

# Posudek práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě  
Univerzity Karlovy

- |  |  |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> posudek vedoucího | <input checked="" type="checkbox"/> posudek oponenta |
| <input type="checkbox"/> bakalářské práce  | <input checked="" type="checkbox"/> diplomové práce  |

Autor/ka: Bc. Maximilián Goleňa

Název práce: Detekce kvantovaných vírů v limitě nulové teploty pomocí  
křemíkových/supravodivých mikrodrátků

Studijní program a obor: Fyzika, Fyzika kondenzovaných soustav a materiálů

Rok odevzdání: 2023

Jméno a tituly vedoucího/opponenta: doc. Mgr. Jaroslav Kohout, Dr.

Pracoviště: Katedra fyziky nízkých teplot

Kontaktní e-mail: kohout@mbox.troja.mff.cuni.cz

## Odborná úroveň práce:

- vynikající  velmi dobrá  průměrná  podprůměrná  nevyhovující

## Věcné chyby:

- téměř žádné  vzhledem k rozsahu přiměřený počet  méně podstatné četné  závažné

## Výsledky:

- originální  původní i převzaté  netriviální kompilace  citované z literatury  opsané

## Rozsah práce:

- veliký  standardní  dostatečný  nedostatečný

## Grafická, jazyková a formální úroveň:

- vynikající  velmi dobrá  průměrná  podprůměrná  nevyhovující

## Tiskové chyby:

- téměř žádné  vzhledem k rozsahu a tématu přiměřený počet  četné

## Celková úroveň práce:

- vynikající  velmi dobrá  průměrná  podprůměrná  nevyhovující

### **Slovní vyjádření, komentáře a připomínky oponenta:**

Diplomová práce Bc. Maximiliána Goleni je zaměřena na možnosti studia kvantové turbulence v supratekutém heliu při teplotách 20 mK – 920 mK pomocí mikroskopických elektro-mechanických oscilátorů. Oscilátory byly testovány nejprve ve vakuu, kde vykazovali nelineární chování. Na základě rezonančních experimentů bylo prokázáno, že hliníková vrstva MEMS je při teplotě 20 mK ve slabém magnetickém poli 12,6 mT supravodivá, ale při vyšších teplotách a magnetických polích přechází do normálního (rezistivního) stavu. V supratekutém heliu byl při teplotě 20 mK pozorován silný útlum rezonančního pohybu mikroskopických elektro-mechanických oscilátorů vlivem kvantové turbulence, která je generována vlastním pohybem oscilátorů.

Bc. Maximilián Goleňa prokázal praktické i teoretické znalosti z oboru fyziky nízkých teplot, dokázal zanalyzovat a interpretovat původní experimentální výsledky na rezonujících mikroskopických elektro-mechanických oscilátorech. Při řešení diplomové práce prokázal samostatnost jednak při realizování náročných nízkoteplotních experimentů, ale také při analýze a interpretaci experimentálních dat. Bohužel celková úroveň diplomové práce utrpěla velkým množstvím zejména tiskových chyb, viz příloha. Diplomovou práci tedy navrhuji hodnotit stupněm velmi dobře.

### **Případné otázky při obhajobě a náměty do diskuze:**

- 1) Řešení (1.30) rovnice pro tlumený lineární harmonický oscilátor (1.29) je řešení v ustáleném stavu. Jaké je obecné řešení rovnice (1.29)? Jaký je odhad času, který potřebují jednotlivé elektromechanické oscilátory po zapnutí hnacího proudu na ustálení pohybu ve vakuu a v He II?
- 2) V tab. 2.2 uvádíte rozměry a hmotnosti použitých mikroskopických elektro-mechanických oscilátorů. G1R má na první pohled větší objem než G1L, neměl by mít tedy za předpokladu, že jsou ze stejného materiálu, i větší hmotnost?
- 3) Kde je měřena teplota během experimentu? Na obrázku experimentálního uspořádání (obr. 2.4) není zřejmé, kde je umístěn teploměr. Nemůže při experimentech ve vakuu vznikat teplotní gradient mezi pozicí oscilátorů G1L(G1R) a pozicí G3R?
- 4) Zkoušeli jste měřit odezvu mikroskopických elektro-mechanických oscilátorů i na vyšších harmonických frekvencích, které by měli být citlivé na odchylky od sinusového (harmonického) průběhu rychlosti pohybu?
- 5) Byla v obrázku 4.8 oproti obrázku 4.7 korigována velikost magnetického pole vzhledem k radiačnímu štítu z nerezové oceli 304? Stejně pro všechny MEMS, nebo pro G3R o jinou hodnotu vzhledem k jiné poloze v experimentálním zařízení?
- 6) Jaký je odhad nejistot v určení fitačních parametrů v tabulce 4.2?
- 7) V tabulce 4.3 uvádíte relativní změny efektivních hmotností MEMS. Není mi jasný diametrální rozdíl v hodnotách uváděných pro G1L a G1R, které mají skoro stejné rozměry, hmotnosti, viz tab. 2.2, a poměr kvadrátů rezonančních frekvencí ve vakuu a v heliu.

### **Práci**

doporučuji

nedoporučuji

uznat jako diplomovou.

### **Navrhuji hodnocení stupněm:**

výborně  velmi dobře  dobře  neprospěl/a

Místo, datum a podpis oponenta:

V Praze dne 6.9.2023

doc. Mgr. Jaroslav Kohout, Dr.

## Příloha k posudku diplomové práce

Tiskové a věcné chyby:

str. 4: „ $\mathbf{v}(\mathbf{x},t)$ “  $\rightarrow v(\mathbf{x},t)$

str. 4, rov. 1.1: „ $\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$ “  $\rightarrow \nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$

str. 4: „... velocity  $\mathbf{v}$  and...“  $\rightarrow$  ...velocity  $\mathbf{v}$  and...

str. 4, rov. 1.2: „ $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ .“  $\rightarrow \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$

str. 4, rov. 1.4 a 1.5: „ $\mathbf{v}$ “  $\rightarrow \mathbf{v}$

str. 5, rov. 1.6: „ $\mathbf{v}$ “  $\rightarrow \mathbf{v}$

str. 6: „where circulation  $\omega$  is  $\nabla \times \mathbf{v}$ .“  $\rightarrow$  where circulation  $\omega$  is  $\nabla \times \mathbf{v}$ .

str. 7, rov. 1.12: „ $\partial_x$ “  $\rightarrow \partial v_x$ , „ $\partial_y$ “  $\rightarrow \partial v_y$

str.8: „...layer. However...“  $\rightarrow$  ...layer. However...

str. 10, rov. 1.18: „ $\mathbf{r}$ “  $\rightarrow \mathbf{r}$ , „ $\Phi$ “  $\rightarrow \Phi$

str. 10: „where  $\mathbf{r}$  is the space vector,  $\Psi$  is the macroscopic phase...“  $\rightarrow$  where  $\mathbf{r}$  is the space vector,  $\Phi$  is the macroscopic phase...

str. 11: nezavedena zkratka „HVBK“: Hall–Vinen–Bekharevich–Khalatnikov

str. 11, rov. 1.20: „ $\mathbf{v}_s$ “  $\rightarrow \mathbf{v}_s$ , „ $\mathbf{T}$ “  $\rightarrow \mathbf{T}$ , „ $\mathbf{F}_{ns}$ “  $\rightarrow \mathbf{F}_{ns}$

str. 11, rov. 1.21: „ $\mathbf{v}_n$ “  $\rightarrow \mathbf{v}_n$ , „ $\mathbf{F}_{ns}$ “  $\rightarrow \mathbf{F}_{ns}$

str. 11: „where  $\mathbf{v}_i$  is the velocity...“  $\rightarrow$  where  $\mathbf{v}_i$  is the velocity...

str. 11: „...and  $\nu_n = \eta / \rho_n$  is the kinematic viscosity...“  $\rightarrow$  ...and  $\nu_n = \eta / \rho_n$  is the kinematic viscosity...

str. 13, rov. 1.25: „ $\Gamma$ “  $\rightarrow \Gamma$

str. 13, rov. 1.26: „ $\Phi$ “  $\rightarrow \Phi$ , „ $\Gamma$ “  $\rightarrow \Gamma$

str. 13: „...macroscopic phase  $\Phi$ ,...“  $\rightarrow$  ...macroscopic phase  $\Phi$ ,...

str. 14, rov. 1.27: „ $\Gamma$ “  $\rightarrow \Gamma$

str. 14: „... $c$  must be  $2\pi q$ .“  $\rightarrow$  ... $c$  must be  $2\pi q$ , where  $q$  is an integer.

str. 14, rov. 1.28: „ $a_0/0$ “  $\rightarrow a_0/a$

str. 14, rov. 1.31: ve jmenovateli reálné a imaginární části „ $(\omega_0^2 - \omega^2)^2$ “  $\rightarrow (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2$

str. 14, rov. 1.31: v čitateli imaginární části „ $\omega(\omega_0^2 - \omega^2)^2$ “  $\rightarrow \omega(\omega_0^2 - \omega^2)$

str. 17: „...is proportional to  $T^{-3}$ ,...“  $\rightarrow$  ...is proportional to  $T^{-3}$ ,...

str. 18, obr. 2.1: chybí popis osy x

str. 20: „Magnet is excited with driving AC electrical current  $I$ .“  $\rightarrow$  MEMS is excited with driving AC electrical current  $I$ .

str. 20: „This gradual change can be explained by the gradual rise of the aluminium film on the micro-chip.“  $\rightarrow$  This gradual change can be explained by the gradual rise of the aluminium film on the silicon micro-chip.“

str. 20, tab. 2.2: „ $l$  - length of the beam“  $\rightarrow L$  - length of the beam (viz rovnice 2.2)

str. 21, obr. 2.3: „Electrical scheme of a microchip with wires G1L and G1L.“  $\rightarrow$  Electrical scheme of a microchip with wires G1L and G1R.

str. 23: „... down to  $T \approx 20$  mK.“  $\rightarrow$  ... down to  $T \approx 20$  mK., „...vacuum in  $B = 13$  mT.“  $\rightarrow$  ...vacuum in  $B = 13$  mT., „...field to  $B = 63$  mT,...“  $\rightarrow$  ...field to  $B = 63$  mT,...

str. 24: „ $t_w = 80$  s“  $\rightarrow t_w = 80$  s, „ $\Delta f$ “  $\rightarrow \Delta f$ , „ $T = 500$  mK“  $\rightarrow T = 500$  mK, „ $B = 12.6$  mT“  $\rightarrow B = 12.6$  mT, „ $B = 63$  mT“  $\rightarrow B = 63$  mT, „ $T = 20$  mK“  $\rightarrow T = 20$  mK, „ $B = 9.45$  mK“  $\rightarrow B = 9.45$  mT

str. 24: „Insert shows the resonance curve for the three lowest drives.“  $\rightarrow$  Insert shows the resonance curve for the three lowest driving voltages.

str. 26-29, obr. 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10: „ $B$ “  $\rightarrow B$ , „ $T$ “  $\rightarrow T$

str. 27, obr. 3.5: Ve vloženém grafu pro G1R neodpovídá barva nejvyšší rezonanční křivky legendě a rozsah x-osy není jednoznačný (uvedena pouze jedna hodnota).

str. 27, obr. 3.5, pro G3R: popis y-osy: „ Voltage [Hz]” → Voltage [ $V_{\text{rms}}$ ]

str. 27, obr. 3.5, pro G1L: Rozsah x-osy není jednoznačný (uvedena pouze jedna hodnota).

str. 29, obr. 3.9: „...at  $B = 63\text{mT}$  and  $T = 20\text{ mK}$ “ → ...at  $B = 63\text{mT}$  and  $T = 20\text{ mK}$  in vacuum.

str. 29, obr. 3.10: „ $T = 20\text{ mK}$ ,  $B = 12.6\text{ mT}$ “ →  $T = 20\text{ mK}$ ,  $B = 9.45\text{ mT}$

str. 30: „...magnetic field  $B = 63\text{ mT}$ ,...” → ...magnetic field  $B = 63\text{ mT}$ ,

str. 30, obr. 4.1, legenda: „baseT“ →  $20\text{ mK}$ , „ $B = 12.6\text{ mT}$ ,...” →  $B = 12.6\text{ mT}$

str. 31, obr. 4.2: „ $B = 12.6\text{ mT}$ ,...” →  $B = 12.6\text{ mT}$ , „ $B = 63\text{ mT}$ ,...” →  $B = 63\text{ mT}$

str. 31: „...using  $U_{\text{amp}} = U_{\text{rms}}/\sqrt{2}$ .“ → ...using  $U_{\text{amp}} = U_{\text{rms}}/\sqrt{2}$ ., „...at  $T = 20\text{ mK}$ ...” → at  $T = 20\text{ mK}$

str. 32, obr. 4.3, popis y-osy: „Speed amplitude [m/s]” → Speed amplitude  $\cdot 10^7(10^6)$  [m/s],  
“...driven by  $V = 500\text{mK}$  for drives  $U = 2.98\text{ V}$  (left) and  $U = 7\text{ V}$  (right)...” → ...driven by  $T = 500\text{mK}$  for driving voltages  $U = 2.98\text{ V}$  (left) and  $U = 7\text{ V}$  (right)...

str. 32: „... peak at  $V = 7 V_{\text{rms}}$  did...” → ... peak at  $U = 7 V_{\text{rms}}$  did..., „ $T = 20\text{ mK}$ “ →  $T = 20\text{ mK}$

str. 32: „...for G1L and G1R in  $12\text{ mT}$  fields only  $10\text{ Hz}$ , but for fields they broaden to  $26\text{ mT}$  and more. For G3R we can see that in lowest field its width is  $40\text{ Hz}$ .” → ...for G1L and G1R in  $12\text{ mT}$  fields only  $\sim 10\text{ mHz}$ , but for  $63\text{ mT}$  fields they broaden to  $\sim 26\text{ mHz}$  and more. For G3R we can see that in lowest field its width is  $40\text{ mHz}$ .

str. 33: „...displacement  $x$ ,...” → ...displacement  $x_{\text{amp}}$ ,... (viz rov. 4.2)

str. 33, obr. 4.4: „...for driving voltage  $V = 7\text{ V}$  in  $T = 500\text{ mK}$ .” → ...for driving voltage  $U = 7\text{ V}$  in  $T = 500\text{ mK}$ .

str. 34, obr. 4.5, 4.6: „...at  $B = 12\text{ mT}$  (cyan)...” → ...at  $B = 12\text{ mT}$  (cyan)...

str. 35: „...field  $B = 12.6\text{ mT}$  all...” → ...field  $B = 12.6\text{ mT}$  all..., “...for the highest driving current,  $V = 2.33\text{ V}$ ,...” → ...for the highest driving voltage,  $U = 2.33\text{ V}$ ,...

str. 36, tab. 4.1: „ $V_{\text{crit}}[\text{V}]$ “ →  $U_{\text{crit}}[\text{V}]$ , „ $v_{\text{crit}}[\text{mm/s}]$ “ →  $v_{\text{crit}}[\text{mm/s}]$

str. 36, obr. 4.7: „ $T = 20\text{ mK}$ “ →  $T = 20\text{ mK}$ , „ $B = 12.6\text{ mT}$ ” →  $B = 9.45\text{ mT}$ , “ $I = 1.4\text{ }\mu\text{A}$ ” →  $I = 1.4\text{ }\mu\text{A}$ , „ $B = 9.45\text{ mT}$ ” →  $B = 9.45\text{ mT}$

str. 36: “...driving currents  $0.99\text{ V}$  and  $2.33\text{ V}$ .” → ...driving voltages  $0.99\text{ V}$  and  $2.33\text{ V}$ .

str. 37, obr. 4.8: „...as a function of driving voltage for measurement in vacuum (full symbols) and in He II(empty symbols) at the same temperature  $T = 20\text{ mK}$ .” → ...as a function of driving force for measurement in vacuum (empty symbols) and in He II (full symbols) at the same temperature  $T = 20\text{ mK}$ .

str. 37 „This behavior lets us estimate critical velocities of MEMS and afterwards (using Equation 2.3) determine critical velocities.” → This behavior lets us estimate critical velocities of MEMS and afterwards (using Equation 2.3) determine critical voltages.

str. 37, obr. 4.8 legenda: “He II,  $T = 20\text{ mK}$ ,  $B = 1.9\text{ mT}$ ” → He II,  $T = 20\text{ mK}$ ,  $B = 9.45\text{ mT}$

str. 37: „...as a function of driving voltage for measurement in vacuum (full symbols) and in He II(empty symbols) at the same temperature  $T = 20\text{ mK}$ .” → ...as a function of driving force for measurement in vacuum (empty symbols) and in He II (full symbols) at the same temperature  $T = 20\text{ mK}$ .

str. 38: “Value of constant  $\beta$  can be determined as  $0.53$ .” – chybí odkaz na literaturu

str. 38: “Hypothesis of quantum turbulence also supports the increase of resonance line width of MEMS from  $10$  to  $25\text{ Hz}$  for G1L and G1R wire.” → Hypothesis of quantum turbulence also supports the increase of resonance line width of MEMS from  $10$  to  $25\text{ mHz}$  for G1L and G1R wire.(viz obr. 4.7)

str. 38: “Mass of MEMS  $m$  is provided in Table 2.2.” → Mass of MEMS  $m_{\text{vac}}$  is provided in Table 2.2.

str. 39, tab. 4.3: “ $\Delta m_{\text{eff}}/m_{\text{eff}}$ ”  $\rightarrow$   $\Delta m_{\text{eff}}/m_{\text{eff}}$

str. 40, rov. 4.8: “ $d^2 x/dx^2$ ”  $\rightarrow$   $d^2 X/dz^2$

str. 41: “ $B = 0$ ”  $\rightarrow$   $B = 0$ , “ $I_c = 0$ ”  $\rightarrow$   $I_c = 0$ , “ $T_c = 1.175 \text{ K}$ ”  $\rightarrow$   $T_c = 1.175 \text{ K}$

str. 44: v citaci [1] nevedeno: In book: Cold Chemistry (pp.Low Energy and Low Temperature Molecular Scattering), Publisher: Royal Society of Chemistry, Editors: A. Osterwalder, O. Dulieu

str. 44: v citaci [4] nevedeno: PhD thesis, Printed by: Ponsen & Looijen B.V., Wageningen, November 2008, ISBN: 978-90-367-3651-0 Printed version, ISBN: 978-90-367-3652-7 Electronic version

str. 44: v citaci [7] nevedena strana: 130-148

str. 44: v citaci [10] nevedeno: Editors: Jyeshtharaj Joshi, Arun K. Nayak, Paperback ISBN: 9780081023372, eBook ISBN: 9780081023389

str. 44: v citaci [11] nevedeno: 296 pp. ISBN 0 521 45713 0. Journal of Fluid Mechanics, 317, 407-410. doi:10.1017/S0022112096210791

str. 44: v citaci [13] nevedeno: Vol 6 (Course of Theoretical Physics), eBook ISBN: 9781483161044

str. 45: v citaci [16] má být: Alyaa Adel Mahmoud, Superfluidity properties of  $^4\text{He}$  using rotating interacting condensate boson as a quantum simulator, Ms.C. thesis, Faculty of Science El-Minia University El-Minia, Egypt, November 6, 2018

str. 45: v citaci [22] nevedeno číslo článku: 134520

str. 45: v citaci [28] nevedeno: Bachelor Thesis, MFF UK, Prague

str. 45: v citaci [31] nevedeno: 2D Mater. 8 042001, DOI 10.1088/2053-1583/ac152c

str. 45: v citaci [33] nevedeno: J. Phys. Colloques 49 (1988) C8-113-C8-114, DOI: 10.1051/jphyscol:1988843