

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2016/19



ZAKLJUČNO POROČILO RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

Šifra projekta	Z1-5443
Naslov projekta	Izmenjalne interakcije v selenitih in teluridih ? ključ do novih funkcijskih nizkodimenzionalnih magnetnih sistemov
Vodja projekta	26465 Matej Pregelj
Tip projekta	Zt Podoktorski projekt - temeljni
Obseg raziskovalnih ur	3400
Cenovni razred	B
Trajanje projekta	08.2013 - 07.2015
Nosilna raziskovalna organizacija	106 Institut "Jožef Stefan"
Raziskovalne organizacije - soizvajalke	
Raziskovalno področje po šifrantu ARRS	1 NARAVOSLOVJE 1.02 Fizika 1.02.01 Fizika kondenzirane materije
Družbeno-ekonomski cilj	13.01 Naravoslovne vede - RiR financiran iz drugih virov (ne iz SUF)
Raziskovalno področje po šifrantu FOS	1 Naravoslovne vede 1.03 Fizika

B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

2. Povzetek raziskovalnega projekta¹

SLO

Čar nizkodimenzionalnih (low-D) magnetnih sistemov se skriva v njihovi dvojni naravi. Čeprav je njihova struktura zelo preprosta, kažejo veliko zanimivih osnovnih magnetnih stanj. Do teh pojavov pride zaradi izrazitih kvantnih fluktuacij, ki dušijo magnetne korelacije in s tem nasprotujejo vzpostavitvi reda dolgega dosega, katerega po drugi

strani favorizirajo magnetne anizotropije in interakcij vzdolž tretje dimenzije. Low-D magnetni sistemi so zato zelo občutljivi na majhne motnje, kar omogoča prepletanje različnih prostorskih stopenj in privede do kvantnih kritičnih točk, faze Luttingerjeve tekočine, magnetoelektričnega efekta ali anizotropnega toplotnega odziva; torej pojavov, ki so zanimivi tako s teoretičnega kot tudi tehnološkega vidika. Še več, njihova preprostost omogoča, da se pogosto da opažene odzive pojasniti z natančnimi analitičnimi ali preciznimi numeričnimi izračuni, kar dela low-D magnetne sisteme eno najbolj vročih področij v fiziki kondenzirane materije.

Nedavni preboj je spoznanje, da low-D magnetni sistemi niso omejeni zgolj na bakrove okside, saj so raznolike low-D magnetne mreže odkrili tudi v družini selenitov in teluritov. Ključna značilnost teh sistemov je, da vsebujejo katione s stereokemično aktivnim prostim elektronskim parom (PEP), npr. Se^{4+} in Te^{4+} , ki zmanjšujejo število kemijskih vezi v spojini in s tem potencialno znižajo dimenzionalnost magnetne mreže. Poleg tega lahko v teh spojinah magnetne interakcije potekajo preko M-O-T-O-M (M je ion prehodne kovine, T pa je Te^{4+} ali Se^{4+}) mostov. Tako se lahko nadejamo zanimivih učinkov, kot sta magnetoelektrična sklopitev ali nekonvencionalna toplotna prevodnost.

Za razliko od "preprostih" magnetnih oksidov, kjer je mogoče z Goodenough-Kanamorijevimi pravili oceniti izmenjalno interakcijo kar iz kristalne strukture, pa je izmenjalna narava $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ vezi je še vedno uganka, saj zahteva individualno eksperimentalno in teoretično obravnavo.

Glavni cilj projekta je bila izpeljava izmenjalnih pravil za $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ vezi in s tem omogočiti hitrejši razvoj novih low-D materialov z želenimi lastnostmi. Hkrati smo preučevali eksotična osnovna stanja in možne načine kako vplivati nanje, iskali nenavadne vzbuditvene načine in nove uporabnosti low-D $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ sistemov.

Uporabili smo širok nabor eksperimentalnih in teoretičnih orodij, s katerimi smo preučevali šest low-D $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ spojin, ki se razlikujejo v magnetni topologiji (skupek, 1D ali 2D), veznem ionu s PEP ($\text{Te}^{4+}, \text{Se}^{4+}$) in spinu ($1/2$, 1 ali $5/2$). To nam je omogočilo celovit pregled vedenja selenitov in teluritov in kako nanj vplivajo različne prostorske stopnje.

Poleg znanstvenih ciljev, je projekta pomagal postaviti temelje raziskavam nevtronskega sipanja na Institutu Jožef Stefan. Dodatno pa smo okrepili sodelovanja z vodilnimi raziskovalnimi skupinami po svetu ter izboljšati vpetost Slovenije v velike raziskovalne inštitucije.

ANG

The beauty of low-dimensional (low-D) magnetic systems lies within their amazing duality. Even though their topology is very simple, they exhibit a wealth of fascinating magnetic ground states, and exotic excitations. This occurs due to pronounced quantum fluctuations, which damp magnetic correlations and thus oppose the establishment of long-range order, favored by magnetic anisotropies or interactions along the third dimension. Low-D magnetic systems are hence highly susceptible to small perturbations, allowing the interplay between different degrees of freedom, leading to quantum critical points, Luttinger liquid phases, magnetoelectric or anisotropic thermal response – phenomena, which are attractive both from theoretical as well as technological aspects. Moreover, their simplicity allows that the observed response can often be explained by exact analytical or high-precision numerical calculations making low-D magnetic systems one of the hottest topics in condensed matter physics.

The recent breakthrough was the realization that low-D magnetic systems are not limited to copper-oxides, as diverse low-D magnetic lattices were found also in family of selenides and tellurides. The key feature of these systems is that they involve stereochemically active cations with lone-pair electrons (LPE), e.g., Se^{4+} and Te^{4+} , which reduce the number of chemical bonds and can thus lower the dimensionality of the magnetic lattice. Moreover, in these compounds magnetic interactions can be mediated by M-O-T-O-M (M is transition metal, T is Te^{4+} or Se^{4+}) bridges. As a result, intriguing effects like magnetoelectric coupling or unconventional thermal conductivity might occur.

However, in contrast to “simple” magnetic oxides, where exchange interactions can be estimated from the crystal structure by Goodenough-Kanamori rules, the exchange nature of $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ mediated pathways is still a puzzle, as it demands individual experimental and theoretical treatment.

The objective of this project was to explore exchange rules for $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ mediated pathways and thus to enable a faster route to new functional low-D materials. In parallel, exotic ground states and possible ways to influence them were explored, as well as unconventional excitations and novel functionalities of low-D $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ systems were found.

A broad range of experimental and theoretical tools were employed to study a number of low-D $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ compounds that vary in the exchange topology (cluster, 1D, 2D), in the exchange bridging lone-pair cation (Te^{4+} , Se^{4+}) as well as in spin (1/2, 1, 5/2). This provided a comprehensive overview of the selenides/tellurides' behavior and insight to the specific effects of different degrees of freedom.

Beside the scientific goals, the project set foundations of magnetic neutron scattering research at Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia, as well as it developed collaborations with leading research groups over the world.

3. Poročilo o realizaciji predloženega programa dela na raziskovalnem projektu²

V prvem delu (letu) projekta smo se osredotočili na določanje (i) **jakosti izmenjalnih interakcij** preko $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ ionov, kar smo za sisteme $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{X}$ ($\text{X} = \text{Br}, \text{Cl}$) in CuSe_2O_5 v večji meri že določili leta 2013. V letu 2014 pa smo se posvetili še študiju interakcij v sistemu $\beta\text{-TeVO}_4$ in raziskavam (ii) **nenavadnih osnovnih stanj** in (iii) **njihovih vzbuditev** na sistemih $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{X}$ ($\text{X} = \text{Br}, \text{Cl}$), CuSe_2O_5 in $\beta\text{-TeVO}_4$. Tako smo identificirali več izjemno nenavadnih in zanimivih osnovnih stanj ter preučevali njihove vzbuditve. Končno, smo v sistemu $\text{Cu}_3\text{Bi}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Br}$ odkrili izjemno široko-frekvenčno absorpcijo, ki odpira zelo zanimive (iv) **možnosti uporabe** podobnih materialov za filtriranje elektromagnetnih polj.

Študije katerih rezultati so bili leta 2013 objavljeni v izvirnih znanstvenih člankih:

- *Sistema $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{X}$ ($\text{X} = \text{Br}, \text{Cl}$):*

V preteklem letu smo intenzivno raziskovali dva plastovita multiferoična sistema, to sta izostrukturalni spojini **$\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{Br}$** in **$\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{Cl}$** . Z uporabo širokega nabora eksperimentalnih tehnik (jedrske kvadrupolne in magnetne resonance, muonske spinske relaksacije, nevtronskega sipanja, meritev specifične toplote in magnetne susceptibilnosti) smo tako uspeli določiti nizko- in visokotemperaturna osnovna magnetna stanja ter prehode med njimi v obeh sistemih. Gre za ključno informacijo, na podlagi katere lahko preverimo verodostojnost jakosti posameznih izmenjalnih interakcij, ki so bile izračunane v naših predhodnih delih. Poleg tega, smo iz temperaturnega razvoja magnetnega reda uspeli identificirati tudi izmenjalne poti, ki se pri tem najbolj izrazito spreminjajo. Še več, primerjava teh rezultatov z meritvami rentgenske difrakcije in jedrske kvadrupolne resonance nam je celo omogočila, da smo lahko določili katera Fe-O-Te-O-Fe izmenjalna pot, oz. kateri Te^{4+} ion, je nosilec močne elektromagnetne sklopitve, odgovorne za vzpostavitev električne polarizacije v nizkotemperaturnem osnovnem stanju. Izkaže se, da so strukturne spremembe bistveno bolj izrazite v sistemu $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{Cl}$, kar je posledica manjše medmrežne razdalje med posameznimi železooksidnimi plastmi. Kljub temu, pa je magnetnovzbujena električna polarizacija v obeh sistemih skoraj enaka. Rezultati teh ugotovitev, ki so bili objavljeni v člankih »M. Pregelj et al., Evolution of magnetic and crystal structures in the multiferroic $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{Br}$. *Phys. Rev. B*, 87, 144408 (2013) [COBISS.SI-ID [26662439](#)]« in »M. Pregelj et al., Multiferroicity in the geometrically frustrated $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{Cl}$. *Phys. Rev. B* 88, 224421 (2013) [COBISS.SI-ID [27342375](#)]« tako niso samo pomembni za dosego osnovnega cilja projekta (i) ampak tudi ciljev (ii) in (iv).

- *Sistem CuSe_2O_5 :*

Vzporedno s študijami $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{X}$ ($\text{X} = \text{Br}, \text{Cl}$) sistemov, smo preučevali tudi sistem spinskih verig CuSe_2O_5 , kjer podobno kot v sistemih $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{X}$ osrednjo funkcijo izmenjalne interakcije nosijo ioni s prostimi elektronskimi pari (tokrat Se^{4+}). Konkretno, določili smo magnetno strukturo osnovnega stanja, ki ga zaznamujejo nagnjeni spini in reduciran moment, ki je posledica kvantnih fluktuacij. S pomočjo različnih komplementarnih eksperimentalnih tehnik (nevtronskega sipanja, muonske spinske relaksacije in antiferromagnetne resonance) smo določili oz. potrdili še jakosti dominantnih magnetnih interakcij in celo magnetno anizotropijo tega sistema, ki je odgovorna za nagnjenost spinov in za relativno majhno kritično polje, ki vodi do »spin-flop« magnetnega prehoda. Naši rezultati, ki smo jih objavili v članku »M. Herak et al., Magnetic order and low-energy excitations in the quasi-one-dimensional antiferromagnet CuSe_2O_5 with staggered fields. *Phys. Rev. B* 87, 104413 (2013). [COBISS.SI-ID [26630695](#)]« tako širijo razumevanje izmenjalnih interakcij, ki vključujejo ione s prostimi elektronskimi pari – cilj (i), kot tudi poznavanje nenavadnih osnovnih stanj – cilj (ii) ter njihovih vzbuditev (iii).

Študije katerih rezultati so bili leta 2014 sprejeti v objavo kot izvirni znanstveni članki:

- Razredčeni magnetni oksidi $\text{A}_{1-x}\text{B}_x\text{TiO}_3$ ($\text{A} = \text{Sr}, \text{Ba}$, $\text{B} = \text{Mn}, \text{Fe}$)

V preteklem letu smo se intenzivno posvetili študiji magnetoelektrične sklopitve v razredčenih magnetnih oksidih. Izbrani oksidi po naravi kažejo ferroelektrične lastnosti, tem pa želimo z vnašanjem ionov prehodnih kovin vsiliti še magnetni odziv. Cilj je, pripraviti material, v katerem soobstajata magnetna in ferroelektrična ureditev že pri sobni temperaturi, kar je ključno za tehnološko uporabnost multiferroičnih materialov, ki so eden izmed osnovnih ciljev projekta. Gre za alternativni pristop direktni magnetoelektrični sklopitvi, kjer se električna polarizacija v magnetno frustriranih sistemih vzpostavi zaradi kompleksne magnetne ureditve.

Z uporabo elektronske spinske resonance in muonske spinske relaksacije smo pokazali, da dopiranje SrTiO_3 z Mn ne vodi do vzpostavitve magnetnega reda dolgega dosega, saj ne glede na stopnjo dopiranja sistem ostane paramagneten do najnižjih dosegljivih temperatur. Še več, ugotovili smo, da distribucija ionov Mn^{2+} in Mn^{4+} ni naključna, ampak se ti kopičijo v nanometerske skupke. Ta študija je bila objavljena v članku »A. Zorko, M. Pregelj et al., Intrinsic paramagnetism and aggregation of manganese dopants in SrTiO_3 , *Phys. Rev. B* 89, 094418 (2014) [COBISS.SI-ID [27590951](#)].«

- Razredčeni magnetni oksidi $\text{A}_{1-x}\text{B}_x\text{TiO}_3$ ($\text{A} = \text{Sr}, \text{Ba}$, $\text{B} = \text{Mn}, \text{Fe}$)

Dopiranje BaTiO_3 z Fe ioni je še posebej zanimivo, ker je dosegljiva stopnja dopiranja (tudi preko 40 %) bistveno višja kot v ostalih magnetnih oksidih (<10 %). To dejstvo govori v prid splošno sprejeti domnevi, da je mogoče v heksagonalno BaTiO_3 rešetko vnesti dovolj veliko magnetnih Fe^{3+} ionov, da med njimi pride do izmenjalne interakcije, potrebne za vzpostavitev magnetne ureditve. V naši študiji smo z uporabo širokega nabora eksperimentalnih tehnik, od magnetizacijskih meritev do lokalnih resonančnih tehnik, kot sta elektronska spinska resonanca in mionska spinska relaksacija, pokazali ravno nasprotno. Natančneje, pokazali smo, da ferromagnetni signal, ki se pojavi pri dodatnem pregrevanju vzorca, izvira iz kubičnega polimorfa BaTiO_3 , ki se kopiči v majhnih območjih, kjer ga stabilizirajo strukturne napetosti. Rezultati naših raziskav so bili objavljeni v članku: »A. Zorko, M. Pregelj et al., Strain-Induced Extrinsic High-Temperature Ferromagnetism in the Fe-Doped Hexagonal Barium Titanate, *Sci. Rep.* 5, 7703 (2015) [COBISS.SI-ID [28275751](#)].«

Študije katerih rezultati so bili leta 2015 sprejeti v objavo kot izvirni znanstveni članki:

- Sistem $\beta\text{-TeVO}_4$:

Z meritvami nevtronskega sipanja, magnetizacije v visokih magnetnih poljih ter specifične toplote smo natančno raziskali magnetni fazni diagram enodimenzionalnega spinskega sistema $\beta\text{-TeVO}_4$ (V^{4+} , $S = 1/2$). Eksperimentalno določeni diagram skoraj povsem odgovarja teoretični napovedi za cikcak spinsko ($S = 1/2$) verigo s ferromagnetnimi interakcijami med najbližjimi in antiferromagnetnimi interakcijami med drugimi

najbližjimi sosedi. Še več, s pravilno izbiro razmerja teh dveh interakcij lahko poleg faznega diagrama opišemo še inkomenzurabilno modulacijo magnetne ureditve ter temperaturni odvisnosti magnetne susceptibilnosti in specifične toplote. Najpomembnejše pa je odkritje nenavadne dodatne nanometrijske modulacije magnetne strukture pri prehodu med kolinearno in kiralno ureditvijo. Izvor le te povezujemo s prisotnostjo šibkih frustrirajočih interakcij med sosednjimi spinskimi verigami. Rezultati naših raziskav so bili objavljeni v članku: »M. Pregelj et al., Spin-stripe phase in a frustrated zigzag spin-1/2 chain, Nat. Comm. **6**, 7255, (2015) [COBISS.SI-ID [28648487](#)]«. Ti rezultati so tako pomembni za doseg osnovnega cilja projekta (i) kot tudi cilja (ii).

- *Sistem $\text{Cu}_3\text{Bi}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Br}$:*

Na plastovitemu sistemu $\text{Cu}_3\text{Bi}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Br}$ smo s kombinacijo meritev magnetnega sipanja, mionske spinske relaksacije, magnetne susceptibilnosti ter elektronske magnetne resonance raziskovali ozko območje v okolici metamagnetnega prehoda, kjer v tako-imenovani mešani fazi soobstajata antiferro- in ferro-magnetni ureditvi. Kljub temu, da je obstoj omenjene faze v metamagnetnih sistemih že dolgo znan, smo šele mi opazili, da sistem v tej fazi absorbira elektromagnetno valovanje v izjemno širokem frekvenčnem območju (vsaj od 100 Hz do preko 500 GHz). Ta lastnost, na katero lahko vplivamo z magnetnim poljem, pa je nadvse zanimiva tudi s tehnološkega stališča. Naše raziskave so bile objavljene v članku: »M. Pregelj et al., Controllable broadband absorption in the mixed phase of metamagnets, Adv. Funct. Mater. **25**, 3634 (2015) [COBISS.SI-ID [28566311](#)]«. To delo je ključno za doseg ciljev (iii) in (iv).

Sodelovanje s tujimi in domačimi parterji:

Meritve nevtronskega sipanja in mionske spinske relaksacije so bile izvedene med obiski na Paul Scherrer Inštitutu, Villigen, Švica, v tesnem sodelovanju s tamkajšnjimi raziskovalci, dr. Oksano Zaharko ter dr. Hubertusom Luetkensom. Gre za ustaljeno sodelovanje, ki se odraža tudi v kontinuiteti skupnih objav.

Del muonskih meritev je bil opravljen v raziskovalnem centru ISIS, Rutherford Appleton Laboratory, Harwell Oxford, Velika Britanija, v sodelovanju z dr. Adrianom D. Hillierjem. Ta povezava je bistvena za meritve dolgih relaksacijskih časov, ki na PSI niso mogoče.

Meritve magnetizacije v visokih magnetnih poljih, so bile izvedene na Institute for Materials Research, Japonska v sodelovanju z prof. Hirokom Nojirijem. To sodelovanje je izjemno pomembno, saj dopolnjuje naše lokalne eksperimentalne zmogljivosti.

Ne nazadnje, vzorci sistemov $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{Cl}$, $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{Cl}$, CuSe_2O_5 in $\beta\text{-TeVO}_4$ so bili narejeni v Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Švica, vzorce $\text{Cu}_3\text{Bi}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Br}$ pa smo dobili od skupine iz Centra za elektronske korelacije in magnetizem, Univerze v Augsburgu, Nemčija.

4. Ocena stopnje realizacije programa dela na raziskovalnem projektu in zastavljenih raziskovalnih ciljev³

Raziskovalni program je tekkel po načrtanih smernicah, t.j., glavni poudarek je bil na (i) **raziskavi mrež magnetnih izmenjalnih interakcij** ter (ii) **raziskavah nenavadnih osnovnih stanj** in njihove občutljivosti na zunanje perturbacije. V drugi polovici projekta, smo težišče raziskav prenesli na (iii) **iskanje nekonvencionalnih magnetnih vzbuditev** in (iv) **iskanju novih funkcionalnosti** nizkodimenzionalnih $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ sistemov.

Sklop (i) je baziral na preučevanju izmenjalnih poti v sistemih $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{Br}$ in $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{Cl}$ [M. Pregelj et al., Phys. Rev. B **86**, 054402 (2012), M. Pregelj et al., Phys. Rev. B **87**, 144408 (2013) in M. Pregelj et al., Phys. Rev. B **88**, 224421 (2013)]. Podobno smo identificirali interakcije v sistemu $\text{Cu}_3\text{Bi}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Br}$ [M. Pregelj et al., Phys. Rev. B **86**, 144409 (2012)]. Natančno smo opisali tudi sistem CuSe_2O_5 [M. Herak et al., Phys. Rev. B **87**, 104413

(2013)]. Končno, smo odkrili, da lahko sistem β -TeVO₄ opišemo kot spinsko verigo z nasprotujočimi si interakcijami med najbližjimi in naslednjimi najbližjimi sosedi [M. Pregelj et al., Nat. Comm. **6**, 7255, (2015)]. **Naši rezultati jasno kažejo, da izmenjalne interakcije tipa M-O-Te/Se-O-M, kjer so razdalje med posameznimi atomi manjše od dveh Angstromov, tipično dosegaajo jakosti nekaj 10 Kelvinov in so (skoraj vedno) antiferomagnetne, ne glede na kote vzdolž izmenjalne poti.**

Velik korak naprej smo naredili tudi pri razumevanju in odkrivanju nenavadnih osnovnih stanj (ii), saj smo **določili osnovna stanja v sistemih** FeTe₂O₅Cl [M. Pregelj et al., Phys. Rev. B **88**, 224421 (2013)], CuSe₂O₅ [M. Herak et al., Phys. Rev. B **87**, 104413 (2013)], in β -TeVO₄ [M. Pregelj et al., Nat. Comm. **6**, 7255, (2015)]. V prvem primeru smo opazili v osnovnem magnetnem stanju pojav električne polarizacije. V drugem primeru je bil odziv sistema izrazito enodimenzionalen. V tretjem primeru, pa smo odkrili nenavadno dodatno nanometrsko modulacijo magnetne strukture, ki nastopi zaradi dodatne geometrijske frustracije med spinskimi verigami in je prisotna zgolj v ozkem temperaturnem območju.

V sklopu (iii) smo prišli do odkritja izjemno zanimivih magnetnih stanj tako v β -TeVO₄ (glej zgoraj) kot tudi v Cu₃Bi(SeO₃)₂O₂Br sistemu. V slednjem smo preučevali zelo zanimivo mešano fazo, ki je še posebej zanimiva zaradi svojih **nenavadnih vzbuditev, ki se zvezno raztezajo preko izjemno širokega energijskega območja** [M. Pregelj et al., Adv. Funct. Mater. **25**, 3634 (2015)]. **Ta pojav je nadvse zanimiv tudi s tehnološkega oz. aplikativnega gledišča** (sklop iv).

V sklopu (iv) smo preučevali še možnost alternativnega magnetoelektričnega mehanizma na osnovi dopiranja ferroelektričnih oksidnih materialov z magnetnimi ioni. Naši rezultati kažejo, da ta pristop ni preveč obetaven [A. Zorko, M. Pregelj et al., Phys. Rev. B **89**, 094418 (2014) in Sci. Rep. **5**, 7703 (2015)] in govorijo v prid hipotezi projekta, ki se obrača na direktno magnetoelektrično sklopitev, kjer električno polarizacijo inducira kompleksna magnetna ureditev.

5. Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta oziroma sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine⁴

Program je tekel po načrtanem planu, zato spremembe niso bile potrebne.

6. Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine⁵

Znanstveni dosežek			
1.	COBISS ID	28648487	Vir: COBISS.SI
	Naslov	Progasta spinska faza v frustrirani cikcak spin-1/2 verigi	
		SLO	Spin-stripe phase in a frustrated zigzag spin-1/2 chain
	Opis	SLO	Periodični motivi se pojavljajo v različnih naravnih sistemih, kjer sta prisotni vsaj dve konkurenčni fazi. V močno koreliranih elektronskih sistemih se tako obnašanje običajno povezuje s tekmovanjem med interakcijami kratkega in dolgega dosega, na primer, med izmenjalno in dipolarno interakcijo v tankih feromagnetnih plasteh. Tukaj bomo pokazali, da se lahko progaste spinske teksture razvijejo tudi v antiferomagnetih, kjer so dipolarne magnetne interakcije dolgega dosega odsotne. Celovita analiza magnetne susceptibilnosti, magnetizacije v visokih poljih, specifične toplote in nevtronske difrakcije razkriva β -TeVO ₄ kot skoraj popolno realizacijo frustrirane (cik-cak) feromagnetne spin-1/2 verige. Presenetljivo, se v povišanem magnetnem polju razvije progasta spinska faz, zaradi šibkih frustriranih izmenjalnih interakcij kratkega dosega med

			verigami, ob možni pomoči simetrijsko dovoljene električne polarizacije. Ta koncept predstavlja alternativno pot za vzpostavitev progastih faz v močno koreliranih elektronskih sistemih in lahko pripomore k razumevanju drugih razširjenih, a še vedno nerazumljenih, pojavov prog v teh sistemih.
		ANG	Motifs of periodic modulations are encountered in a variety of natural systems, where at least two rival states are present. In strongly correlated electron systems, such behaviour has typically been associated with competition between short- and long-range interactions, for example, between exchange and dipole-dipole interactions in the case of ferromagnetic thin films. Here we show that spin-stripe textures may develop also in antiferromagnets, where long-range dipole-dipole magnetic interactions are absent. A comprehensive analysis of magnetic susceptibility, high-field magnetization, specific heat and neutron diffraction measurements unveils b-TeVO ₄ as a nearly perfect realization of a frustrated (zigzag) ferromagnetic spin-1/2 chain. Notably, a narrow spin-stripe phase develops at elevated magnetic fields due to weak frustrated short-range interchain exchange interactions, possibly assisted by the symmetry-allowed electric polarization. This concept provides an alternative route for the stripe formation in strongly correlated electron systems and may help understanding of other widespread, yet still elusive, stripe-related phenomena.
	Objavljeno v	Nature Publishing Group; Nature communications; 2015; Vol. 6; str. 7255-1-7255-8; Impact Factor: 11.470; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.706; A'': 1; A': 1; WoS: RO; Avtorji / Authors: Pregelj Matej, Zorko Andrej, Zaharko Oksana, Nojiri H., Berger H., Chapon L. C., Arçon Denis	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
	COBISS ID	28566311	Vir: COBISS.SI
2.	Naslov	SLO	Krmiljene širokopasovne absorpcije v mešani fazi metamagnetov
		ANG	Controllable broadband absorption in the mixed phase of metamagnets
	Opis	SLO	Materiali s širokim absorpcijskim pasom, so zelo zaželeni pri filtriranju in obdelavi elektromagnetnih signalov, še posebej, če se absorpcijo lahko kontrolira od zunaj. Tukaj predstavljamo novo vrsto širokopasovnih absorpcijskih materialov. In sicer, plastoviti metamagneti kažejo zvezen spekter elektromagnetnih vzbuditev v mešani fero- in antiferromagnetni fazi, ki se vzpostavi v zunanjem magnetnem polju. Z vrsto dopolnilnih eksperimentalnih tehnik, ki vključujejo nevtronsko sipanje, muonsko spinsko relaksacijo, specifično toploto, ac in dc meritve magnetizacije in meritve elektronske magnetne resonance, smo preučili fazni diagram Cu ₃ Bi(SeO ₃) ₂ O ₂ Br in se ugotovili, da se vzbuditve v mešani fazi raztezajo najmanj preko desetih frekvenčnih velikostnih razredov. Ti rezultati razkrivajo nov dinamičen vidik mešane faze v metamagnetih in odpirajo nov pristop k kontroliranemu filtriranju mikrovalov.
		ANG	Materials with broad absorption bands are highly desirable for electromagnetic filtering and processing applications, especially if the absorption can be externally controlled. Here, a new class of broadband-absorption materials is introduced. Namely, layered metamagnets exhibit an electromagnetic excitation continuum in the magnetic-field-induced mixed ferro- and antiferromagnetic phase. Employing a series of complementary experimental techniques involving neutron scattering, muon spin relaxation, specific heat, ac and dc magnetization measurements, and electron magnetic resonance, a detailed magnetic phase diagram of Cu ₃ Bi(SeO ₃) ₂ O ₂ Br is determined and it is found that the excitations in the mixed phase extend over at least ten decades of frequency. The results, which reveal a new dynamical aspect of the mixed phase in metamagnets, open up a novel approach to controllable

			microwave filtering.
	Objavljeno v	Wiley Interscience; Advanced functional materials; 2015; Vol. 25, issue 24; str. 3634-3640; Impact Factor: 11.805; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.709; A'': 1; A': 1; WoS: DY, EI, NS, PM, UB, UK; Avtorji / Authors: Pregelj Matej, Zorko Andrej, Gomilšek Matjaž	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
3.	COBISS ID	28275751	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Napetostno vsiljen ne-lasten visokotemperaturni ferromagnetizem v Fe-dopiranem heksagonalnem barijevem titanatu
		ANG	Strain-induced extrinsic high-temperature ferromagnetism in the Fe-doped hexagonal barium titanate
	Opis	SLO	Razredčeni magnetni polprevodniki, ki imajo lasten statičen magnetizem pri visokih temperaturah, predstavljajo obetajoč razred multifunkcionalnih materialov z veliko možnostjo aplikacije v spintroniki in magneto-optiki. V heksagonalnem Fe-dopiranem razredčenem magnetnem oksidu, 6H-BaTiO ₃ , so že poročali o ferromagnetizmu pri sobni temperaturi. Ferromagnetizem je splošno sprejet kot lastnost tega materiala, kljub svoji nenavadni odvisnosti od stopnje dopiranja in sinteznih pogojev. Tu predstavljena kombinacija magnetizacijskih meritev in komplementarnih meritev z lokalnimi tehnikami, kot sta elektronska spinska resonanca in mionska spinska relaksacija, pa to domnevo izpodbija. Ferromagnetni prehod se pojavi okoli 700 K le v vzorcih, ki so bili dodatno pregreti; hkrati pa kaže zelo majhno povprečno vrednost urejenega magnetnega momenta. Poleg tega so bile opažene številne dodatne magnetne anomalije pri nižjih temperaturah. Te sovpadajo z elektronskimi nestabilnostmi v Fe-dopiranem 3C-BaTiO ₃ pseudokubičnem polimorfu. Še več, porazdelitev železovih dopantov z zamrznjenimi magnetnimi momenti ni enakomerna. Naši rezultati kažejo, da statičen magnetizem ni lastnost heksagonalne faze, temveč izhaja iz razpršenih območji pseudokubične faze, ki obstajajo zaradi napetosti v kristalni strukturi. Izpostaviti velja ključno vlogo notranje napetosti pri ugotavljanju defektnega ferromagnetizma v sistemih z več možnimi strukturnimi fazami, ki med seboj tekmujejo.
		ANG	Diluted magnetic semiconductors possessing intrinsic static magnetism at high temperatures represent a promising class of multifunctional materials with high application potential in spintronics and magneto-optics. In the hexagonal Fe-doped diluted magnetic oxide, 6H-BaTiO ₃ , room-temperature ferromagnetism has been previously reported. Ferromagnetism is broadly accepted as an intrinsic property of this material, despite its unusual dependence on doping concentration and processing conditions. However, the here reported combination of bulk magnetization and complementary in-depth local-probe electron spin resonance and muon spin relaxation measurements, challenges this conjecture. While a ferromagnetic transition occurs around 700 K, it does so only in additionally annealed samples and is accompanied by an extremely small average value of the ordered magnetic moment. Furthermore, several additional magnetic instabilities are detected at lower temperatures. These coincide with electronic instabilities of the Fe-doped 3C-BaTiO ₃ pseudocubic polymorph. Moreover, the distribution of iron dopants with frozen magnetic moments is found to be non-uniform. Our results demonstrate that the intricate static magnetism of the hexagonal phase is not intrinsic, but rather stems from sparse strain-induced pseudocubic regions. We point out the vital role of internal strain in establishing defect ferromagnetism in systems with competing structural phases.
	Objavljeno v	Nature Publishing Group; Scientific reports; 2015; Vol. 5; str. 7703-1-7703-7; Impact Factor: 5.578; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.706; A'': 1; A': 1; WoS: RO; Avtorji / Authors: Zorko	

		Andrej, Pregelj Matej, Gomilšek Matjaž, Jagličić Zvonko, Pajić Damir, Telling M., Arčon Iztok, Mikulska Iuliia, Valant Matjaž	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
4.	COBISS ID	27590951	Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i>	Lasten paramagnetizem in kopičenje manganovih dopantov v SrTiO ₃
		<i>ANG</i>	Intrinsic paramagnetism and aggregation of manganese dopants in SrTiO ₃
	Opis	<i>SLO</i>	Z uporaba lokalnih magnetnih tehnik mionske spinske relaksacije in elektronske spinske resonance smo raziskovali Mn-induciran magnetizem v perovskitu SrTiO ₃ , ki ima široko-pasovno energijsko režo. Naši rezultati jasno kažejo, da ta razredčen magnetni oksid ostaja paramagneten vse do nizkih temperatur v obeh primerih dopiranja, in sicer, ko Mn nadomesti Sr ali Ti. Poleg tega sta obe eksperimentalni tehniki pokazali, da je porazdelitev posameznih Mn ²⁺ in Mn ⁴⁺ ionov nenaključna, saj se ti ion delno kopičijo v nanometrijske skupke.
		<i>ANG</i>	Using local-probe magnetic-characterization techniques of muon spin relaxation and electron spin resonance we have investigated the Mn-induced magnetism of the wide-band-gap perovskite SrTiO ₃ . Our results clearly demonstrate that this diluted magnetic oxide remains paramagnetic down to low temperatures for both doping cases, i.e., when Mn substitutes for Sr or Ti. In addition, both experimental techniques have revealed that the distribution of individual Mn ²⁺ and Mn ⁴⁺ ions is nonrandom, as these ions partially aggregate into nanosized clusters.
	Objavljeno v	The American Institute of Physics; Physical review. B, Condensed matter and materials physics; 2014; Vol. 89, no. 9; str. 0094418-1-094418-8; Impact Factor: 3.736; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 3.933; A': 1; WoS: UK; Avtorji / Authors: Zorko Andrej, Pregelj Matej, Luetkens H., Axelsson Anna-Karin, Valant Matjaž	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
5.	COBISS ID	27342375	Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i>	Multiferoičnost v geometrijsko frustriranem FeTe ₂ O ₅ Cl
		<i>ANG</i>	Multiferroicity in the geometrically frustrated FeTe ₂ O ₅ Cl
	Opis	<i>SLO</i>	Plastovito spojino FeTe ₂ O ₅ Cl smo preučevali z meritvami specifične toplote, muonske spinske relaksacije, jedrske magnetne resonance, dielektričnih meritev ter nevtronske difrakcije in sinhrotronskih meritev. Naše izsledke smo primerjali z rezultati na izostrukturi spojini FeTe ₂ O ₅ Br. Ugotovili smo, da je pri nizkih temperaturah magnetno urejeno stanje podobno kot v FeTe ₂ O ₅ Br in je tudi multiferoično: eliptično amplitudno modulirana magnetna cikloida in električna polarizacija se hkrati razvijeta pod 11 K. V primerjavi s FeTe ₂ O ₅ Br se eliptična ovojnica zavrti za 75(4) stopinj, smer električne polarizacije pa je veliko bolj občutljiva na jakost električnega polja. Predlagamo, da razlike med obema izostrukturinima spojinama izhajajo iz geometrijske frustracije, ki ojači učinke sicer majhne magnetne anizotropije Fe ³⁺ (S = 5/2) ionov. Končno, sinhrotronski rezultati kažejo, da na mikroskopski ravni magnetoelektrična sklopitev vodi do zasuca atomov O1, kot odgovor na polarizacijo osamljenih elektronskih parov ionov Te ⁴⁺ , ki sodelujejo v Fe-O-Te-O Fe izmenjalnih mostovih.
			The layered FeTe ₂ O ₅ Cl compound was studied by specific-heat, muon-spin relaxation, nuclear magnetic resonance, and dielectric as well as neutron and synchrotron x-ray diffraction measurements, and the results were compared to isostructural FeTe ₂ O ₅ Br. We find that the low-temperature ordered state, similarly as in FeTe ₂ O ₅ Br, is multiferroic: the elliptical amplitude-modulated magnetic cycloid and the electric polarization simultaneously develop below 11 K. However, compared to FeTe ₂ O ₅ Br, the

	ANG	magnetic elliptical envelope rotates by 75(4) deg and the orientation of the electric polarization is much more sensitive to the applied electric field. We propose that the observed differences between the two isostructural compounds arise from geometric frustration, which enhances the effects of otherwise subtle Fe ³⁺ ($S = 5/2$) magnetic anisotropies. Finally, x-ray diffraction results imply that, on the microscopic scale, the magnetoelectric coupling is driven by shifts of the O1 atoms, as a response to the polarization of the Te ⁴⁺ lone-pair electrons involved in the Fe-O-Te-O-Fe exchange bridges.
Objavljeno v		The American Institute of Physics; Physical review. B, Condensed matter and materials physics; 2013; Vol. 88, no. 22; str. 224421-1- 224421-10; Impact Factor: 3.664; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 3.851; A': 1; WoS: UK; Avtorji / Authors: Pregelj Matej, Zorko Andrej, Zaharko Oksana, Jeglič Peter, Kutnjak Zdravko, Jagličič Zvonko, Jazbec Simon, Luetkens H., Hillier A. D., Berger Helmuth, Arčon Denis
Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek

7. Najpomembnejši družbeno-ekonomski rezultati projektne skupine

	Družbeno-ekonomski dosežek		
1.	COBISS ID	110	Vir: vpis v obrazec
	Naslov	SLO	Progasta spinska faza v frustrirani spinski verigi
		ANG	Spin-stripe phase in a frustrated spin chain
	Opis	SLO	Motivi periodične modulacije se pojavljajo v različnih naravnih sistemih. V močno koreliranih elektronskih sistemih tako obnašanje običajno povezujemo s tekmovanjem med interakcijami kratkega in dolgega dosega, na primer, med izmenjalno in dipolarno interakcijo v tankih feromagnetnih plasteh. V tem predavanju bom predstavil naše nedavno odkritje, da se lahko progaste spinske teksture razvijejo tudi v antiiferomagnetih, kjer so dipolarne interakcije dolgega dosega odsotne. Celovita analiza meritev magnetne susceptibilnosti, magnetizacije v visokih poljih, specifične toplote in nevtronske difrakcije kaže, da je sistem beta-TeVO ₄ skoraj popolna realizacija frustrirane (cikcak) feromagnetne spin-1/2 verige. V ozkem območju zunanega magnetnega polja smo odkrili progasto spinsko fazo, ki se razvije zaradi šibkih frustriranih izmenjalnih interakcij kratkega dosega med verigami, ob morebitni podpori simetrijsko dovoljene električne polarizacije. Ta koncept predvideva alternativno pot za vzpostavitev progastih struktur v močno koreliranih elektronskih sistemih.
		ANG	Motifs of periodic modulations are encountered in a variety of natural systems. In strongly correlated electron systems, such behaviour has typically been associated with competition between short- and long-range interactions, for example, between exchange and dipole-dipole interactions in the case of ferromagnetic thin films. In this talk I will present our recent discovery that spin-stripe textures may develop also in antiferromagnets, where long-range dipole-dipole magnetic interactions are absent. In particular, a comprehensive analysis of magnetic susceptibility, high-field magnetization, specific-heat and neutron diffraction measurements unveils beta-TeVO ₄ as a nearly perfect realization of a frustrated (zigzag) ferromagnetic spin-1/2 chain. A narrow spin-stripe phase has been found at elevated magnetic fields that develop due to weak frustrated short-range interchain exchange interactions, possibly assisted by the symmetry-allowed electric polarization. This concept provides an alternative route for the stripe formation in strongly correlated electron systems.

	Šifra	B.04 Vabljen predavanje	
	Objavljeno v	Vabljen predavanje (kolokvij) na Inštitutu za Fiziku, Zagreb, 2. 10. 2015	
	Tipologija	3.14 Predavanje na tuji univerzi	
	COBISS ID	29195047	Vir: COBISS.SI
2.	Naslov	SLO	Progasta spinska faza v frustrirani spinski verigi
		ANG	Spin-stripe phase in a frustrated spin chain
	Opis	SLO	V tem predavanju bom predstavil naše nedavno odkritje, da se lahko progaste spinske teksture razvijejo tudi v antiferomagnetih, kjer so dipolarne interakcije dolgega dosega odsotne. Celovita analiza meritev magnetne susceptibilnosti, magnetizacije v visokih poljih, specifične toplote in nevtronske difrakcije kaže, da je sistem β -TeVO ₄ skoraj popolna realizacija frustrirane (cikcak) feromagnetne spin-1/2 verige. V ozkem območju zunanega magnetnega polja smo odkrili progasto spinsko fazo, ki se razvije zaradi šibkih frustriranih izmenjalnih interakcij kratkega dosega med verigami, ob morebitni podpori simetrijsko dovoljene električne polarizacije. Ta koncept predvideva alternativno pot za vzpostavitev progastih struktur v močno koreliranih elektronskih sistemih.
		ANG	In this talk I will present our recent discovery that spin-stripe textures may develop also in antiferromagnets, where long-range dipole-dipole magnetic interactions are absent. In particular, a comprehensive analysis of magnetic susceptibility, high-field magnetization, specific-heat and neutron diffraction measurements unveils β -TeVO ₄ as a nearly perfect realization of a frustrated (zigzag) ferromagnetic spin-1/2 chain. A narrow spin-stripe phase has been found at elevated magnetic fields that develop due to weak frustrated short-range interchain exchange interactions, possibly assisted by the symmetry-allowed electric polarization. This concept provides an alternative route for the stripe formation in strongly correlated electron systems.
	Šifra	B.03 Referat na mednarodni znanstveni konferenci	
	Objavljeno v	s. n.]; Abstract book; 2015; Avtorji / Authors: Pregelj Matej	
	Tipologija	1.12 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci	
3.	COBISS ID	2754660	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Vztrajna spinska dinamika v amplitudno moduliranih osnovnih magnetnih stanjih
		ANG	Persistent spin dynamics in amplitude modulated magnetic ground states
	Opis	SLO	V tem predavanju bom predstavil rezultate nevtronskega sipanja in mionske spinske relaksacije, ki kažejo, da spinska dinamika spremlja inkomenzurabilno amplitudno modulirano magnetno strukturo vse do najnižjih eksperimentalno dostopnih temperatur. V naši študiji smo se osredotočili na sistema FeTe ₂ O ₅ Br in β -TeVO ₄ , katerih osnovno magnetno mrežo sestavljajo šibko sklopljene spinske verige. Naši rezultati kažejo, da je opaženo obnašanje splošnejša značilnost spinskih verig, ki s tem ponujajo dobro definiran okvir za študij soobstoja magnetne ureditve in vztrajne spinske dinamike.
		ANG	In this talk I will present our neutron diffraction and muon spin relaxation results, which show that incommensurate amplitude-modulated magnetic long-range order is accompanied by spin fluctuations, persisting at lowest accessible temperatures. In our study we focus on FeTe ₂ O ₅ Br and β -TeVO ₄ , where the magnetic exchange network consists of weakly coupled spin chains. The observed behavior appears to be a more general feature of spin chains, which thus offer a well-defined framework to study the coexistence of long-range magnetic order and persistent spin dynamics.

4.	Šifra	B.03 Referat na mednarodni znanstveni konferenci	
	Objavljeno v	Fakulteta za matematiko in fiziko; Zbornik povzetkov; 2014; Str. 27; Avtorji / Authors: Pregelj Matej, Zorko Andrej, Zaharko Oksana, Berger Helmuth, Arčon Denis	
	Tipologija	1.12 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci	
	COBISS ID	27092007	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Amplitudno moduliran magnetni red in vztrajna spinska dinamika v frustriranem multiferoiiku FeTe2O5Br
		ANG	Amplitude-modulated magnetic order and persistent spin dynamics in frustrated multiferroic FeTe2O5Br
	Opis	SLO	V tem vabljenem predavanju sem predstavil povezavo med amplitudno magnetno modulacijo in obstojno spinsko dinamiko. Gre za redek pojav, ki smo ga opazili v amplitudno moduliranem osnovnem magnetnem stanju sistema FeTe2O5Br. Na podlagi naših eksperimentalnih rezultatov smo tako uspeli razložiti soobstoj magnetnega reda in spinske dinamike, za katere je v splošnem veljalo da se med seboj izključujeta. Še več, za ključne se izkažejo prav Fe-O-Te-O-Fe izmenjalne poti, ki tvorijo frustrirano magnetno mrežo.
		ANG	In this invited lecture I presented a correlation between magnetic amplitude modulation and persistent spin dynamics. This is a rare phenomenon that we have observed in the amplitude modulated magnetic ground state of the FeTe2O5Br system. Based on our experimental results, we also managed to explain the coexistence of long-range magnetic order and persistent spin dynamics, which are generally considered to be mutually exclusive. Moreover, we find that for the observed response Fe-O-Te-O-Fe-exchange paths are vital, as they form a frustrated magnetic network.
	Šifra	B.04 Vabljen predavanje	
	Objavljeno v	Paul Scherrer Institut; Book of abstracts; 2013; Str. 27; Avtorji / Authors: Pregelj Matej	
	Tipologija	1.10 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci (vabljen predavanje)	
5.	COBISS ID	26993447	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Vztrajna spinska dinamika in multiferoičnost v FeTe2O5Br
		ANG	Persistent spin dynamics and multiferroicity in frustrated FeTe2O5Br
	Opis	SLO	V tem predavanju sem predstavil povezavo med amplitudno magnetno modulacijo in obstojno spinsko dinamiko, kjer sem posebej izpostavil pomen Fe-O-Te-O-Fe izmenjalnih poti, ki tvorijo frustrirano magnetno mrežo. Slednja je ključna za realizacijo kompleksne amplitudno modulirane magnetne strukture, kjer soobstajata tako spinska dinamika kot tudi električna polarizacija.
		ANG	In this lecture I also presented the link between the magnetic amplitude modulation and persistent spin dynamics, where I stressed the importance of Fe-O-Te-O-Fe exchange pathways, forming a frustrated magnetic network. The latter is crucial for the realization of complex amplitude-modulated magnetic structure, which coexists with both persistent spin dynamics as well as the electric polarization.
	Šifra	B.03 Referat na mednarodni znanstveni konferenci	
	Objavljeno v	s. I.]; Final program; 2013; Avtorji / Authors: Pregelj Matej, Zorko Andrej, Zaharko Oksana, Arčon Denis	
	Tipologija	1.12 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci	

8. Drugi pomembni rezultati projektne skupine²

1.) Naše študija magnetnih, strukturnih in dielektričnih lastnosti sistema $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{Cl}$, ki je bila objavljena v članku »M. Pregelj et al., Multiferroicity in the geometrically frustrated $\text{FeTe}_2\text{O}_5\text{Cl}$. Phys. Rev. B 88, 224421 (2013) [COBISS.SI-ID 27342375]«, je bila izbrana za urednikov predlog (Editor's suggestion).

2.) Kontrolabilna širokopasovna absorpcija v mešani fazi metamagnetov
Odkritje pojava širokopasovne absorpcije v metamagnetih je s strani portala Advances in Engineering prejelo prestižen »certifikat za ključne znanstvene članke«.
glej: Advances in Engineering (<https://advanceseng.com/?s=pregelj>)

3.) Isti članek je bil izpostavljen na portalu chemeuropa.com
glej: <http://www.chemeuropa.com>
(<http://www.chemeuropa.com/en/publications/806783/controllable-broadband-absorption-in-the-mixed-phase-of-metamagnets.html>)

9. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine⁸

9.1. Pomen za razvoj znanosti²

SLO

Seleniti in teluriti, ki vsebujejo prehodne kovine, so izreden razred materialov, saj kažejo številne zanimive kristalne strukture, ki razlikujejo v dimenzionalnosti magnetne mreže – od najpreprostejših skupkov do kompleksnih mrež integrirajočih 1D ali 2D enot. Poleg tega ti dve družini spojin ponujata številne možnosti za ustvarjanje novih struktur, s kompleksnimi in potencialno nizko dimenzionalnimi ureditvami magnetnih ionov. Kljub njihovim čudovitim lastnostim pa so nizko dimenzionalni $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ sistemi še daleč od široke uporabe, saj zahtevajo celovit individualen pristop, ki zajema več komplementarnih eksperimentalnih tehnik in kompleksnih teoretičnih izračunov, kar predstavlja veliko časovno izgubo v procesu razvoja novih nizko dimenzionalnih magnetnih materialov z želenimi lastnostmi.

Splošna izmenjalna pravila za $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ vezi, ki smo jih razvili v okviru našega projekta, obljublja potencialen tehnološki preboj pri oblikovanju novih materialov s posebnimi lastnostmi, npr. anizotropno toplotno prevodnostjo ali magnetoelektrično sklopitvijo itd. Naši rezultati jasno kažejo, da izmenjalne interakcije tipa M-O-Te/Se-O-M, kjer so razdalje med posameznimi atomi manjše od dveh Angstromov, tipično dosega jakosti nekaj 10 Kelvinov in so (skoraj vedno) antiferomagnetne, ne glede na kote vzdolž izmenjalne poti. Na podlagi pridobljenih pravil je mogoče oceniti sklopitve v magnetni mreži že na osnovi strukturnih informacij ter osnovnih laboratorijskih meritev (magnetna susceptibilnost in specifična toplota), s čimer se bo dalo izogniti zamudnim eksperimentalnim in računskim nalogam.

Na koncu velja izpostaviti izjemno zanimivo odkritje širokopasovne absorpcije v mešani fazi metamagnetov. Slednja se razteza preko desetih velikostnih razredov v frekvenci in se pojavi pri točno določenem magnetne polju. To omogoča natančno kontrolo (vklop/izklop) absorpcije in je s tega gledišča nadvse zanimivo za uporabo v aplikativnih sistemih.

ANG

Transition metal selenides and tellurides are extraordinary classes of materials, which exhibit numerous intriguing crystal structures that vary in the dimensionality of the magnetic exchange network - from the simplest, cluster-like, arrangements to complex networks of interacting 1D or 2D entities. Moreover, these two families of compounds appear to offer countless possibilities to generate new structures with complex, potentially low-D, arrangements of magnetic ions. However, in spite of their amazing properties, $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ based low-D systems are still far from being used for broad applications, as they demand comprehensive individual treatment, employing several complementary experimental techniques as well as complex theoretical calculations, which represent a huge time loss in the process of developing/designing new low-D magnetic materials with desired functionalities.

The general rules for magnetic exchange of $\text{Te}^{4+}/\text{Se}^{4+}$ pathways, which were developed in course of our project, hold a promise for a scientific and potential technological breakthrough in the design of novel materials with specific characteristics; e.g., anisotropic heat transport, magnetoelectric coupling, etc.. Our results clearly show that exchange interactions of the M-O-Te/Se-O-M type, where interatomic distances along the path are smaller than two Angstroms, typically reach the strength of several tens of Kelvins and are antiferromagnetic regardless of the angles along the exchange path. Based on the derived rules it should be possible to obtain an estimate of the exchange network in the system already from structural information and basic "laboratory" measurements (magnetic susceptibility and specific heat), thus avoiding a number of time-consuming experimental and computational tasks.

At last, we point out the amazing discovery of a broadband microwave absorption in the mixed phase of metamagnet. The absorption extends over ten decades in frequency and occurs at exactly determined magnetic field. This allows for precise control (on/off) of the absorption, which makes these materials highly interesting for application in microwave filtering devices.

9.2. Pomen za razvoj Slovenije¹⁰

SLO

Poleg znanstvenega napredka, je naš projekt vzpostavil in okrepil sodelovanja z vodilnimi raziskovalnimi skupinami po svetu (ZDA, Evropa in Japonska), izboljšal sodelovanje slovenskih raziskovalnih skupin z velikimi evropskimi raziskovalnimi ustanovami in spodbujal vključevanje Slovenije v magnetno nevtronsko sibalno skupnost, ki se je začel z podoktorskim usposabljanjem Mateja Pregelja v Laboratoriju za nevtronsko sipanje na Paul Scherrer Institutu, Švica. Ta korak je zelo pomembno, saj Slovenija še ni članica mednarodnih nevtronskih iniciativ in je zato ključna vzpostavitev poznanstev in rednega sodelovanja s tujimi strokovnjaki. Končno je bilo več del, ki so nastala v času projekta, objavljenih v odmevnih mednarodnih revijah in predstavljenih na mednarodnih konferencah, s čimer smo pokazali, da Slovenija ne samo sledi ampak tudi kroji trende v znanosti na najvišjem nivoju.

ANG

Besides the scientific advances, our project lead to new collaborations (and strengthen old ones) with leading research groups across the world (USA, Europe, and Japan), improve the participation of Slovenian research groups at large-scale European facilities, and stimulate the integration of Slovenia into magnetic neutron scattering community, which started with postdoctoral training of Matej Pregelj at Laboratory for Neutron Scattering at Paul Scherrer Institutu, Switzerland. This is a very important step, since Slovenia is not yet a member of international neutron communities, hence establishment of new relations and regular collaboration with foreign experts is of the essence. Finally, more than a few studies that were produced during the project were published in important international journals and presented at international conferences, what proves that Slovenia not just keeps the pace with the most developed countries in the world but also show trends at the highest level.

10. Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!

Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni

Cilj		
F.01	Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.02	Pridobitev novih znanstvenih spoznanj	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	

	Uporaba rezultatov	
F.03	Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.04	Dvig tehnološke ravni	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.05	Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvoja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.06	Razvoj novega izdelka	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.07	Izboljšanje obstoječega izdelka	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.08	Razvoj in izdelava prototipa	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.09	Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.10	Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.11	Razvoj nove storitve	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.12	Izboljšanje obstoječe storitve	

	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.13	Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.14	Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.15	Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.16	Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.17	Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.18	Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.19	Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.20	Ustanovitev novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.21	Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE

	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.22	Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.23	Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.24	Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.25	Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.26	Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.27	Prispevek k ohranjanju/varovanju naravne in kulturne dediščine	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.28	Priprava/organizacija razstave	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.29	Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.30	Strokovna ocena stanja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	

	Uporaba rezultatov	
F.31	Razvoj standardov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.32	Mednarodni patent	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.33	Patent v Sloveniji	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.34	Svetovalna dejavnost	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.35	Drugo	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	

Komentar

--

11. Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!

Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja

	Vpliv	Ni vpliva	Majhen vpliv	Srednji vpliv	Velik vpliv	
G.01	Razvoj visokošolskega izobraževanja					
G.01.01.	Razvoj dodiplomskega izobraževanja	☐	☐	☐	☐	
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	☐	☐	☐	☐	
G.01.03.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.02	Gospodarski razvoj					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	☐	☐	☐	☐	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	☐	☐	☐	☐	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	☐	☐	☐	☐	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	☐	☐	☐	☐	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	☐	☐	☐	☐	

G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	☐	☐	☐	☐	
G.02.07.	Večji delež izvoza	☐	☐	☐	☐	
G.02.08.	Povečanje dobička	☐	☐	☐	☐	
G.02.09.	Nova delovna mesta	☐	☐	☐	☐	
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	☐	☐	☐	☐	
G.02.11.	Nov investicijski zagon	☐	☐	☐	☐	
G.02.12.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.03	Tehnološki razvoj					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	☐	☐	☐	☐	
G.03.04.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.04	Družbeni razvoj					
G.04.01	Dvig kvalitete življenja	☐	☐	☐	☐	
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	☐	☐	☐	☐	
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije in javne uprave	☐	☐	☐	☐	
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.04.05.	Razvoj civilne družbe	☐	☐	☐	☐	
G.04.06.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.05.	Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete	☐	☐	☐	☐	
G.06.	Varovanje okolja in trajnostni razvoj	☐	☐	☐	☐	
G.07	Razvoj družbene infrastrukture					
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.02.	Prometna infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.03.	Energetska infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.04.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.08.	Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva	☐	☐	☐	☐	
G.09.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	

Komentar

--

12.Pomen raziskovanja za sofinancerje¹¹

	Sofinancer		
1.	Naziv		

Naslov			
Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:			EUR
Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:			%
Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja			Šifra
	1.		
	2.		
	3.		
	4.		
	5.		
Komentar			
Ocena			

13. Izjemni dosežek v letu 2015¹²

13.1. Izjemni znanstveni dosežek

- 1.) Rezultati naše študije na sistemu -TeVO4 so bili objavljeni v ugledni reviji Nature Communications (IF=11.47); »M. Pregelj et al., Spin-stripe phase in a frustrated zigzag spin-1/2 chain, Nat. Comm. 6, 7255, (2015) [COBISS.SI-ID 28648487]«
- 2.) Rezultati naše študije na sistemu Cu3Bi(SeO3)2O2Br so bili objavljeni v ugledni reviji Advanced Functional Materials (IF=11.8): »M. Pregelj et al., Controllable broadband absorption in the mixed phase of metamagnets, Adv. Funct. Mater. 25, 3634 (2015) [COBISS.SI-ID 28566311]«

13.2. Izjemni družbeno-ekonomski dosežek

- 1.) Kontrolabilna širokopasovna absorpcija v mešani fazi metamagnetov
Odkritje pojava širokopasovne absorpcije v metamagnetih je s strani portala Advances in Engineering prejelo prestižen »certifikat za ključne znanstvene članke«. glej: Advances in Engineering (<https://advanceseng.com/?s=pregelj>)
- 2.) Isti članek je bil izpostavljen na portalu chemeuropa.com
glej: <http://www.chemeuropa.com>
(<http://www.chemeuropa.com/en/publications/806783/controllable-broadband-absorption-in-the-mixed-phase-of-metamagnets.html>)

C. IZJAVE

Podpisani izjavljam/o, da:

- so vsi podatki, ki jih navajamo v poročilu, resnični in točni
- se strinjamo z obdelavo podatkov v skladu z zakonodajo o varstvu osebnih podatkov za potrebe ocenjevanja ter obdelavo teh podatkov za evidence ARRS
- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v pisni obliki
- so z vsebino zaključnega poročila seznanjeni in se strinjajo vsi soizvajalci projekta

Podpisi:

*zastopnik oz. pooblaščen oseba
raziskovalne organizacije:*

in

vodja raziskovalnega projekta:

Institut "Jožef Stefan"

Matej Pregelj

ŽIG

Datum:

17.3.2016

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2016/19

¹ Napišite povzetek raziskovalnega projekta (največ 3.000 znakov v slovenskem in angleškem jeziku) [Nazaj](#)

² Napišite kratko vsebinsko poročilo, kjer boste predstavili raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja, rezultate in učinke raziskovalnega projekta in njihovo uporabo ter sodelovanje s tujimi partnerji. Največ 12.000 znakov vključno s presledki (približno dve strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

³ Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikost pisave 11) [Nazaj](#)

⁴ V primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega projekta oziroma v primeru sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine v zadnjem letu izvajanja projekta, napišite obrazložitev. V primeru, da sprememb ni bilo, to navedite. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

⁵ Navedite znanstvene dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Raziskovalni dosežek iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A" ali A'. [Nazaj](#)

⁶ Navedite družbeno-ekonomske dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Družbeno-ekonomski rezultat iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A" ali A'.

Družbeno-ekonomski dosežek je po svoji strukturi drugačen kot znanstveni dosežek. Povzetek znanstvenega dosežka je praviloma povzetek bibliografske enote (članka, knjige), v kateri je dosežek objavljen.

Povzetek družbeno-ekonomskega dosežka praviloma ni povzetek bibliografske enote, ki ta dosežek dokumentira, ker je dosežek sklop več rezultatov raziskovanja, ki je lahko dokumentiran v različnih bibliografskih enotah. COBISS ID zato ni enoznačen, izjemoma pa ga lahko tudi ni (npr. prehod mlajših sodelavcev v gospodarstvo na pomembnih raziskovalnih nalogah, ali ustanovitev podjetja kot rezultat projekta ... - v obeh primerih ni COBISS ID). [Nazaj](#)

⁷ Navedite rezultate raziskovalnega projekta iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 6 in 7 (npr. ni voden v sistemu COBISS). Največ 2.000 znakov, vključno s presledki. [Nazaj](#)

⁸ Pomen raziskovalnih rezultatov za razvoj znanosti in za razvoj Slovenije bo objavljen na spletni strani: <http://sicris.izum.si/> za posamezen projekt, ki je predmet poročanja [Nazaj](#)

⁹ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

¹⁰ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

¹¹ Rubrike izpolnite / prepišite skladno z obrazcem "izjava sofinancerja" <http://www.arrs.gov.si/sl/progproj/rproj/gradivo/>, ki ga mora izpolniti sofinancer. Podpisan obrazec "Izjava sofinancerja" pridobi in hrani nosilna raziskovalna organizacija – izvajalka projekta. [Nazaj](#)

¹² Navedite en izjemni znanstveni dosežek in/ali en izjemni družbeno-ekonomski dosežek raziskovalnega projekta v letu 2015 (največ 1000 znakov, vključno s presledki). Za dosežek pripravite diapozitiv, ki vsebuje sliko ali drugo slikovno gradivo v zvezi z izjemnim dosežkom (velikost pisave najmanj 16, približno pol strani) in opis izjemnega dosežka (velikost pisave 12, približno pol strani). Diapozitiv/-a priložite kot priponko/-i k temu poročilu. Vzorec diapozitiva je objavljen na spletni strani ARRS <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/>, predstavitev dosežkov za pretekla leta pa so objavljena na spletni strani <http://www.arrs.gov.si/sl/analize/dosez/>. [Nazaj](#)

Obrazec: ARRS-RPROJ-ZP/2016 v1.00

C4-29-4E-3F-94-51-E3-C2-A1-01-CB-1C-CD-54-FB-F7-A5-56-43-9E