



## Závazná osnova pre základný výskum

Maximálny rozsah záväznej osnovy je 20 strán

Názov projektu	<b>Frustrované kovové magnetické systémy</b>
Zodpovedný riešiteľ	<b>doc. RNDr. Slavomír Gabáni, PhD.</b>
Žiadateľ	<b>Ústav experimentálnej fyziky SAV</b>
Štatutárny/i zástupca/ovia žiadateľa	<b>doc. RNDr. Peter Kopčanský, CSc.</b>

### 1. Aktuálnosť a vedeckosť cieľov, vedecká úroveň a kvalita projektu

- Definujte mieru aktuálnosti riešeného problému v danej oblasti vedy a techniky, z celosvetového pohľadu vrátane relevantných odkazov na odbornú literatúru
- Definujte vedeckú úroveň projektu a vedeckosť metód využívaných v riešení projektu
- Definujte ciele projektu a reálnosť ich dosiahnutia
- Opíšte navrhovanú metodiku riešenia projektu, opodstatnenosť jej výberu a efektívnosť jej použitia z hľadiska splnenia deklarovaných cieľov

voľný text

↓↓↓

#### **Aktuálnosť riešeného problému a vedecká úroveň projektu**

Frustrované magnetické systémy (FMS) patria k veľmi zaujímavým, aktuálnym a aktívne skúmaným objektom fyzikálneho výskumu. Súvisí to so skutočnosťou, že v dôsledku špecifickej kryštálovej štruktúry a konkurenčným výmenným interakciám pôsobia na magnetické momenty v týchto štruktúrach sily, ktorým tieto momenty nie sú schopné súčasne vyhovieť. Táto skutočnosť (frustrácia) zabraňuje vzniku magnetického usporiadania a vedie k degenerácii základného stavu, t.j. k vytváraniu viacerých stavov s tou istou energiou. Najjednoduchším príkladom frustrovaného systému sú magnetické spiny umiestnené v rohoch rovnostranného trojuholníka, medzi ktorými je rovnaká antiferomagnetická (AF) výmenná interakcia. Frustrované magnetické systémy však možno nájsť aj v trojrozmerných štruktúrach akými sú napr. mriežky pyrochlórové (pozostávajúce z rovnostranných štvorstenov vzájomne spojených prostredníctvom ich vrcholov) a mriežky fcc (pozostávajúce z rovnostranných štvorstenov vzájomne pospájaných cez ich hrany). K významným úspechom štúdia FMS patrí pozorovanie nových magnetických štruktúr resp. stavov v látkach, akými sú napr. spinový ľad, kvantová spinová kvapalina, analógia magnetických monopólov a pod. (viď. napr. [1-3]). Značnú pozornosť pri štúdiu FMS vyvolalo tiež pozorovanie rôznych zlomkových magnetizačných plató v dvojrozmerných frustrovaných tzv. Shastryho-Sutherlandových mriežkach (SSL) na báze magnetických momentov  $\text{Cu}^{2+}$  iónov v zlúčenine  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$  [4].

Ako bolo vyššie uvedené, frustrácia "bráni" vzniku magnetického usporiadania, a tak z pohľadu aplikácií vedie v magnetických systémoch k zvýšeniu ich magnetokalorického javu (tento jav súvisí s pohlcovaním resp. uvoľňovaním tepla pri zmene vonkajšieho magnetického poľa), čo môže nájsť uplatnenie pri hľadaní nových materiálov pre chladenie metódou adiabatckej demagnetizácie [5, 6]. Nedávno sa objavila zaujímavá informácia v súvislosti s

perspektívnymi aplikáciami frustrovaných magnetických systémov v prácach [7, 8], v ktorých autori teoreticky ukázali, že v anizotropných FMS môže vznikať tzv. "nový typ skyrmionov" (skyrmiony - magnetické víry o rozmeroch niekoľkých nm nesúce kvantum magnetického toku), ktoré by mali mať veľmi dobré predpoklady pre vytváranie / konštrukciu nového typu magnetických pamäťových jednotiek.

Súčasne je potrebné zdôrazniť, že doterajšie štúdium FMS, ako teoretické tak aj experimentálne, bolo a je sústredené hlavne na dielektrické systémy, v ktorých je možné interakciu medzi jednotlivými lokalizovanými magnetickými momentmi systému relatívne dobre definovať a popísať. Súvisí to s tým, že v kovových frustrovaných magnetických systémoch (K-FMS), t.j. v systémoch s voľnými / itinerantnými elektrónmi, už výmenná interakcia medzi magnetickými momentmi nemôže byť redukovaná iba na interakciu s najbližšími susedmi. V K-FMS totiž významnú úlohu zohráva ďaleko-dosahová nepriama výmenná interakcia medzi magnetickými iónmi sprostredkovaná vodivostnými elektrónmi (interakcia typu RKKY), ktorá má oscilujúci charakter. Táto skutočnosť môže viesť na jednej strane k destabilizácii frustrácie (t.j. k "úniku" systému z frustrovaného stavu), na strane druhej však tiež k vytváraniu nových unikátnych magnetických štruktúr / stavov v kovových FMS [9].

K doteraz nevelkému počtu študovaných K-FMS patria okrem zlúčenín na báze FeCr, ktoré sú uvedené v práci [9], tiež niektoré kovové boridy na báze vzácnych zemín majúce *fcc* (napr. HoB<sub>12</sub>, ErB<sub>12</sub>) resp. SSL (napr. TmB<sub>4</sub>, HoB<sub>4</sub>, ErB<sub>4</sub>) štruktúru, k štúdiu ktorých výrazne prispeli aj niektorí členovia tohto riešiteľského kolektívu. V ďalšej časti stručne popíšeme doposiaľ dosiahnuté výsledky na týchto zlúčeninách a z nich vyplývajúce ďalšie plány pri skúmaní K-FMS, ktoré sú cieľmi predkladaného projektu.

Čo sa týka štúdia FMS na báze dvojrozmernej SSL mriežky (jej základom sú hranou spojené dvojice frustrovaných rovnostranných trojuholníkov), bolo prekvapením, že takéto vlastnosti vykazujú kovové tetraboridy (TmB<sub>4</sub>, HoB<sub>4</sub>, ErB<sub>4</sub>) majúce trojrozmernú tetragonálnu štruktúru [10, 11]. V najviac študovanom tetraboride TmB<sub>4</sub>, možno pod  $T_N = 11.7$  K pozorovať veľmi komplexný magnetický fázový diagram [11-13]. Magnetizácia  $M$  dosahuje v usporiadanom AF stave pri orientácii magnetického poľa  $H$  v smere ľahkej osi "c" hodnotu nasýtenia  $M_S$  pri  $H \approx 40$  kOe. V poľových závislostiach  $M(H)$  pod  $T_N$  však navyše možno pozorovať platá s hodnotou  $M/M_S \approx 1/9, 1/7, 1/6, \dots$  a hlavné magnetizačné plató s hodnotou  $M/M_S \approx 1/2$ . Tieto prekvapujúce a fascinujúce závislosti, a teoreticky rôzne vysvetľované platá [14-19], poukazujú na pásovú (tzv. "stripovú") doménovú štruktúru rovnobežnú s osou "c" a súčasne na nerovnovážnu dynamiku magnetizácie magnetických momentov Tm<sup>3+</sup> iónov.

Otvorenými pritom stále zostávajú viaceré závažné problémy, ktoré súvisia s hlbším pochopením týchto SSL frustrovaných štruktúr v K-FMS, medzi ktoré patria napr. vplyv vysokého tlaku na vzájomnú interakciu medzi magnetickými momentmi, a tým aj na ich magnetickú štruktúru; vplyv dynamiky (rýchlosti zmeny) vonkajšieho magnetického poľa na pozorované magnetizačné platá; štúdium anizotropie ich magnetických, elektrických a tepelných vlastností a s tým súvisiaci tzv. rotačný magnetokalorický jav; vplyv legovania na frustráciu v týchto systémoch, na ich magnetické a iné vlastnosti; a v neposlednom rade štúdium magnetických excitácií.

Štúdium dodekaboridov vzácnych zemín (REB<sub>12</sub>), ktoré patria ku K-FMS na báze *fcc* mriežky, ukázalo, že ich elektrónová ale najmä magnetická štruktúra je pomerne zložitá. Pri jej formovaní hrajú okrem trojrozmernej geometrickej frustrácie *fcc* mriežky úlohu tiež ďaleko-dosahová RKKY interakcia, dipól-dipólová interakcia a elektrické kryštálové pole [20, 21]. Napr. štúdium HoB<sub>12</sub> ukázalo [22], že pod teplotou usporiadania,  $T_N = 7.4$  K, a v poliach do 80 kOe vykazuje táto zlúčenina tri magnetické fázy. Základným usporiadaním je nesúmerateľná amplitúdovo modulovaná fáza s propagačným vektorom  $(1/2 \pm \delta, 1/2 \pm \delta, 1/2 \pm \delta)$ , pričom aj nad  $T_N$  bolo pozorované usporiadanie na krátku vzdialenosť [22]. Merania magnetorezistancie do  $T = 0.2$  K poukazujú na kritický bod v okolí 83 kOe [23]. Na druhej strane, vplyv rastúcej koncentrácie nemagnetického lutécia,  $x(\text{Lu})$ , ktorý nahrádza magnetické

holmium Ho, vedie k zániku magnetického usporiadania a frustrácie až pri  $x(\text{Lu}) \approx 90\%$  [23]. Navyše bolo nedávno ukázané, že na transportné, magnetické a tepelné vlastnosti  $\text{REB}_{12}$  a ich tuhých roztokov výrazne vplyva spôsob kmitov iónov  $\text{RE}^{3+}$  v kletke tvorenej 24-mi najbližšími atómami bóru (sférický komplex  $\text{B}_{24}$ ), ktorá zvyčajne obsahuje 1 - 3 % vakancií resp. iných porúch v bórovej podmriežke [24, 25]. Vplyvom týchto porúch dochádza k deformáciám  $\text{B}_{24}$  komplexov a pôvodné kmity  $\text{RE}^{3+}$  iónov v  $\text{B}_{24}$  kletke sa menia na tunelové systémy, ktoré je možné popísať dvoma potenciálovými jamami (TLS - two levels systems), medzi ktorými sa nachádza potenciálová bariéra. Formovanie mnohočasticových tzv. spin-polarónových komplexov v okolí  $\text{RE}^{3+}$  iónov, ktoré pôsobia na okolité voľné elektróny môžu v niektorých systémoch nahradiť vplyv Andersonovej lokalizácie či Kondovho javu [26]. Štúdium magnetických excitácií, anizotropie transportných vlastností ale aj magnetokalorického javu v  $\text{HoB}_{12}$  a v jeho tuhých roztokoch pri nízkych teplotách by preto malo pomôcť hlbšie pochopiť fyzikálne správanie sa týchto frustrovaných dodekaboridov. Zaujímavým (v dôsledku pôsobenia RKKY interakcie) bude tiež štúdium vplyvu vonkajšieho vysokého tlaku na ich vlastnosti a detailný pohľad pomocou spinovo-polarizovaného skenovacieho tunelového mikroskopu (SP-STM) na vznikajúce magnetické štruktúry (napr. skyrmionového typu) v blízkosti porúch resp. prímiesí.

Predkladaný projekt je teda zameraný na fundamentálne otázky týkajúce sa kovových FMS, ktorého riešenie si z experimentálnej stránky bude vyžadovať použitie unikátnych metód skúmania (napr. vysoké tlaky, vysoké magnetické polia, nízke teploty a atomárne rozlíšenie magnetických momentov) a z teoretickej stránky nové prístupy k ich popisu. Na riešení týchto úloh sa budú podieľať hlavne vedeckí pracovníci a doktorandi Centra fyziky veľmi nízkych teplôt Ústavu experimentálnej fyziky SAV a Prírodovedeckej fakulty Univerzity P.J. Šafárika (CFNT), z ktorých viacerí už majú bohaté skúsenosti s experimentálnym výskumom FMS. Tiež k samotnému riešeniu projektu bude použitá existujúca a odskúšaná experimentálna základňa tohto centra, ktorá vyššie požadovanými metodikami (až na metodiku neutrónového rozptylu) disponuje. K experimentom nevyhnutné vysokokvalitné vzorky (aj izotopicky čisté, napr. obsahujúce izotop bóru  $^{11}\text{B}$ ) sú pripravené (boli pripravené v Ústave materiálového výskumu Ukrajinskej akadémie vied v Kyjeve) a na väčšine z nich už boli vykonané úspešné testovacie resp. predbežné merania.

### ***Ciele projektu a realnosť ich dosiahnutia***

#### **Cieľ 1: Vplyv hydrostatického a jednoosového tlaku na K-FMS**

Tento cieľ v prípade hydrostatického tlaku (predpokladáme tlaky do 10 GPa v diamantových komôrkach, ktoré máme v CFNT k dispozícii) súvisí so zvýšením koncentrácie vodivostných elektrónov v K-FMS, a tým aj so zmenou parametrov oscilujúcej výmennej RKKY interakcie medzi magnetickými momentmi. Táto skutočnosť by mala viesť k zmenám resp. narušeniu frustrácie (zmenou koncentrácie elektrónov a zmenou vzdialenosti medzi magnetickými iónmi sa charakter výmennej RKKY interakcie mení), a tým pádom k zmenám v magnetickej štruktúre týchto K-FMS. Ešte výraznejšie by pôvodná frustrácia mala byť ovplyvnená pôsobením jednoosového tlaku, ktorý by mal viesť k narušeniu spárovaných frustrovaných trojuholníkov v SSL štruktúre resp. k narušeniu spárovaných frustrovaných štvorstenov v *fcc* štruktúre. Pôsobením vysokého tlaku by tak mala vzniknúť možnosť kontrolovane narušiť pôvodný dobre definovaný frustrovaný stav a umožniť tak vznik nových magnetických štruktúr. O ich charaktere bude možné získať informácie na základe merania magnetických vlastností v rôznych magnetických poliach. Tento cieľ sa bude týkať K-FMS systémov na báze SSL štruktúry ( $\text{TmB}_4$ ,  $\text{HoB}_4$ ), ako aj systémov na báze *fcc* štruktúry ( $\text{HoB}_{12}$ ,  $\text{ErB}_{12}$ ). Vzorky (monokryštály s vhodnou kryštalografickou orientáciou) potrebné k tomuto výskumu sú k dispozícii. Pripravené a odskúšané sú tiež metodiky umožňujúce experimentálne

študovať vplyv vysokého hydrostatického tlaku, ako aj jednoosového tlaku pri nízkych teplotách.

Cieľ 2: Vplyv rýchlosti zmeny vonkajšieho magnetického poľa na dynamiku magnetickej štruktúry, predovšetkým na magnetizačné platá v tetraboridoch

Ako bolo uvedené vyššie, v polových závislostiach magnetizácie  $M(H)$  SSL systému  $TmB_4$  je možné pod  $T_N$  pozorovať platá s hodnotou  $M/M_S \approx 1/9, 1/7, 1/6, \dots$  a hlavné magnetizačné platá s hodnotou  $M/M_S \approx 1/2$ . Úlohou tohto cieľa bude zistiť, ako rýchlosť zmeny vonkajšieho magnetického poľa, t.j. rýchlosť zmeny magnetizácie, ovplyvní tieto platá, t.j. stabilitu doteraz pozorovaných rovnovážnych frustrovaných magnetických štruktúr v SSL mriežke, a to v závislosti na teplote resp. na iných podmienkach. Tieto procesy (vznik jednotlivých zlomkových plát v  $TmB_4$ ,  $HoB_4$  resp. legovaných systémoch) by mali byť dobre pozorovateľné na základe meraní magnetizácie pri teplotách pod  $T_N$  pomocou zariadenia MPMS (pracujúceho na báze SQUID-u) alebo cryogen-free zariadenia firmy Cryogenic s 18 T-ovým magnetom (pracujúceho na princípe vibračného magnetometra), ktoré máme na ÚEF SAV k dispozícii.

Cieľ 3: Vplyv legovania na makroskopické vlastnosti K-FMS. Hľadanie nových magnetických nanoštruktúr pomocou spinovo-polarizovaného skenovacieho tunelového mikroskopu

V tomto prípade pôjde o štúdium vplyvu substitúcie magnetických iónov  $Tm^{3+}$  nemagnetickými iónmi  $Lu^{3+}$  a magnetickými iónmi (napr.  $Gd^{3+}$ ), ktoré majú odlišný magnetický moment ako ióny  $Tm^{3+}$ , na vlastnosti a správanie sa príslušného K-FMS. Postupné zvyšovanie koncentrácie Lu resp. Gd by totiž malo viesť k narušeniu pôvodného frustrovaného stavu v  $TmB_4$ . Navyše, pri nízkych koncentráciách Lu resp. Gd, by v tuhých roztokoch  $TmLuB_4$  resp.  $TmGdB_4$  mohlo dôjsť k vytvoreniu podmienok pre formovanie sa vyššie uvedeného "nového typu skyrmionov" predpovedaného v [7]. Monokryštalické vzorky potrebné pre dosiahnutie tohto cieľa sú k dispozícii a boli na nich vykonané už viaceré transportné a magnetické merania. Prípadnú tvorbu týchto magnetických nanoštruktúr v blízkosti nemagnetických resp. magnetických prímiesí bude možné pozorovať spinovo-polarizovanou skenovacou tunelovou mikroskopiou (SP-STM) pri nízkych teplotách, ktorá sa práve začala vyvíjať v CFNT. Podobný výskum magnetických štruktúr bude prebiehať aj na Lu legovaných tuhých roztokoch  $HoB_{12}$ , t.j. na tuhých roztokoch  $HoLuB_{12}$ , a to aj v závislosti na koncentrácii Lu.

Cieľ 4: Štúdium anizotropie v K-FMS na báze SSL ( $TmB_4$ ) a fcc ( $HoB_{12}$ ) mriežok a rotačného magnetokalorického javu s využitím  $TmB_4$

Z meraní magnetizácie  $TmB_4$  vyplýva, že zatiaľ čo nasýtený magnetický stav v smere osi "c" je pri nízkych teplotách možné dosiahnuť v magnetickom poli cca 40 kOe, v smere kolmom na túto os (v rovine "a-b") je pre dosiahnutie nasýteného stavu potrebné aplikovať pole až takmer 10x väčšie. Na druhej strane je však rozdiel medzi elektrickým odporom resp. magnetoimpedenciou v oboch týchto smeroch nevýrazný [11, 27]. Cieľom tejto časti projektu bude preto hlbšie pochopiť rozdiel anizotropie v magnetických, transportných a tepelných vlastnostiach K-FMS na báze SSL a jej porovnanie s anizotropiou v K-FMS na báze fcc mriežky, v ktorých je magnetická anizotropia omnoho menej výrazná. Experimentálne bude tento problém skúmaný na základe meraní uhlovej závislosti magnetizácie, elektrickej magnetoimpedencie a kalorimetrie v rôznych magnetických poliach vo viacerých nízkoteplotných zariadeniach CFNT.

Navyše, keďže  $TmB_4$  je výrazne anizotropný systém, bude súčasťou tohto cieľa tiež realizácia rotačného magnetokalorického javu, v ktorom sa namiesto zmeny magnetického poľa využije rotácia vzorky v konštantnom poli (v tomto prípade je totiž magnetokalorický jav založený na výraznom rozdieli magnetizácie v smere osi "c" a smerom kolmom na túto os).

Vhodne orientované vzorky  $\text{TmB}_4$  a  $\text{HoB}_{12}$  sú k dispozícii.

#### Cieľ 5: Štúdium magnetických excitácií v $\text{TmB}_4$ a $\text{HoB}_{12}$ neutrónovu difrakciou

V súčasnosti sa predpokladá, že príčinou pozorovanej veľmi silnej magnetickej anizotropie v  $\text{TmB}_4$  je elektrické kryštálové pole [28]. Dôležitým pre overenie tohto tvrdenia bude okrem meraní anizotropie, ktoré sú uvedené v Ciele 4, tiež štúdium rozštiepenia hladín kryštálového poľa, t.j. experimentálne štúdium magnetických excitácií v tomto systéme metódou neutrónového rozptylu v rôznych smeroch a magnetických poliach, ktoré by malo napomôcť túto otázku zodpovedať. Toto štúdium bude uskutočnené na izotopicky čistých  $\text{Tm}^{11}\text{B}_4$  a  $\text{Ho}^{11}\text{B}_{12}$  vzorkách v Helmholtz Zentrum v Berlíne (HZB) v spolupráci s Dr. K. Siemensmeyerom, s ktorým na problematike K-FMS už mnoho rokov spolupracujeme, alebo v Spojenom ústave jadrového výskumu v Dubne (JINR Dubna) v spolupráci s Dr. E. Goremychkinom. Zaujímavým v tejto súvislosti bude aj štúdium vývoja týchto excitácií v závislosti na legovaní prostredníctvom Lu resp. Gd ako aj štúdium excitácií v systémoch s fcc mriežkou (napr. v  $\text{HoB}_{12}$  resp. v tuhých roztokoch  $\text{HoLuB}_{12}$ ). Izotopicky čisté  $\text{Tm}^{11}\text{B}_4$  a  $\text{Ho}^{11}\text{B}_{12}$  vzorky sú k dispozícii a boli na nich vykonané prvé testovacie experimenty.

#### Cieľ 6: Teoretická interpretácia výsledkov. Modelovanie vlastností K-FMS.

V rámci tohto cieľa bude hľadaný nový teoretický prístup k popisu vlastností kovových FMS resp. k interpretácii dosiahnutých experimentálnych výsledkov (ako sú napr. anomálie mernej tepelnej kapacity, správanie sa entropie a vlastností reziduálnych entropií, procesy adiabatického chladenia, atď.). Hlavným cieľom je prispieť k hlbšiemu pochopeniu fyzikálnej reality a procesov vo vyššie spomínaných materiáloch prostredníctvom špecifikovania kľúčových interakcií riadiacich dynamiku magnetizačných procesov. Z tohto dôvodu plánujeme rozpracovať a následne riešiť nové kvantovo štatistické modely, ktoré by podľa možnosti čo najrealistickejšie zohľadňovali fyzikálne pomery vo FMS. Ide predovšetkým o zohľadnenie skutočnosti, ktorá je často v literatúre venovanej FMS prehliadaná a totiž, že tieto systémy sú kovové a preto zanedbanie vplyvu elektrónového podsystemu na magnetické vlastnosti celého FMS je príliš silnou aproximáciou. Pri popise fyzikálnych vlastností kovových FMS sa chceme preto odraziť od nášho nedávno zavedeného modelu [14], ktorý už tento fakt zohľadňuje. Model je založený na koexistencii spinového a elektrónového podsystemu a ich vzájomnej previazanosti prostredníctvom spinovej interakcie isingovského typu. Pre realistickejší popis fyzikálnych vlastností kovových FMS je však potrebné zovšeobecniť model minimálne v nasledovných smeroch: (i) zahrnutie ďalekosahových interakcií, tak v rámci jednotlivých podsystemov ako aj medzi nimi, (ii) uvažovanie komplexnejšieho typu väzby (heisenbergovská namiesto isingovskej) medzi spinovým a elektrónovým podsystemom, (iii) zahrnutie hubbardovskej interakcie medzi itinerantnými elektrónmi. Navyše tento model plánujeme zovšeobecniť tak aby bol schopný popísať zmeny fyzikálnych vlastností kovových FMS pod vplyvom tlaku ako aj pod vplyvom legovania.

#### **Metodika riešenia projektu**

Košické pracovisko, Centrum fyziky veľmi nízkych teplôt ÚEF SAV a PF UPJŠ (CFNT), má k dispozícii unikátnu výskumnú infraštruktúru, ktorá poskytuje možnosti prípravy tenkých vrstiev magnetónovým naprašovaním a napaťovaním (aj *in situ*), možnosti merania transportných, magnetických a tepelných vlastností rôznych materiálov pri nízkych a veľmi nízkych teplotách, vo vysokých magnetických poliach a pri vysokých tlakoch (v komerčných zariadeniach PPMS a MPMS, ako aj v špecializovaných nízkoteplotných refrigerátoroch s vysokotlakovými diamantovými komôrkami), ako aj možnosti nízkoteplotnej skenovacej tunelovej mikroskopie (STM) a spektroskopie. V CFNT skonštruovaný STM mikroskop umožňuje experimentovať v magnetických poliach do 8 Tesla, merať topografiu aj spektrálne

mapy s atomárnym rozlíšením na povrchu pri teplotách do 0.3 K. Nedávno inštalovaný nový nízko-teplotný STM systém pracujúci za podmienok ultra-vysokého vákua (UHV STM) umožňuje *in-situ* naparovanie rôznych materiálov s možnosťou modifikovania zariadenia na spin-polarizované STM merania. CFNT teda disponuje prakticky všetkými experimentálnymi technikami (okrem neutrónového rozptylu), ktoré sú pre splnenie cieľov tohto projektu nevyhnutné. Navyše ÚEF SAV disponuje aj cryogen-free zariadením firmy Cryogenic s 18 T-ovým magnetom.

V prípade experimentálneho štúdia K-FMS pritom pôjde aj o prepojenie meraní ich makroskopických vlastností (merania ich magnetických, transportných a tepelných vlastností pri nízkych a veľmi nízkych teplotách, v magnetickom poli a pri vysokých tlakoch), ako aj ich mikroskopického štúdia metódou STM (pozorovanie magnetického usporiadania v blízkosti porúch mriežky a prímiesi). Navyše, paralelne bude prebiehať teoretická interpretácia výsledkov a rozpracovanie nového teoretického prístupu resp. modelovania študovaných procesov a štruktúr v K-FMS. A ako bolo uvedené v úvodnej časti, v rámci dlhoročnej spolupráce s Ústavom materiálového výskumu Ukrajinskej akadémie vied v Kyjeve pre celý navrhovaný experimentálny výskum sú k dispozícii nové a vysokokvalitné vzorky (orientované monokryštály, aj izotopicky čisté), na ktorých boli vykonané aj úspešné testovacie resp. predbežné merania.

## 2. Originálnosť projektu a koncepcie riešenia

- Definujte mieru originálnosti projektu
- Opíšte navrhovaný koncept riešenia a formulujte vedeckú hypotézu
- Definujte význam predbežných výsledkov, nadväznosť navrhovaného riešenia na vlastné publikované výsledky

voľný text

↓↓↓

Stanovené ciele projektu by mali priniesť úplne nové originálne a komplexné poznatky o magnetickej štruktúre kovových frustrovaných magnetických systémov. V prípade výskumu K-FMS pod tlakom a ich mikroskopického štúdia pomocou STM pôjde pritom o experimentálny výskum, ktorý ešte nebol na týchto systémoch realizovaný. To isté sa týka štúdia ich magnetických excitácií.

Celý tento originálny experimentálny výskum je pritom realizovateľný, keďže pre jeho realizáciu existuje v CFNT (a v HZB resp. JINR Dubna) fungujúca infraštruktúra. Dosiahnuté výsledky by tiež mali vytvoriť novú bázu pre komplexné teoretické štúdium K-FMS, ktoré je v súčasnosti iba v jeho počiatkoch.

Sme presvedčení, že navrhované úlohy projektu posunú hranice poznania skúmanej problematiky značne dopredu, keďže poskytnú kvalitatívne nové poznatky aj o už študovaných kovových frustrovaných systémoch ( $\text{HoB}_{12}$  a  $\text{TmB}_4$ ) a umožnia tak získať (a porovnať ich) s poznatkami na podobných systémoch ( $\text{ErB}_{12}$ ,  $\text{ErB}_4$  a  $\text{HoB}_4$ ). To povedie k dosiahnutiu komplexnejšieho pohľadu na vlastnosti kovových frustrovaných systémov, špeciálne na K-FMS s *fcc* a s SSL mriežkou.

Samotná koncepcia riešenia projektu bude vychádzať z meraní makroskopických vlastností, ktoré na K-FMS doteraz neboli realizované (súvisia hlavne s Cieľmi 1, 2 a 4, t.j. s vplyvom vysokého tlaku, vplyvom rýchlosti zmeny vonkajšieho magnetického poľa na ich stav, legovaním a anizotropiou), na ktoré bude nadväzovať mikroskopické štúdium pomocou SP-STM (Cieľ 3) a neutrónového rozptylu (Cieľ 5). Komplexnosť projektu bude podporená a zvýraznená paralelným teoretickým štúdiom a interpretáciou dosiahnutých výsledkov.

Aj keď si riešenie projektu ako celku bude vyžadovať dobre skoordinovanú postupnosť jednotlivých krokov, každý z vyššie uvedených cieľov bude možné vyhodnotiť prakticky aj nezávisle (napr. štúdium vplyvu tlaku a pod.) a tak bude možné výsledky jednotlivých častí projektu publikovať aj postupne.

### 3. Štruktúra projektu, kvalita spracovania, logická nadväznosť postupov riešenia

- Definujte harmonogram riešenia projektu s ohľadom na logickú nadväznosť postupov a na napĺňanie deklarovaných cieľov
- Vysvetlite adekvátnosť použitej metodiky
- Vysvetlite adekvátnosť navrhnutého rozpočtu projektu v kontexte finančnej náročnosti dosiahnutia cieľov
- Stanovte časový plán realizácie a naplnenia stanovených vedeckých cieľov

voľný text

↓↓↓

	2018	2019	2020	2021	2022
<b>Cieľ 1 „tlak“</b>	vplyv jednoosového a hydrostatického tlaku do 10 GPa na TmB <sub>4</sub> a HoB <sub>4</sub>			vplyv tlaku do 10 GPa, resp. vyššieho na HoB <sub>12</sub> a ErB <sub>12</sub>	
<b>Cieľ 2 „rýchlosť“</b>	vplyv rýchlosti zmeny magnetického poľa na magnetickú štruktúru TmB <sub>4</sub> a tuhých roztokov meraním magnetizácie do 18T			vplyv rýchlosti zmeny magnetického poľa na magnetickú štruktúru HoB <sub>4</sub> a tuhých roztokov meraním magnetizácie do 18T	
<b>Cieľ 3 „legovanie“</b>	vplyv legovania na makroskopické vlastnosti TmB <sub>4</sub> , HoB <sub>4</sub> a HoB <sub>12</sub>		štúdium magnetických nanoštruktúr v legovaných TmB <sub>4</sub> , HoB <sub>4</sub> a HoB <sub>12</sub> pomocou SP-STM		
<b>Cieľ 4 „anizotropia“</b>	štúdium anizotropie TmB <sub>4</sub> a HoB <sub>12</sub> na základe merania magnetorezistencie a magnetizácie. Rotačný magnetokalorický jav		štúdium anizotropie TmB <sub>4</sub> a HoB <sub>12</sub> na základe merania ac-kalorimetrie		štúdium anizotropie HoB <sub>4</sub> a ErB <sub>12</sub>
<b>Cieľ 5 „excitácie“</b>	štúdium magnetických excitácií v TmB <sub>4</sub> a HoB <sub>12</sub> pomocou neutrónového rozptylu (HZB Berlín, JINR Dubna)				
<b>Cieľ 6 „teória“</b>	teoretická interpretácia výsledkov, modelovanie procesov a štruktúr, nové prístupy k teoretickému popisu K-FMS				

Harmonogram riešenia projektu spolu s nadväznosťou úloh je uvedený tabuľke vyššie. Jednotlivé etapy riešenia na seba nadväzujú a štandardné makroskopické merania predchádzajú špeciálnym, napr. SP-STM a neutrónovej difrakcii. Navyše, vzhľadom k tomu, že značná časť experimentálneho výskumu bude realizovaná už dobre zabehnutými experimentálnymi metodikami (napr. merania transportných, magnetických a tepelných vlastností), budú môcť byť viaceré Ciele (resp. s nimi spojené merania) riešené a vyhodnocované paralelne. Použitá metodika riešenia jednotlivých úloh resp. cieľov je podrobnejšie uvedená v popise cieľov projektu. Samotná experimentálna metodika je adekvátna a prístupná v rámci infraštruktúry CFNT resp. v rámci úzkej spolupráce s HZB v Berlíne resp. s JINR v Dubne.

### 4. Odborné predpoklady zodpovedného riešiteľa (v kontexte údajov uvedených v Žiadosti časť VV-A4)

- Charakterizujte maximálne 5 najdôležitejších vedeckých výstupov zodpovedného riešiteľa za posledných 5 rokov, uveďte dôležitosť výstupu na národnej aj medzinárodnej úrovni
- Charakterizujte 3 najdôležitejšie projekty realizované zodpovedným riešiteľom za posledných 5 rokov v štruktúre informácií: názov projektu, grantová schéma, roky riešenia, rozpočet projektu, pozícia zodpovedného riešiteľa v projekte (hlavný riešiteľ / riešiteľ), objasnenie dôležitosti výstupov projektu v národnom aj medzinárodnom kontexte

- Charakterizujte osobnosť zodpovedného riešiteľa v danej oblasti základného výskumu (v kontexte vedeckých aj vedecko–pedagogických výstupov) na úrovni svetovej, resp. európskeho výskumného priestoru

voľný text

↓↓↓

### **5 najdôležitejších vedeckých výstupov za posledných 5 rokov**

- *Gabáni S., Takáčová I., Pristáš G., Gažo E., Flachbart K., Mori T., Braithwaite D., Míšek M., Kamenev K.V., Hanfland M., Samuely P: High-pressure effect on the superconductivity of YB<sub>6</sub>. Physical Review B 90 (2014) 045136*

Pionierska práca zaoberajúca sa vplyvom vysokého tlaku na magnetotransport (0-4.7 GPa), magnetickú susceptibilitu (0-12 GPa) a RTG difrakciu (0-32 GPa) supravodivého systému YB<sub>6</sub>. Bolo zistené, že pokles teploty prechodu do supravodivého stavu je spôsobený najmä tvrdnutím Einsteinovho fonónového módu, ktorý je zodpovedný za supravodivú väzbu. Tento predpoklad bol potvrdený pomocou tzv. tepelnej spektroskopie analýzou elektrickej rezistivity v normálnom stave pri rôznych tlakoch. Práca bola ohodnotená ako najlepší výsledok ÚEF SAV za rok 2014.

- *Pristáš G., Gabáni S., Gažo E., Komanický V., Orendáč M., You H.: Influence of hydrostatic pressure on superconducting properties of niobium thin films. Thin Solid Films 556 (2014) 470*

Pionierska práca, ktorá sa zaoberá vplyvom hydrostatického tlaku na kritickú teplotu ( $T_c$ ) supravodivého filmu nióbu hrúbky 100 nm meraním elektrickej rezistivity do 3 GPa. Zároveň bola skúmaná zmena štruktúry filmu pred a po aplikovaní tlaku RTG a AFM meraním. Zistilo sa, že zatiaľ čo  $T_c$  objemovej vzorky nióbu klesá s rastúcim tlakom, tak u tenkého filmu rastie.

- *Sluchanko N.E., Khoroshilov A.L., Anisimov M.A., Azarevich A.N., Bogach A.V., Glushkov V.V., Demishev S.V., Krasnorussky V.N., Samarin N.A., Shitsevalova N.Yu., Filippov V.B., Levchenko A.V., Pristáš G., Gabáni S., Flachbart K.: Charge transport in Ho<sub>x</sub>Lu<sub>1-x</sub>B<sub>12</sub>: Separating positive and negative magnetoresistance in metals with magnetic ions. Physical Review B 91 (2015) 235104*

Práca prezentuje dlhoročný spoločný výskum s kolegami z GPI RAS Moskva. Veľmi podrobne sa zaoberá transportom elektrického náboja (rezistivitou a Hallovým javom v magnetickom poli) a separáciou jednotlivých jeho zložiek v tuhých roztokoch Ho<sub>x</sub>Lu<sub>1-x</sub>B<sub>12</sub>. Práca bola ohodnotená ako najlepší výsledok OFNT ÚEF SAV za rok 2015.

- *Gabáni S., Orendáč M., Pristáš G., Gažo E., Diko P., Piovarči S., Glushkov V., Sluchanko N., Levchenko A., Shitsevalova N., Flachbart K.: Transport properties of variously doped SmB<sub>6</sub>. Philosophical Magazine 96 (2016) 3274*

Vďaka meraniam a analýze magnetotransportu pri nízkych teplotách na rôzne dopovaných monokryštalických vzorkách SmB<sub>6</sub> bolo možné študovať a určiť úlohu povrchu v celkovej elektrickej vodivosti zlúčeniny SmB<sub>6</sub>, ktorá sa v súčasnosti považuje za prototyp 3D silne korelovaného topologického Kondovho izolátora. Práca bola ohodnotená ako jeden z najlepších výsledkov ÚEF SAV za rok 2016.



- *Orendáč M., Gabáni S., Pristáš G., Gažo E., Diko P., Farkašovský P., Levchenko A., Shitsevalova N., Flachbart K.: Isosbestic points in doped SmB<sub>6</sub> as features of universality and property tuning. Physical Review B 96 (2017) 115101*

Pionierska práca, ktorá sa zaoberá podrobným štúdiom vplyvu substitúcie zmiešanovaleňného iónu samária (Sm<sup>2.5+</sup>) iónmi La<sup>3+</sup>, Yb<sup>2+</sup> a vakanciami na SmB<sub>6</sub> meraním teplotných závislostí tepelnej kapacity. Po prvýkrát sa pozoroval tzv. „isosbestický“ bod v nameraných závislostiach u všetkých tuhých roztokov Sm<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>B<sub>6</sub>, Sm<sub>1-x</sub>Yb<sub>x</sub>B<sub>6</sub> aj Sm<sub>1-x</sub>B<sub>6</sub>. Zároveň bol vypočítaný vývoj viacmedzerovej energetickej štruktúry v týchto dopovaných systémoch SmB<sub>6</sub> na základe jednoduchého fenomenologického modelu.

### **3 najdôležitejšie projekty za posledných 5 rokov**

- *Nekonvenčné kvantové stavy v nanoskopických magnetických systémoch – NEMESYS, APVV 0132-11, 06/2012-12/2015, 219 643,- EUR, zodpovedný riešiteľ pre ÚEF SAV*

Naša aktivita v projekte bola zameraná na experimentálne štúdium konkurujúcich medziklastrových interakcií v boridoch prvkov vzácnych zemín bohatých na bór. Počas projektu sme sa zamerali na štúdium elektrónovej a magnetickej štruktúry tetraboridu (TmB<sub>4</sub>), hexaboridov (YB<sub>6</sub>, SmB<sub>6</sub>, Sm<sub>1-x</sub>B<sub>6</sub>, Sm<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>B<sub>6</sub>, Ce<sub>x</sub>La<sub>1-x</sub>B<sub>6</sub>, LaB<sub>6</sub>, GdB<sub>6</sub>) a dodekaboridov (Tm<sub>1-x</sub>Yb<sub>x</sub>B<sub>12</sub>, Ho<sub>x</sub>Lu<sub>1-x</sub>B<sub>12</sub>) vzácnych zemín, ale aj pozorovanie kvantového Hallovhovho javu v tenkých vrstvách Ge. Toto štúdium bolo realizované na základe merania hlavne transportných, tepelných a magnetických vlastností, ako aj metódou neutrónovej, RTG, ARPES a Ramanovej spektroskopie pri veľmi nízkych teplotách (0.06-300K), vysokých magnetických poliach do 12 T ale aj vysokých tlakoch do 32 GPa, a prinieslo originálne výsledky v oblasti výskumu silne korelovaných elektrónových systémov. Výsledky boli prezentované na vyše 10-tich konferenciách a publikované v 19-tich CC publikáciách. Bola zavedená nová metóda merania magnetizácie v MPMS (do 10 GPa) a ac-susceptibility (do 3 GPa) pri vysokých tlakoch.

- *Kvantové fázové prechody. Vplyv chemického a hydrostatického tlaku na vybrané boridy vzácnych zemín, VEGA 2/0106/13, 2013-2015, 26 012,- EUR, vedúci*

Projekt sa zaoberal správaním spinovej, nábojovej a mriežkovej dynamiky TmB<sub>4</sub>, ktoré bolo porovnané s predpoveďami teórie Glaubera a Falicov-Kimballa. Skúmal sa vplyv hydrostatického tlaku na transportné vlastnosti TmB<sub>4</sub> do 3 GPa. Bola potvrdená prítomnosť separácie magnetických fáz v EuB<sub>5.99</sub>C<sub>0.01</sub> meraním rezistivity, tepelnej kapacity, Hallovhovho javu a neutrónového rozptylu. Zistilo sa, že novoobjavený fonónový mód pochádzajúci od defektov v bórovej podmriežke hexaboridov spôsobuje vytváranie dvojhladinového stavu iónu vzácnej zeminy vo vnútri porušeného kubo-oktaédra. To vedie k vytváraniu spin-polarónových ťažkofermiónových stavov v okolí Fermiho hladiny (Ce<sub>x</sub>La<sub>1-x</sub>B<sub>6</sub>), či k anomálnemu Hallovmu javu (GdB<sub>6</sub>). Podrobné štúdium vplyvu vysokého tlaku na zmiešanú valenčnosť v zlúčenine SmB<sub>6</sub> metódou JMR a RTG poukázalo na tlakom indukovanú lokalizáciu 4f-dier iónov samária, nárast valenčnosti s tlakom a vznik magnetického usporiadania na diaľku, ktoré sa pozoruje nad kvantovým kritickým bodom. Študoval sa tiež vplyv vakancií (Sm<sub>1-x</sub>B<sub>6</sub>) a prímеси La<sup>3+</sup> (Sm<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>B<sub>6</sub>) na zmiešanú valenčnosť v SmB<sub>6</sub> metódou XANES ale aj na energetickú medzeru. V súvislosti so zlúčeninou SmB<sub>6</sub> ako prvým kandidátom na silnekorelovaný topologický Kondov izolátor sa študovali transportné merania až do teplôt 40 mK a ARPES do 1K. Výsledky boli prezentované na vyše 10-tich konferenciách a publikované v 20-tich CC publikáciách.

- *Vplyv extrémnych podmienok na silne korelované elektrónové systémy, VEGA 2/0032/16, 2016-2019, 50 000,- EUR, vedúci*

Práve bežiaci projekt sa zaoberá vplyvom extrémnych podmienok, ako sú veľmi nízke teploty (nad 50 mK), vysoké tlaky (do 10 GPa) a magnetické polia (do 18 T) na silné korelácie medzi systémom voľných (vodivostných) a viazaných (lokalizovaných) elektrónov prevažne v boridoch vzácnych zemín, čo často vedie k vzniku nových exotických fáz v týchto materiáloch. V tomto projekte sa experimentálne študujú najnovšie otvorené problémy silne korelovaných elektrónových systémov, ako sú povrchová vodivosť topologických Kondových izolátorov, dynamika frustrovaných antiferomagnetov, Kondov vs. spin-polarónový model v spinových sklách a supravodivosť pod tlakom. Ide o metodicky veľmi náročný výskum na novo vyrobených monokryštáloch.

**doc. RNDr. Slavomír Gabáni, PhD.** (1974) je samostatný vedecký pracovník Ústavu experimentálnej fyziky SAV, odborník v oblasti experimentálneho štúdia štruktúrnych, transportných, tepelných a magnetických vlastností silne korelovaných elektrónových systémov pri nízkych teplotách, vo vysokých magnetických poliach a pri vysokých tlakoch.

Vybudoval nové nízkoteplotné laboratórium pre extrémne podmienky, v ktorom sa spolu s  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  minirefrigerátorom nachádzajú viaceré meracie sondy pre výskum SKES v extrémnych podmienkach, a to hlavne pre experimentálne štúdium pri veľmi vysokých tlakoch v diamantových a piestikových komôrkach, čím dokumentoval vysokú mieru svojho talentu a zručnosti v oblasti experimentálneho výskumu. Absolvoval viacero dlhodobých zahraničných pobytov, napr. v Rakúsku (TU Viedeň), Japonsku (Univ. Kobe), Francúzsku (CEA Grenoble) a Rusku (GPI RAS Moskva), počas ktorých sa tiež venoval tejto problematike.

Svoje výsledky prezentoval na 27 konferenciách, niekoľkých prednáškach a seminároch, publikoval vo viac ako 90 CC publikáciách, na ktoré je viac ako 300 SCI ohlasov.

Bol spoluriešiteľom vyše 20 projektov národnej (VEGA, APVV, MVTs, ŠF, atď.) aj nadnárodnej úrovne (Transfer of Knowledge – 6. rámcový, Microkelvin – 7. rámcový, atď.), z ktorých 3 riadil (1xAPVV a 2xVEGA) a niekoľko koordinoval.

Získal niekoľko ocenení: III. miesto v Súťaži mladých fyzikov SAV (2003), II. miesto v Súťaži mladých vedeckých pracovníkov ÚEF SAV (2003, 2008), Cenu SAV za "Budovanie infraštruktúry pre vedu" (2008), II. miesto za najvýznamnejší výsledok ÚEF SAV v oblasti aplikačných výsledkov (2009), II. miesto za najvýznamnejší výsledok ÚEF SAV v oblasti medzinárodných projektov (2011), I. miesto za najvýznamnejší výsledok ÚEF SAV v oblasti základného výskumu (2014) a II. miesto za najvýznamnejší výsledok ÚEF SAV v oblasti medzinárodných projektov (2016).

Má vyše 15-ročnú pedagogickú prax. Zaviedol a vyučuje 2 nové predmety: Fyzika vysokých tlakov (PF UPJŠ Košice) a Materiály v extrémnych podmienkach (FEI TU Košice). Vyškoliť 2 bakalárov, 4 diplomantov a 1 doktoranda. Je pravidelným oponentom Bc., Mgr., RNDr., PhD. prác a skript resp. VEGA projektov, ale hlavne článkov v časopisoch Acta Physica Polonica, Journal of Low Temperature Physics a Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Svoju vedeckú prácu a fyzikálnu oblasť popularizuje pred verejnosťou experimentálnymi prednáškami (Steel Park, Noc výskumníkov, Vedecká kaviareň, Vedecký brloh, Hodina vedy, TA3, Týždeň vedy a techniky, výjazdové prednášky pre základné a stredné školy).

Jeho úlohou v rámci projektu bude koordinácia celého projektu, riadenie a realizácia experimentálneho štúdia skúmaných K-FMS (hlavne merania pod tlakom, merania transportných, magnetických a tepelných vlastností), diskusia a interpretácia výsledkov, ako aj príprava publikácií.

## 5. Odborné predpoklady riešiteľského kolektívu

- Odôvodnite kompetentnosť zúčastnených riešiteľských organizácií na riešenie predkladaného projektu v kontexte hlavných úloh, ktoré budú jednotlivé organizácie v projekte zabezpečovať;
- Opíšte kompetentnosť jednotlivých riešiteľov na riešenie predkladaného projektu a základné úlohy, ktoré budú v rámci implementácie projektu realizovať (netýka sa zodpovedného riešiteľa)
- Opíšte spôsob kooperácie riešiteľov, ich vzájomnú komplementaritu a zastupiteľnosť pri riešení projektu
- Opíšte existujúcu prístrojovú a personálnu infraštruktúru pracovísk podieľajúcich sa na implementácii projektu
- Opíšte mieru zapojenia mladých pracovníkov výskumu a vývoja do 35 rokov vrátane študentov doktorandského štúdia do riešenia projektu

voľný text

↓↓↓

**Centrum fyziky nízkych teplôt (CFNT) v Košiciach**, ktorého členovia sú riešiteľmi predkladaného projektu, je výnimočným výskumným komplexom v rámci celého Slovenska. Je to pravdepodobne najväčšie centrum zamerané na výskum fyziky kondenzovaných látok, ktoré je schopné pracovať pri teplotách od 100 mikrokkelvinov až nad izbové teploty. Na štúdium elektrických, magnetických a tepelných vlastností tuhých látok v teplotnej oblasti od 50 mK do 2 K je k dispozícii niekoľko  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  zmiešavacích refrigerátorov. Viacero ďalších kryostatov umožňuje merania pri vyšších teplotách. Je tu k dispozícii viacero metód merania magnetických a transportných vlastností rôznych vzoriek, ako aj ich tepelnej kapacity. V CFNT je rozvinutých aj niekoľko spektroskopických metód, menovite mikrokontaktovej, tunelovej, EPR a JMR spektroskopie. Skenovací tunelový mikroskop (STM) vlastnej výroby je schopný fungovať pri teplotách od 300 mK a v magnetických poliach až do 8 T. V poslednom období bol v Centre nainštalovaný a uvedený do prevádzky komerčný STM systém s ultra-vysokým vakuom. K dispozícii sú tiež „Physical Properties Measurement System“ (PPMS), SQUID - „Magnetic Properties Measurement System“ (MPMS) či Cryogen-free systém s 18 T magnetom (CRYOGENIC) pre rýchlu a jednoduchú charakterizáciu rôznych vlastností vzoriek (transportných, magnetických a tepelných). Okrem toho CFNT prevádzkuje vysokotlakové diamantové a piestikové komôrky na meranie magnetických a transportných fyzikálnych charakteristík pri extrémne vysokých tlakoch. Centrum má tiež rozsiahlu medzinárodnú spoluprácu.

Riešiteľský kolektív projektu sa bude skladať z nasledovných úzko spolupracujúcich tímov z Ústavu experimentálnej fyziky SAV v Košiciach a Prírodovedeckej fakulty Univerzity P.J. Šafárika v Košiciach, z ktorých väčšina sú členmi CFNT.

### Tím UEF SAV

Za prejav kvality tohto tímu je možné považovať pôsobenie viacerých z nich v národných centrách excelentnosti, publikovanie výsledkov v renomovaných medzinárodných časopisoch s vysokým impakt faktorom (ACS Nano, Physical Review Letters, Physical Review B, a pod.), prezentácie ich výsledkov formou pozvaných prednášok na medzinárodných konferenciách, a koordinovanie resp. ich aktívnu účasť v programoch Európskej únie. V roku 2008 získali spolu s ďalšími členmi CFNT Cenu Slovenskej akadémie vied za „Budovanie nízkoteplotnej infraštruktúry pre vedu“. Tím má tiež rozsiahlu medzinárodnú spoluprácu (napr. s laboratóriami z Nemecka, Ruska, Francúzska, Japonska), ktorá je zárukou úspešného výskumu.

**doc. RNDr. Karol Flachbart, DrSc.** (1952) sa dlhodobo zaoberá fundamentálnymi aspektmi silno-korelovaných elektrónových systémov pri nízkych a veľmi nízkych teplotách. V súčasnosti sú hlavným predmetom jeho záujmu topologické izolátory, frustrované magnetické systémy a iné silno-korelované systémy v extrémnych podmienkach. Prispel k budovaniu unikátnej vedeckej infraštruktúry Centra fyziky nízkych teplôt v Košiciach. Dosiaľ sa podieľal na publikovaní viac ako 150 CC vedeckých článkov, na ktoré eviduje vyše 650 citácií v časopisoch SCI. Jeho úlohou bude podieľať sa na analýze a interpretácii získaných údajov, a na príprave a písaní vedeckých článkov.

**Ing. Emil Gažo** (1961) je vysoko kvalifikovaný odborník pre kryogénnu a vákuovú techniku, ktorý výrazným spôsobom prispel k budovaniu unikátnej vedeckej infraštruktúry Centra fyziky nízkych teplôt v Košiciach. Jeho úlohou v rámci projektu bude zúčastňovať sa na experimentoch v rámci CFNT, a podieľať sa na výrobe nových a servisovaní starších zariadení.

**RNDr. Pavol Farkašovský, DrSc.** (1962) je špičkovým, medzinárodne uznávaným odborníkom v oblasti teoretického štúdia silne korelovaných systémov. Špecializuje sa na popis kooperatívnych javov v silne korelovaných systémoch pomocou numerických riešení zovšeobecnených mriežkových hamiltoniánov modelu Falicova-Kimballa a Hubbardovho modelu. Počas svojho teoretického štúdia dosiahol celý rad originálnych výsledkov, ktoré fundamentálnym spôsobom obohatili naše chápanie fyzikálnych procesov v zložitých multikomponentných systémoch, akými sú napr. zlúčeniny vzácnych zemín a prechodných kovov, predovšetkým v špecifikácii kľúčových mechamizmov, ktoré vedú k stabilizácii itinerantného feromagnetizmu, elektrónovej feroelektricity, nehomogénneho nábojového a spinového usporiadania, valenčných prechodov a prechodov kov-izolátor v silne korelovaných systémoch. Získané vedecké výsledky publikoval vo viac ako 70 CC publikáciách (približne na polovici z nich je ako sólo autor), pričom vo väčšine prípadov sa jedná o príspevky v najrenomovanejších fyzikálnych časopisoch z danej vednej oblasti (Physical Review B, Europhysics Letters, Journal of Physics: Condensed Matter, atď.). Okrem toho v spoluautorstve opublikoval 3 monografie a 1 kapitolu v knihe. O kvalite dosiahnutých výsledkov svedčí aj pomerne vysoký citačný ohlas (cca 400 citácií) na publikované práce. RNDr. Pavol Farkašovský, DrSc. je autorom niekoľkých numerických metód, ktoré dovoľujú študovať mriežkové hamiltoniány silne korelovaných systémov na rádovo väčších mriežkach než aké je možné dosiahnuť napr. pomocou exaktných metód. V rámci predkladaného projektu sa bude venovať teoretickému štúdiu kvantovo štatistických modelov s cieľom prispieť k hlbšiemu pochopeniu fyzikálnej reality vo vyššie spomínaných materiáloch.

**Mgr. Pavol Szabó, CSc.** (1968) je popredným odborníkom v oblasti mikrokontaktovej a tunelovej spektroskopie. Je spoluautorom 78 CC publikácií (18 za posledných 5 rokov) s celkovým počtom SCI citácií nad 1100, s Hirschovým indexom 18. Hlavným predmetom jeho záujmu sú viacmedzerové supravodiče a supravodivé materiály s konkurenčným usporiadaním. Pravidelne publikuje v renomovaných fyzikálnych časopisoch, ako Physical Review Letters (5 prác), Physical Review B (12 prác), Superconductors Science And Technology (5 prác), či najnovšie ACS Nano (2 práce) atď., a je aj ich recenzentom. Je vedúcim tímu, ktorý vyvinul unikátny nízkoteplotný STM mikroskop a vybudoval laboratórium STM mikroskopie a spektroskopie v CFNT v Košiciach. Týmto sa košické pracovisko zaradilo do európskej špičky laboratórií, ktoré sú schopné študovať fyzikálne vlastnosti supravodičov s atomárnym rozlíšením pri subkelvinových teplotách ( $T = 0.3 \text{ K} - 300 \text{ K}$ ) a vysokých magnetických poliach ( $H = 0 - 8 \text{ Tesla}$ ). Momentálne je zodpovedný za vybudovanie nového laboratória nízkoteplotného UHV STM mikroskopu. V roku 2013 v rámci vedenia diplomovej práce úspešne zaviedol novú experimentálnu metódu štúdia spinovej polarizácie v kovoch s nenulovou spinovou polarizáciou pomocou mikrokontaktovej andreevovskej spektroskopie. V projekte bude zodpovedný za nízkoteplotné STM merania.

**RNDr. Jozef Kačmarčík, PhD.** (1972) je samostatný vedecký pracovník, ktorý sa bude venovať výskumu tepelnej kapacity študovaných materiálov pomocou ac-kalorimtrie. S touto metódou má dlhoročné skúsenosti a v uplynulých rokoch ju úspešne zaviedol a odladil v Centre fyziky nízkych teplôt v Košiciach v spolupráci s francúzskymi kolegami z CNRS Grenoble. Napriek tomu, že táto metóda je v Centre relatívne krátko, na jej základe už vzniklo niekoľko excelentných publikácií a odštartovala sa nová medzinárodná spolupráca. J. Kačmarčík je spoluautorom 62 CC publikácií s vyše 1000 citáciami.

**RNDr. Marián Jurčišín, PhD.** (1973) je samostatný vedecký pracovník, ktorý sa bude v rámci projektu venovať teoretickému štúdiu vlastností magnetických systémov hlavne na geometricky frustrovaných rekurzívnych mriežkach, ktoré, na jednej strane, berú do úvahy základnú geometrickú štruktúru reálnych dvoj- a trojrozmerných mriežok zodpovednú za geometrickú frustráciu a, na druhej strane, sú exaktne riešiteľné rekurzívnymi metódami. S vyšetrovaním termodynamických vlastností takýchto systémov má dlhoročné skúsenosti. M. Jurčišín je spoluautorom 70 CC publikácií s viac ako 350 citáciami.

**RNDr. Eva Jurčišinová, PhD.** (1975) je samostatný vedecký pracovník, ktorý má dlhoročné skúsenosti s analytickým ako aj numerickým vyšetrovaním vlastností magnetických systémov na geometricky frustrovaných rekurzívnych mriežkach. V rámci riešenia projektových úloh sa sústreďí hlavne na teoretickú analýzu anomálneho správania sa tepelnej kapacity vo frustrovaných magnetických systémoch ako aj na analýzu procesov adiabatického chladenia v takýchto systémoch. Eva Jurčišinová je spoluautorom 50 CC publikácií s viac ako 100 citáciami.

**RNDr. Gabriel Pristáš, PhD.** (1981) je samostatný vedecký pracovník, odborník v oblasti fyziky vysokých tlakov. Absolvoval dvojročný post-doktorandský pobyt v Japonsku (Univ. Hyogo, scholarship JSPS), kde sa venoval štúdiu Kondo izolátorov, metódou JMR pri vysokých tlakoch, a polročný pobyt v Rakúsku (TU Viedeň, ERC - Project ass.), kde sa venoval štúdiu kvantových fázových prechodov pri veľmi nízkych teplotách v kombinácii s vysokými tlakmi. Absolvoval tiež viacero krátkodobých pobytov na renomovaných zahraničných pracoviskách napr. CEA Grenoble, CSEC University of Edinburgh, University of Turku, Fyzikálny ústav AVČR Praha. Získal viacero ocenení, napr. 1. miesto v súťaži vedeckých prác mladých fyzikov SFS (2009) a ocenenie prezidenta SR za rok 2011. Je spoluautorom vyše 40 CC publikácií s viac ako 180 SCI citáciami. V rámci projektu sa bude venovať experimentálnemu výskumu makroskopických vlastností K-FMS pri nízkych teplotách a vysokých tlakoch, bude sa tiež podieľať na analýze a interpretácii dosiahnutých výsledkov.

**RNDr. Michal Rajňák, PhD.** (1987) je mladý vedecký pracovník do 35 rokov, špecializovaný na experimentálne štúdium magnetických, elektrických a štruktúrnych vlastností kondenzovaných látok a nanočasticových systémov. Absolvoval niekoľko krátkodobých (do 3 mesiacov) pracovno-študijných zahraničných pobytov, napr. na Hebrejskej univerzite v Jeruzaleme, JINR Dubna, CNRS Grenoble, Univerzita Jean Monnet, Saint-Étienne. Na ÚEF SAV prispel k vybudovaniu laboratória vysokého magnetického poľa, kde pôsobí ako operátor meracieho systému s 18 T magnetom. Získal viacero ocenení, napr. 1. miesto v Súťaži mladých fyzikov SFS (2015), 1. miesto v Súťaži mladých vedeckých pracovníkov ÚEF SAV (2015), 1. miesto v Súťaži o cenu Štefana Jedlíka za najlepšiu záverečnú prácu v odbore aplikovaný magnetizmus a magnetické materiály (2015), 2. miesto v súťaži mladých vedeckých pracovníkov SAV do 35 rokov (2016). Je spoluautorom 34 CC publikácií s viac ako 100 SCI citáciami. V rámci projektu sa bude venovať hlavne experimentálnemu výskumu makroskopických vlastností K-FMS pri nízkych teplotách a vysokých magnetických poliach do 18 T.

Do projektu budú zaradení aj interní doktorandi: **RNDr. Matúš Orendáč, Mgr. Ľubomíra Regeciová, Mgr. Miroslav Marcin a Ing. Michal Kopčík,.**

### **Tím PF UPJŠ:**

**Mgr. Tomáš Samuely PhD.** (1981) je expert na skenovacie sondové mikroskopie a nanovedu. Zameriava sa hlavne na štúdium vplyvu nanoštruktúr na fyzikálne vlastnosti materiálov ako napríklad magnetické vlastnosti supravodičov. Absolvoval štvorročné doktorandské štúdium na univerzite v Bazileji vo Švajčiarsku, kde sa venoval skenovacej tunelovej mikroskopii samousporiadaných molekulových systémov a osemnásťmesačný postdoktorandský pobyt na KU Leuven v Belgicku, kde sa venoval skenovacej tunelovej mikroskopii a spektroskopii supravodivých nanoštruktúr. Je spoluautorom 21 CC publikácií s viac ako 170 citáciami. Jeho úlohou bude hlavne štúdium lokálnych magnetických a elektronických vlastností s vysokým priestorovým rozlíšením.

Do projektu bude zaradený aj interný doktorand: **RNDr. Oleksandr Onufriienko.**

Záverom je možné konštatovať, že riešiteľský kolektív, ktorý je zložený zo skúsených vedeckých pracovníkov (S.G., K.F., P.F., P.S., J.K., M.J. a E.J.), mladších ambiciózných vedeckých pracovníkov (G.P., M.R. a T.S.), vysokokvalifikovaného kryo-inžiniera (E.G.) a piatich doktorandov, má všetky predpoklady, tak po stránke odbornej, ako aj po stránke experimentálneho vybavenia plánované ciele projektu splniť. Veľkou výhodou riešiteľského kolektívu je jeho lokalizácia na jednom pracovisku v Košiciach, čo môže okrem spoločnej analýzy a diskusie výsledkov napomôcť aj prípadnému rýchlemu riešeniu rôznych experimentálnych problémov. Nezanedbateľný by mal byť tiež fakt, že aj spolupracujúci tím teoretikov by mal byť tiež "nablízku".

## Referencie

- [1] L. Balents, Nature 464 (2010) 199.
- [2] C. Lacroix, J. Phys. Soc. Jap. 79 (2010) 011008.
- [3] S. Petit et al., Nature Physics 12 (2016) 746.
- [4] H. Kageyama et al., Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 3168.
- [5] M.E. Zhitomirsky, Phys. Rev. B 67 (2003) 104421.
- [6] S. Pakhira et al., Scientific Reports 7 (2017) 7367.
- [7] A.O. Leonov, M. Mostovoy, Nature Commun. 6 (2016) 8275.
- [8] A.O. Leonov, M. Mostovoy, Nature Commun. 8 (2017) 14394.
- [9] S. Julian, H.-Y. Kee, Phys. Canad. 68 (2012) 95.
- [10] F. Iga et al., J. Magn. Magn. Mater. 310 (2007) e443.
- [11] S. Gabáni et al., Acta Phys. Polon. 113 (2008) 227.
- [12] K. Siemensmeyer et al., Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 177201.
- [13] S. Maťaš et al., J. Phys.: Conf. Series 200 (2010) 032041.
- [14] P. Farkašovský et al., Phys. Rev. B 82 (2010) 054409.
- [15] W.C. Huang et al., Europ. Phys. Lett. 102 (2013) 37005.
- [16] T. Verkholyak et al., Phys. Rev. B 90 (2014) 134413.
- [17] E. Jurčišinová, M. Jurčišin, Phys. Rev. B 90 (2014) 032108.
- [18] J. Shin et al., Phys. Rev. B 95 (2017) 205140.
- [19] S. Pradhan, A. Taraphder, Materials Today: Proceedings 4 (2017) 5532.
- [20] S. Gabáni et al., J. Magn. Magn. Mater. 207 (1999) 131.
- [21] A. Kohout et al., Phys. Rev. B 70 (2004) 224416.
- [22] K. Siemensmeyer, J. Low Temp. Phys. 146 (2007) 581.
- [23] S. Gabáni et al., Solid State Sciences 14 (2012) 1722.
- [24] N.E. Sluchanko et al., J. Exp. Theor. Phys. 113 (2011) 468.
- [25] N.E. Sluchanko et al., J. Exp. Theor. Phys. Lett. 100 (2014) 470.
- [26] N.E. Sluchanko, Low. Temp. Phys. 41 (2015) 544.
- [27] S.S. Sunku et al., Phys. Rev. B 93 (2016) 174408.
- [28] V.V. Novikov et al., J. Alloys and Comp. 666 (2016) 98.