

## Skákajúce guľôčky - model fázových prechodov a nestabilití (10 bodov)

Skôr ako začnete riešiť túto úlohu prečítajte si všeobecné pokyny, ktoré sa nachádzajú vo zvláštnej zložke.

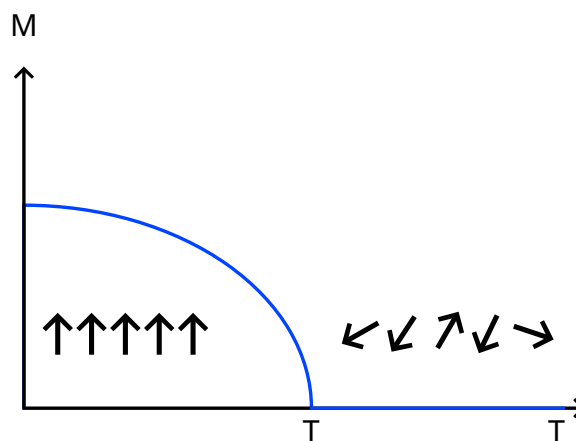
### Úvod

S fázovými prechodmi sa stretávame v každodennom živote. napr. voda má tuhé skupenstvo - ľad, kvapalné a plynné - vodná para. Tieto odlišné stavy sú od seba oddelené fázovými prechodmi, pri ktorých sa menia kolektívne vlastností molekúl v danej látke. Fázový prechod je vždy spájaný s teplotou prechodu, pri ktorej sa mení daný stav látky, napr. teplota varu vody alebo teplota tuhnutia vody z nášho príkladu, ktorý sme uviedli.

Fázové prechody majú oveľa širší význam a vyskytujú sa aj v ďalších systémoch ako sú magnety a supravodiče. V týchto materiáloch sa pod teplotou prechodu makroskopický stav mení z paramagnetika na feromagnetikum a z normálneho vodiča sa stáva supravodič.

Všetky tieto fázové prechody môžeme opísať spoločne, keď si zavedieme tzv. parameter usporiadania. Napr. v magnetizme je parameter usporiadania spájaný s usporiadaním magnetických momentov atómov a ich vplyvom na celkovú magnetizáciu.

V tzv. spojitých fázových prechodoch, parameter usporiadania bude vždy rovný nule nad kritickou teplotou a pod ňou spojitě rastie ako to môžete vidieť na obrázku 1. Obrázok tiež zobrazuje pravidelné alebo nepravidelné usporiadanie individuálnych magnetických momentov pre magnet. V prípade feromagnetika pravidelné usporiadanie individuálnych magnetických momentov prispieva k vzniku makroskopickej magnetizácie, zatiaľ čo náhodné usporiadanie magnetických momentov v paramagnetickom stave vedie k nulovej makroskopickej magnetizácii.



Obrázok 1: Schematický obrázok teplotnej závislosti parametra usporiadania  $M$  pri fázovom prechode. Pod kritickou teplotou  $T_{crit}$ , parameter usporiadania rastie a má hodnotu rôznu od nuly, zatiaľ čo nule pri teplotách nad  $T_{crit}$  je rovný nule.

Pre spojitě fázové prechody parameter usporiadania pre teploty blízko fázového prechodu môžeme popísať mocninovým zákonom, napr. v magnetizme magnetizáciu  $M$  pod kritickou teplotou,  $T_{crit}$ , môžeme

popísať rovnicou

$$M \begin{cases} \sim (T_{\text{crit}} - T)^b, & T < T_{\text{crit}} \\ = 0, & T > T_{\text{crit}} \end{cases} \quad (1)$$

kde  $T$  je teplota. Čo je tiež prekvapujúce, že takéto chovanie je univerzálne: exponent tejto mocninatej závislosti je rovnaký pre veľa rozdielnych druhov fázových prechodov.

## Úloha

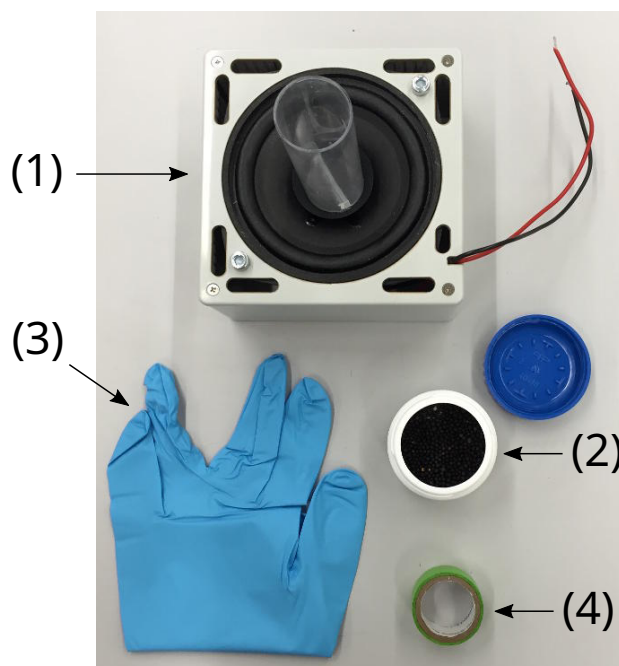
Budeme študovať jednoduchý príklad, a pomocou neho budeme vyšetrovať vlastnosti spojitých fázových prechodov. Napríklad ako nestabilita ovplyvňuje kolektívne chovanie častíc, a tak vyvolá fázový prechod a ako zmena makroskopického parametra závisí od excitácie častíc.

Bežne sa pri fázových prechodoch tieto excitácie vyvolávajú zmenou teploty. V našom prípade excitácia pozostáva z kinetickej energie častíc urýchlených pomocou vibrácií membrány reproduktora. Makroskopická zmena zodpovedajúca fázovému prechodu, ktorý študujeme, pozostáva z triedenia guľôčok (ich prechodu) z jednej polovice valca do druhej polovice. Obidve polovice sú oddelené medzi sebou nízkou prekážkou.

Na začiatku sú guľôčky v jednej polovici valca. Zvyšovaním amplitúdy kmitov reproduktora dosiahneme stav, keď guľôčky v oboch poloviciach valca budú rovnomerne rozdelené. To zodpovedá prechodu cez kritickú teplotu.

Vašou úlohou je určiť kritický exponent  $b$  vami študovaného modelu fázového prechodu.

## Pomôcky



Obrázok 2: Ďalšie pomôcky pre tento experiment

1. Zostava reproduktora s plastovým valcom pripevneným na povrchu
2. Asi 100 guľôčok (v plastovom valci)
3. Rukavice
4. Lepiaca páska

### Dôležité upozornenia

- Netlačte zboka príliš veľkou silou na plastový valec pripevnený k reproduktoru. Nedostanete náhradný kus ani v prípade odtrhnutia valca od reproduktora, ani v prípade poškodenia membrány reproduktora.
- Vypínajte reproduktor pokiaľ ho nepoužívate, šetríte si tým batériu.
- V tomto experimente budete odoberať 4 Hz signál pílovitého tvaru z výstupných svoriek pre reproduktor, ktoré sú na bočnej strane signálového generátora.
- Amplitúdu signálu pílovitého tvaru môžete nastavovať použitím pravého potenciometra označeného *speaker amplitude* (4). Jednosmerné napätie úmerné amplitúde signálu je na výstupe zdiery *speaker amplitude* (6) (vzhľadom na zdiery uzemnenia *GND socket* (7)). Čísla v zátvorkách odkazujú na obrázok signálového generátora vo všeobecných pokynoch.
- Membrána reproduktora je jemná. Dajte pozor, aby ste na ňu príliš netlačili v žiadnom smere, ani zvislo ani do strany.

## Časť A. Kritická amplitúda excitácie (3,3 bodu)

Skôr ako začnete riešiť jednotlivé úlohy tejto časti pripojte reproduktor k zdierkam na boku signálového generátora (pozor na správnu polaritu). Vložte niekoľko (napr. **50**) guľôčok do valca pripevneného k reproduktoru a pomocou kúska gummy vystrihnutej z priložených rukavíc a lepiacej pásky zakryte vrch valca tak, aby z neho guľôčky nevylietavali. Vypínačom zapnite zdroj excitácií, pomocou skrutkovača otáčajte pravým potenciometrom, a tým meňte amplitúdu napätia na reproduktore. Potenciometer je označený ako *speaker amplitude* (4). Pozorujte rozdelenie guľôčok pri rôznych amplitúdach.

Prvou úlohou je určiť kritickú amplitúdu napätia excitácie tohoto prechodu. Určite to tak, že spočítate počet guľôčok  $N_1$  a  $N_2$  v obidvoch častiach valca (označte časti tak, že  $N_1 \leq N_2$ ) ako funkciu zobrazovanej amplitúdy napätia  $A_D$ , čo je vlastne napätie merané na svorke *speaker amplitude* (6). Toto napätie je úmerné amplitúde signálu pílovitého tvaru, ktorý pohybuje reproduktorom. Urobte pre každé napätie aspoň 5 meraní.

Pomôcka:

- Aby ste mali guľôčky neustále vo zvislom pohybe použite amplitúdu napätia na svorke *speaker amplitude* (6) vyššia ako **0,7 V**. Začnite najprv s pozorovaním správania sa častíc pri pomalom zvyšovaní napätia bez počítania guľôčok. Je možné, že niektoré guľôčky sa prilepia elektrostáticky na dno. Také guľôčky nerátajte.

<b>A.1</b>	Zapíš svoje merania počtu guľôčok $N_1$ a $N_2$ v obidvoch poloviciach valca pre rôzne amplitúdy $A_D$ do <b>tabuľky A.1</b> .	1.2pt
<b>A.2</b>	Vypočítajte štandardnú (smerodajnú) odchýlku vašich meraní $N_1$ a $N_2$ a uveďte svoje výsledky do <b>tabuľky A.1</b> . Zostrojte závislosti $N_1$ a $N_2$ ako funkciu zobrazovanej amplitúdy $A_D$ do <b>grafu A.2</b> , ako aj ich odchýlky (error bar).	1.1pt
<b>A.3</b>	Na základe vášho grafu určte kritickú zobrazovanú amplitúdu $A_{D,crit}$ , pri ktorej sú si počty guľôčok $N_1$ a $N_2$ rovné po dostatočne dlhom čase ustálenia stacionárneho stavu.	1pt

## Časť B: Kalibrácia (3,2 bodu)

Zobrazovaná amplitúda  $A_D$  odpovedá napätiu na reproduktore. Avšak fyzikálne zaujímavou veličinou je amplitúda  $A$  kmitov membrány reproduktora. Táto veličina hrá rozhodujúcu úlohu pri tom, ako silno sú guľôčky excitované. Aby ste ju určili potrebujete kalibrovať zobrazovanú amplitúdu napätia  $A_D$ . Aby ste určili amplitúdu  $A$  môžete použiť ľubovoľne pomôcky a náradie, ktoré máte k dispozícii.

<b>B.1</b>	Nakreslite svoje experimentálne zariadenie, ktoré používate na meranie amplitúdy excitácie $A$ (v <b>mm</b> ), t.j. amplitúdy membrány reproduktora počas jedného kmitu.	0.5pt
<b>B.2</b>	Určte amplitúdu $A$ v <b>mm</b> pre dostatočný nameraný počet bodov, tj. zmerajte amplitúdu kmitov $A$ ako funkciu zobrazovanej amplitúdy napätia $A_D$ a merania zapíšte do <b>tabuľky B.2</b> , ako aj ich neurčitosti.	0.8pt
<b>B.3</b>	Zostrojte <b>graf B.3</b> z nameraných dát v úlohe <b>B.2</b> vrátane neurčitostí merania (error bar).	1.0pt

**B.4** Určte parametre priamky, ktorú ste preložili nameranými bodmi a určte kalibračnú funkciu  $A(A_D)$ . 0.8pt

**B.5** Určte kritickú amplitúdu excitácie  $A_{\text{crit}}$  guľôčok (makových zrníčok). 0.1pt

### Časť C: Kritický exponent (3,5 boda)

V našom modeli teplota odpovedá vstupnej kinetickej energii excitácie. Táto energia je úmerná druhej mocnine rýchlosti membrány reproduktora, tj.  $v^2 = A^2 f^2$ , kde  $f$  je frekvencia kmitania membrány reproduktora. Teraz budete študovať túto závislosť, aby ste mohli určiť exponent  $b$  mocninového zákona parametra usporiadania opísaného **rovniciou (1)**.

**C.1** "Nerovnováha" daná vzťahom  $\left| \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right|$  sa javí ako dobrý kandidát na parameter usporiadania v našom modeli. Táto veličina je rovná nule nad kritickou amplitúdou a rovná **1** pre malé excitácie. Určte tento parameter usporiadania ako funkciu amplitúdy  $A$ . Svoje výsledky zapíšte do **tabuľky C.1**. 1.1pt

**C.2** Vyneste graf závislosti nerovnováhy  $\left| \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right|$  ako funkcie  $|A_{\text{crit}}^2 - A^2|$ , **Graph C.2**, 1pt kde obidve osi sú logaritmické (log-log graf). Môžete použiť **Table C.1** pre svoje výpočty. Body grafu nevyzerajú, že by boli na priamke, ale napriek tomu použite lineárnu regresiu na prispôbenie vzťahu s kritickým exponentom.

**C.3** Určte exponent  $b$  a odhadnite jeho neurčitosť. 1.4pt