

Skákající kuličky - model fázových přechodů a nestabilit (10 bodů)

Pozorně si přečti obecné pokyny ve zvláštní obálce, než začneš s řešením této úlohy.

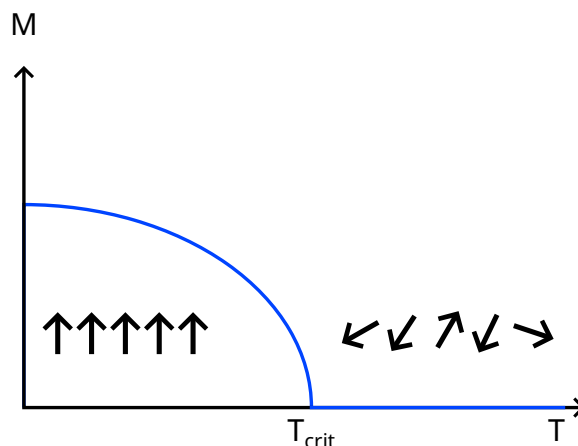
Úvod

Fázové přechody jsou dobře známé z každodenního života, např. znáte vodu ve stavu ledu, kapaliny a vodní páry. Tyto různé stavy jsou od sebe odděleny fázovými přechody, při kterých se mění kolektivní chování molekul v materiálu. Fázový přechod je vždy spojen s určitou přechodovou teplotou, při které ke změně dochází, tedy teplotou varu a teplotou tuhnutí vody v předchozím příkladu.

Fázové přechody jsou nicméně širším pojmem, než jen změna skupenství, a vyskytují se i v jiných systémech jako jsou magnety nebo supravodiče, kdy se pod určitou přechodovou teplotou mění makroskopický stav z paramagnetického na feromagnetický nebo se z normálního vodiče stává supravodič.

Všechny tyto fázové přechody lze popsat jednotným způsobem zavedením tzv. parametru uspořádání. Např. v teorii magnetismu je parametr uspořádání spojen s uspořádáním magnetických momentů atomů a jejich vlivem na makroskopickou magnetizaci.

V případě tzv. spojitého fázového přechodu je parametr uspořádání vždy roven nule nad přechodovou teplotou a pod ní spojitě roste, jak je můžete vidět na obr. 1 níže. Přechodová teplota je v případě spojitého fázového přechodu nazývána teplotou kritickou. V obrázku je také schematicky znázorněna mikroskopická orientace magnetických momentů v případě magnetu. Jednotlivé magnetické momenty jsou rovnoběžné ve feromagnetickém stavu a vytváří tak makroskopickou magnetizaci, zatímco v paramagnetickém stavu je výsledný vektor makroskopické magnetizace nulový.



Obrázek 1: Schematický náčrt závislosti parametru uspořádání M na teplotě při fázovém přechodu. Pod kritickou teplotou T_{crit} roste parametr uspořádání, je tedy nenulový, zatímco je nulový pro teploty nad T_{crit} .

V případě spojitého fázového přechodu je pozorováno, že blízko fázového přechodu lze parametr uspořádání obecně popsat mocninným zákonem, např. v magnetismu je magnetizace M pod kritickou teplotou

T_{crit} dána vztahem:

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

kde T značí teplotu. Co je ještě více překvapivé je, že takovéto chování je univerzální: exponent této mocninné závislosti je stejný pro spoustu různých druhů fázových přechodů.

Úkol

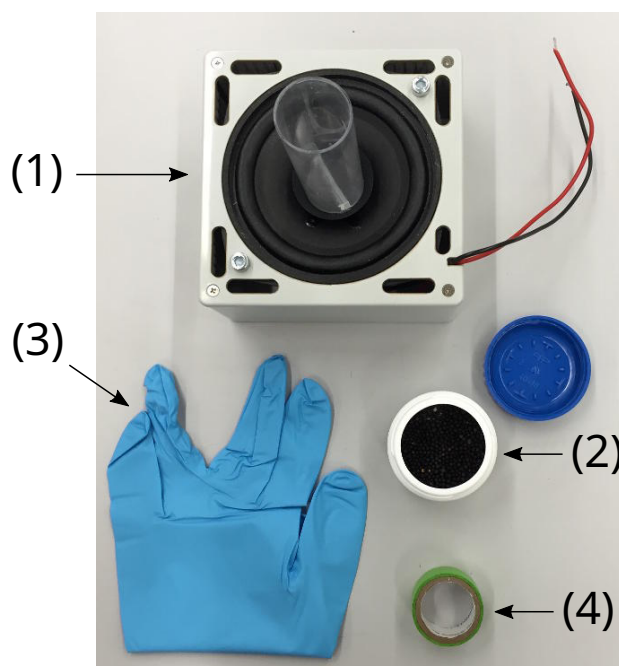
Budeme studovat jednoduchý příklad a pomocí něho budeme vyšetřovat vlastnosti spojitých fázových přechodů. Např. jak nestabilita vede ke kolektivnímu chování částic a tedy k fázové změně nebo jak makroskopické změny závisí na excitaci částic.

Při běžných fázových přechodech je tato excitace obvykle určena teplotou. V našem příkladě spočívá excitace v kinetické energii částic urychlovaných reproduktorem. Makroskopická změna odpovídající fázové změně, kterou zde budeme studovat, spočívá v uspořádání kuliček do jedné poloviny válce, která je od druhé části oddělena nízkou přepážkou.

Zvyšováním amplitudy reproduktoru ze stavu, ve kterém jsou částice uspořádány v jedné polovině válce, nakonec docílíte stavu, ve kterém budou částice rozděleny rovnoměrně do obou polovin. Toto odpovídá přechodu přes kritickou teplotu.

Vaším úkolem je stanovit kritický exponent zde studovaného modelu fázového přechodu.

Pomůcky



Obrázek 2: Další pomůcky pro tento experiment.

1. Sestava reproduktoru s platovým válcem připevněným na povrchu
2. Asi 100 ks. makových zrníček (v plastové nádobce)
3. Rukavice
4. Lepicí páska

Důležitá upozornění

- Nijak netlačte z boku na platový válec připevněný na reproduktor. Nikdo vám už nikdy nedá náhradní kousek, i když si třeba protrhnete membránu reparačku nebo utrhnete váleček.
- Vypínejte reproduktor, pokud ho zrovinka nepoužíváte, budete šetřit baterii.
- V tomto experimentu použijete 4 Hz signál pilovitého tvaru na zdířkách signálového generátoru pro připojení k reproduktoru, zdířky najdete na boční straně signálového generátoru.
- Amplitudu pilovitého signálu lze nastavovat pomocí pravého potenciometru označeného *speaker amplitude* (4). Stejnoseměrné napětí úměrné amplitudě signálu je na výstupu monitorovací zdířky *speaker amplitude* (6) (vůči zdířce uzemnění *GND* (7)). Uvedená čísla v závorkách odkazují na fotečku signálového generátoru v obecných pokynech (obr. 2).
- Membrána reproduktoru je velmi náchylná k poškození. Dávejte pozor při manipulaci, netlačte na ni ani ve svislém ani ve vodorovném směru.

Část A. Kritická amplituda excitace (3,3 bodů)

Než začneš s řešením konkrétních úkolů této úlohy, připoj reproduktor ke zdíčkám na boku signálového generátoru (dávej bacha na polaritu). Nasyp několik (třebas 50) makových zrníček do válce upevněného na reproduktoru a pomocí kousku prstu ustřiženého z poskytnuté gumové rukavice a případně lepicí pásky válec na vršku uzavři, aby maková zrníčka z válce nevytáhla. Zapni excitaci pomocí vypínače a šroubovákem měň amplitudu reproduktoru otáčením pravého potenciometru označeného *speaker amplitude* (4). Pozoruj rozdělení kuliček při různých amplitudách.

Prvním úkolem je určení kritické amplitudy excitace tohoto přechodu. Budeš holt muset sprostým počítáním určovat počet kuliček N_1 a N_2 v obou přihrádkách válce (očísľuj si přihrádky válce tak, aby platila nerovnost $N_1 \leq N_2$) jako funkci zobrazované amplitudy A_D , což je napětí měřené na zdířce *speaker amplitude* (6). Toto napětí je přímo úměrné amplitudě pilovitého průběhu signálu, který pohybuje reproduktorem. Pro každé napětí udělejte nejméně 5 měření počtu částic.

Hint:

- Abys měl neustále své částice v pohybu, používej výhradně amplitudy odpovídající napětí na zdířce *speaker amplitude* převyšující 0.7 V. Začni se sledováním chování systému při pomalé změně napětí bez počítání kuliček. Může se stát, že se ti některá z kuliček elektrostaticky přilepí na dno válce. Takovéto kuličky nepočítej.

A.1	Zapiš svá měření počtu částic N_1 a N_2 v obou polovinách válce pro různé amplitudy A_D do tabulky A.1 .	1.2pt
------------	---	-------

A.2	Vypočti směrodatnou odchylku svých měření N_1 a N_2 a uveď své výsledky do tabulky A.1 . Vynes závislost N_1 a N_2 na zobrazované amplitudě A_D do grafu A.2 , společně s jejich odchylkami.	1.1pt
------------	--	-------

A.3	Ze svého grafu urči kritickou zobrazovanou amplitudu $A_{D,crit}$, pro kterou platí $N_1 = N_2$ poté, co počkáš na nastolení stacionárního stavu.	1pt
------------	--	-----

Část B. Kalibrace (3,2 bodů)

Zobrazovaná amplituda A_D odpovídá napětí na reproduktoru. Nicméně, fyzikálně zajímavá veličina je maximální výchylka A , jednoho kmitu reproduktoru, tedy od jedné krajní polohy do druhé. Právě tato vzdálenost odpovídá tomu, jak silně jsou kuličky excitovány. Je tedy potřeba kalibrovat zobrazovanou amplitudu. Musíš si poradit s poskytnutými pomůckami a nářadím, abys tuto vzdálenost změřil.

B.1	Načrtni experimentální složení, které používáš k měření amplitudy excitace, tj. maximální vzdálenosti A (v mm), kterou urazí bod na membráně reproduktoru během jednoho kmitu.	0.5pt
------------	--	-------

B.2	Změřte amplitudu A v mm pro vhodný počet datových bodů, tj. změřte amplitudu A jako funkci zobrazované amplitudy A_D a zapište svá měření do tabulky B.2 , a určete chybu svých měření.	0.8pt
------------	--	-------

B.3	Vyneste své měření do grafu B.3 , včetně chyb měření.	1.0pt
------------	--	-------

B.4 Určete parametry křivky, kterou jste proložili váš graf a запиšte kalibrační funkci $A(A_D)$. 0.8pt

B.5 Určete kritickou amplitudu excitace A_{crit} makových zrníček. 0.1pt

Část C. Kritický exponent (3,5 bodíku)

V našem modelu odpovídá teplota vstupní kinetické energii excitace. Tato energie je přímo úměrná kvadrátu rychlosti reproduktoru, tj. $v^2 = A^2 f^2$, kde f je frekvence kmitání. Budeme nyní studovat tuto závislost a určíme exponent b mocninného zákona určujícího chování parametru uspořádání (viz rovnice 1).

C.1 "Nerovnovážnost" daná vztahem $\left| \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right|$ je dobrým kandidátem na parametr uspořádání našeho systému. Tato veličina je rovna nule nad kritickou amplitudou a rovna 1 pro malé excitace. Určete tento parametr uspořádání jako funkci amplitudy A . Zapište své výsledky do **tabulky C.1**. 1.1pt

C.2 Vyneste nerovnovážnost $\left| \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right|$ jako funkci $|A_{\text{crit}}^2 - A^2|$, do **grafu C.2**, ve kterém mají obě osy logaritmickou stupnici (log-log graf). Pro své výpočty můžete použít **tabulku C.1**. Body v grafu nemusí vypadat tak, že splňují lineární závislost, nicméně použijte lineární regresi v tomto grafu, abyste získali vztah pro kritický exponent. 1pt

C.3 Určete exponent b a odhadněte chybu měření. 1.4pt