

Univerzita P. J. Šafárika v Košiciach
Dekanát Prírodovedeckej fakulty
Oddelenie pre vedu, výskum, rozvoj a
doktorandské štúdium
Šrobárova 2
041 54 Košice

Institute of Nanotechnology

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
Germany

Prof. Dr. Vladimír Šepelák

Phone: +49 721 60828926
Email: vladimir.sepelak@kit.edu

Your reference: **041/2025**
Date: 30. 09. 2025

Oponentský posudok inauguračnej práce “Magnetické nanočastice pre pokrokové aplikácie v biomedicíne a energetike”

Predsedom Vedeckej rady a dekanom Prírodovedeckej fakulty Univerzity P. J. Šafárika v Košiciach, *docentom RNDr. Romanom Sotákom, PhD.*, som bol dňa 1. júla 2025 menovaný za oponenta inauguračnej práce “**Magnetické nanočastice pre pokrokové aplikácie v biomedicíne a energetike**” *docentky RNDr. Adriany Zeleňákovvej, DrSc.*, ktorá žiada o udelenie vedecko-pedagogického titulu **profesor** v odbore habilitačného a inauguračného konania **fyzika**. Autorka inauguračnej práce predložila k vymenúvaciemu konaniu súbor jej 20 najvýznamnejších vedeckých prác.

Predložený súbor prác je zameraný na štúdium štruktúrnych, fyzikálnych a biologických vlastností magnetických nanočastíc obsahujúcich atómy Fe, Co a Gd a ich praktického využitia v biomedicíne (ako nosičov liečiv, pre diagnostiku a terapiu nádorových ochorení) a pre kryogénne energetické aplikácie súvisiace so zvýšením účinnosti chladiaceho procesu.

Dosiahnuté experimentálne a teoretické výsledky prezentované v inauguračnej práci odzrkadľujú celkový vedecký profil autorky, dokumentovaný 82 WoS publikáciami a viac než 800 WoS citáciami. Zapadajú do kontextu jej výsledkov dosiahnutých v rámci viac než 40 národných a medzinárodných vedeckých projektov. Úzko súvisia tiež s výskumnými aktivitami *vedeckej školy magnetických nanočastíc* na Prírodovedeckej fakulte UPJŠ v Košiciach, ktorú docentka Zeleňáková systematicky buduje od roku 2005, ako aj s jej pedagogickou činnosťou reprezentovanou 10 doktorandami. Vzhľadom na impakt faktor renomovaných vedeckých časopisov, v ktorých sú publikácie autorky prezentované (napríklad, *Journal of Alloys and Compounds*: IF = 6,371; *Colloids and Surfaces A*: IF = 5,2; *Scientific Reports*: IF = 4,996), je nutné poznamenať, že výsledky jej inauguračnej práce prešli náročným rigoróznym *peer review* procesom.

Dôležitosť a aktuálnosť témy doktorskej inauguračnej práce

Objektom výskumu predloženého súboru prác sú jednak individuálne magnetické nanočastice s neuniformnou “jadro-obal” konfiguráciou ako aj nanočastice lokalizované v pórovitej usporiadanej SiO₂ matici. Okrem výsledkov štúdia štruktúrnych a fyzikálnych vlastností nanočastíc, časť predloženej práce prezentuje aj výsledky biologických experimentov, ktoré demonštrujú aplikovateľnosť pripravených nanosystémov v živých organizmoch ako *nosičov liečiv* (napr., systém Fe₂O₃/SBA-16/Indomethacine), *kontrastných látok pre MRI diagnostiku* (systém Gd₂O₃/SBA-15) a *nanokompozitov pre magnetickú časticovú hypertermiu* (systém CoFe₂O₄/CA). Dosiahnutými výsledkami štúdií magnetokalorických vlastností nanočasticových kompozitov (napr., Gd₂O₃/SiO₂, Co/Au) demonštrovala autorka práce ich potenciál v oblasti kryogénnych energetických aplikácií. Je

nutné poznamenať, že vývoj nových a efektívnych nanosystémov pre teranostickú biomedicínu a energetické aplikácie (viď kľúčové slová: *zdravie* a *energia*) je v súčasnosti celosvetovým prioritným trendom a je v strede záujmu základného a aplikovaného výskumu. Aj tento fakt dokumentuje, že téma magnetických nanočastíc riešená v predloženej inauguračnej práci je veľmi dôležitá a vysoko aktuálna. Pre štúdium si docentka Zeleňáková zvolila unikátne magnetické nanokompozity, ktoré boli dovtedy nepreskúmané a v mnohých smeroch svojimi dosiahnutými originálnymi výsledkami významne prispela k poznaniu v danej oblasti.

Význam dosiahnutých výsledkov z hľadiska ich vedeckého prínosu pre rozvoj vedného odboru a ich pôvodnosť

Docentka Zeleňáková dosiahla viaceré zaujímavé a *originálne* výsledky týkajúce sa štruktúry a makroskopického správania magnetických nanočastíc, z ktorých je možné vyzdvihnúť, napríklad:

- (i) kvantitatívne určenie vysokých hodnôt magnetického momentu a efektívnej anizotropie nanočastíc Fe_2O_3 nachádzajúcich sa v pórovitej usporiadanej SiO_2 matici;
- (ii) vysvetlenie feromagnetického správania čistej SiO_2 matrice (bez magnetických nanočastíc) pri nízkych teplotách;
- (iii) odhalenie morfológie nanočastíc Fe_2O_3 lokalizovaných v póroch SiO_2 matrice metódou SANS;
- (iv) objasnenie dvoch oddelených relaxačných procesov v CoO/Pt nanočasticiach s "jadro-obal" konfiguráciou;
- (v) experimentálny dôkaz existencie superferomagnetického stavu monodoménových nanočastíc usporiadaných do jednorozmerných reťazcov, ktorý bol nezávisle teoreticky predpovedaný;
- (vi) vyhodnotenie charakteristických atribútov magnetických nanočasticových kompozitov pre ich aplikáciu v biomedicíne, menovite v oblastiach magnetického rezonančného zobrazovania, magnetickej hypertermie a cielenej distribúcie liečiv;
- (vii) kvantitatívne určenie extrémálnej hodnoty zmeny magnetickej entropie nanokompozitu $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ pri vysokých magnetických poliach a nízkych teplotách;
- (viii) aplikácia škálovacej analýzy na nanočasticové systémy s "jadro-obal" konfiguráciou (systém Co/Au) a určenie povahy fázového prechodu medzi ich superparamagnetickým stavom a stavom superspinového skla.

Uvedené výsledky dokumentujú, že predložená inauguračná práca je originálnym a hodnotným prínosom pre ďalší rozvoj vedného odboru *fyzika*.

Zvolené vedecké metódy a postupy spracovania témy inauguračnej práce

Hlavnými experimentálnymi metódami použitými v práci sú magnetické merania teplotnej a poľovej závislosti magnetizácie a susceptibility nanosystémov. Pre prácu je však charakteristická aplikácia množstva experimentálnych techník (napr., XRD, HRTEM, SEM, SANS, SAXS, HE XRD, XANES, EXAFS, metóda škálovacej analýzy, testy cytotoxicity, MRI, ZP, merania tepelnej capacity, merania špecifického povrchu, XPS). Mnohé z týchto experimentálnych metód komparatívnym spôsobom prispeli k objasneniu makroskopického správania študovaných nanokompozitov. Ako príklad môže byť uvedená kombinácia metód škálovacej analýzy a merania tepelnej capacity, ktorá viedla k stanoveniu hodnoty zmeny magnetickej entropie v nanosystéme Co/Au . Aplikácia uvedených experimentálnych metód je vo všetkých prezentovaných prípadoch opodstatnená; vyhodnotenie a interpretácia nameraných dát sú korektné. Pozitívom práce z metodického hľadiska je aj etablovanie metódy škálovacej analýzy na PF UPJŠ pre analýzu magnetokalorického javu.

Námety a otázky do diskusie pri obhajobe inauguračnej práce

Napriek vedeckému prínosu predloženého súboru prác zostávajú mnohé vedecké problémy, týkajúce sa štruktúry a fyzikálnej interpretácie funkčného správania nanokompozitov obsahujúcich magnetické nanočastice, nedoriešené. Do diskusie pri obhajobe inauguračnej práce predkladám nasledujúce námety/otázky:

- 1). Vysokú hodnotu efektívnej anizotropie nanočastíc Fe_2O_3 nachádzajúcich sa v pórovitej usporiadanej SiO_2 matici prisudzuje autorka vyklopeným (canted) spinom Fe^{3+} katiónov nachádzajúcich sa v povrchových vrstvách antiferomagnetických nanočastíc. Nepokúšala sa autorka potvrdiť prítomnosť vyklopených spinov nezávislou experimentálnou technikou (napr., pomocou ^{57}Fe Mössbauerovej spektroskopie)?
- 2). Autorka interpretuje feromagnetické správanie čistej SiO_2 matrice (SBA-15) pri nízkych teplotách prítomnosťou adsorbovaných molekúl kyslíka na povrchových bodových defektoch matrice. Existuje experimentálny dôkaz ich existencie? Je známe, že spektroskopické metódy (napr., ESR, IR, PL) môžu poskytnúť priamy dôkaz prítomnosti povrchových defektov (kyslíkových vakancií, aktívnych radikálov) v systéme.
- 3). Veľmi zaujímavé, z hľadiska vedeckého ale aj praktického, je pozorovanie superferomagnetického stavu monodoménových nanočastíc Fe/SiO_2 usporiadaných do jednorozmerných reťazcov. Je známe, že jav superferomagnetizmu popisuje modifikovaná verzia Weissovej fenomenologickej teórie molekulárneho poľa. Aký je stav poznania zahrňujúceho výsledky súčasných vedeckých štúdií a súvisiaceho s podstatou formovania tohto typu magnetizmu? Aký je stav v oblasti mikroelektronických aplikácií jednorozmerných nanoreťazcov?
- 4). Praktická *in-vivo* aplikácia magnetických nanočastíc v biomedicíne zaostáva a nereflektuje ich súčasný intenzívny základný výskum. Je zrejmé, že tento fakt je ovplyvnený hlavne ich cytotoxicitou a biokompatibilitou. Sú známe, okrem SPION systémov, aj iné nanosystémy oficiálne schvalené pre humánnu aplikáciu? Aký je súčasný stav v tejto oblasti?
- 5). Ako uvádza autorka, aplikácia metódy škálovacej analýzy, s cieľom objasniť povahu fázového prechodu nanočasticových systémov medzi ich superparamagnetickým stavom a stavom superspinového skla, má určité obmedzenia. O aké obmedzenia ide? Autorka tiež diskutuje, že je potrebné navrhnuť novú teóriu popisujúcu tento proces v systémoch nanočastíc. Aký je súčasný stav poznania v oblasti fázových prechodov v nanosystémoch?

Záver

Konštatujem, že inauguračná práca docentky RNDr. Adriany Zeleňákovéj, DrSc. je originálnym a hodnotným prínosom pre ďalší rozvoj odboru *fyzika*. Práca spĺňa všetky podmienky stanovené v §1, ods. 1 Vyhlášky MŠVVaŠ SR č. 246/2019 Z. z. o postupe získavania vedecko-pedagogických titulov a umelecko-pedagogických titulov docent a profesor a je v súlade s Rozhodnutím rektora č. 2/2021, ktorým sa určujú kritériá na získanie vedecko-pedagogických titulov a umelecko-pedagogických titulov docent a profesor na UPJŠ v Košiciach.

Inauguračnej komisii pri Prírodovedeckej fakulte UPJŠ v Košiciach, menovanej dňa 1. júla 2025 *docentom RNDr. Romanom Sotákom, PhD.*, preto odporúčam prijať predloženú inauguračnú prácu na obhajobu a následne, v prípade úspešnej obhajoby, udeliť docentke RNDr. Adriane Zeleňákovéj, DrSc. vedecký titul *profesor* v odbore habilitačného a inauguračného konania *fyzika*.

prof. RNDr. Vladimír Šepelák, DrSc.