajanje in zmrzovanje vode*, Presek **2** (20), 98-103 (1992).