

Oznaka poročila: ARRS-RPROG-ZP-2015/131



ZAKLJUČNO POROČILO O REZULTATIH RAZISKOVALNEGA PROGRAMA

(za obdobje 1. 1. 2009 - 31. 12. 2014)

A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROGRAMU

1. Osnovni podatki o raziskovalnem programu

Šifra programa	P1-0040
Naslov programa	Dinamika kompleksnih nanosnovi Dynamics of complex nano-systems
Vodja programa	4540 Dragan D. Mihailović
Obseg raziskovalnih ur (vključno s povečanjem financiranja v letu 2014)	59160
Cenovni razred	C
Trajanje programa	01.2009 - 12.2014
Izvajalci raziskovalnega programa (javne raziskovalne organizacije - JRO in/ali RO s koncesijo)	106 Institut "Jožef Stefan"
Raziskovalno področje po šifrantu ARRS	1 NARAVOSLOVJE 1.02 Fizika
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 PROGRAMA

2. Povzetek raziskovalnega programa¹

SLO

Cilj raziskovalnega programa je bila raziskava neravnovesne dinamike nelinearnih kompleksnih sistemov kondenzirane snovi z uporabo kombinacije skrbno izbranih eksperimentalnih in

teoretičnih metod.

Glavna izvirna ideja za to pionirsko raziskavo naše skupine je, da neergodični prosto razvijajoči se sistemi razkrivajo povsem drugačno fiziko kot tradicionalni eksperimenti, ki so izvedeni pod ergodičnimi pogoji, v katerih je voden le eden od zunanjih parametrov, kot so npr. temperatura, tlak, zunanje polje, itd.. V časovno razvijajočih se sistemih je dinamika prek prehoda z zlomom simetrije v glavnem določena z enim specifičnim tipom vzbujenega stanja brez vpliva drugih ekscitacij osnovnega vakuumu (elektroni, fononi, magnoni). Obdelali smo temeljna vprašanja o efektu simetrije in temeljnih interakcij osnovnih mikroskopskih vakuumov na globalno izvedeno obnašanje.

To nam je dalo nov vpogled v mehanizme, ki vodijo do zlomov simetrije, in odprlo nove načine študije obnašanja snovi v neravnovesnih pogojih. Obenem pa obeta razvoj nove generacije elektronskih naprav osnovanih na kompleksnih materialih, zlasti ultrahitrih spominskih elementov nove generacije.

Eksperimente smo osredotočali na meritve z novimi ultrahitrimi spektroskopskimi tehnikami; nekaj smo jih razvili tudi v naši skupini (npr. tripulzni eksperimenti »kozmičnega kaljenja«). Ti so bili komplementirani z nanoelektronskimi eksperimenti zlasti prenosa naboja z novo in revolucionarno večsondno tehniko tunnelskega mikroskopiranja v kombinaciji z optičnimi ekscitacijami.

Raziskovalna skupina je bila okrepljena z nekaj novimi člani, ki so prinesli sveže poglede in nove izkušnje, s katerimi smo lahko zagnali nove eksperimentalne metode programa.

Poudarek je bil na novih materialih, ki kažejo izvedene lastnosti kot rezultate kolektivnih ekscitacij, katerih fazne prehode med različno urejenimi stanji lahko preiskujemo v realnem času. Najzanimivejši sistemi so: a) sistemi z urejenim nabojem: plastoviti triteluridi in dihalogenidi prehodnih kovin s kvazi enodimenzionalnimi verižnimi sistemi, b) oksidni in pniktidni superprevodniki, c) sistemi s tekmujočimi ureditvenimi parametri: pniktidi in vanadati redkih zemelj.

Naša skupina je svoje strokovno znanje uporabila tudi na raziskavah z bolj neposrednim potencialom praktične uporabe: dinamika elektronske relaksacije v materialih za sončne celice vodi k učinkovitejšim sončnim celicam in transportnim študijam novih nanostruktur brez fotovzbujanja.

Zelo pomemben del aktivnosti naše skupine je sinteza novih nanomaterialov, ki kažejo različne funkcionalne lastnosti pomembne v tem kontekstu, z uporabo različnih tehnik, vključno z epitaksijo z molekularnim žarkom, ki nam omogoča sintezo vrhunskih novih materialov za raziskave, hkrati pa vodi k hitremu razvoju možnih aplikacij.

Eksperimentalni napor, dopolnjen s teoretičnim modeliranjem dinamike in urejanja nelinearnih sistemov, so bistveni za umestitev eksperimentalnega dela na višji svetovni nivo raziskav.

ANG

The aim of the research programme was investigate the nonequilibrium dynamics of nonlinear complex systems in condensed matter using a carefully chosen combination of experimental and theoretical methods.

The main original idea behind this research pioneered by our group is that nonergodically freelyevolving systems reveal new physics compared with traditional experiments performed under ergodic conditions in which only one external parameter is controlled, such as temperature, pressure, external field etc.. In temporally evolving systems, the dynamics through symmetrybreaking transitions is mainly governed by one particular excitation, without interference from other excitations of the underlying vacuum (electrons, phonons, magnons). We addressed fundamental questions on the effect of symmetry and fundamental interactions of underlying microscopic vacua on global emergent behaviour. This enable us new insight into the mechanisms leading to symmetry breaking, and open up new possibilities in the study of the behaviour of matter under nonequilibrium conditions. It also promises a new generation of electronic devices based on complex materials, particularly nonvolatile memories.

The main experimental focus was on novel ultrafast spectroscopy techniques, some of which have been developed by our group (three pulse "cosmic quench" experiments). These was complemented by nanoelectronics experiments, particularly charge transport by a new and revolutionary multiprobe STM technique in combination with optical excitation.

The research team was rejuvenated with some new members, with fresh relevant experience to kickstart the new experimental techniques in the programme.

Emphasis was placed on new materials exhibiting emergent properties as a result of collective excitations, whose phase transitions between different ordered states can be investigated in real time. The systems of interest here are a) the chargeordered systems: layered transition metal tritellurides with dichalcogenides and the quasi 1D chain systems, b) oxide and pnictide superconductors, c) systems with competing order: pnictides and rareearth vanadates.

The expertise of the group was also applied to research with more immediate practical application potential: electron relaxation dynamics in solar cell materials leading to improved solar cell efficiency and nanoscale transport studies in new nanostructures without photoexcitation.

A very important part of the group activity is synthesis of new nanomaterials displaying different functional properties relevant in the present context using different methods, including molecular beam epitaxy, which enables us to have state of the art new materials for study, and at the same time allows us to rapidly develop possible applications.

The experimental efforts were supplemented by theoretical modeling of nonlinear system dynamics and ordering which is crucial in bringing the experimental work to a much higher level.

3. Poročilo o realizaciji predloženega programa dela na raziskovalnem programu, (vključno s predloženim dopolnjenim programom dela v primeru povečanja financiranja raziskovalnega programa v letu 2014)²

SLO

Raziskovalni program je bil za obdobje 2009-2014 zasnovan izjemno ambiciozno; spodaj sta predstavljena dva glavna cilja.

Prvi cilj je bil opraviti zelo zahtevno raziskovanje dinamike sistemov kompleksne snovi, kjer je zlasti na področju ultrahitne dinamike koreliranih elektronskih sistemov raziskovalna skupina ohranila vodilno vlogo v svetovnem merilu, o čemer pričajo publikacije v revijah *Science*, *Nature* in drugih visoko citiranih revijah. Nadalje je bila vodji skupine v 2013 podeljena ERC Advanced Grant za raziskovanje trajektorij sistemov skozi fazne prehode z zlomom simetrije, kar je obenem priznanje zahtevnemu nivoju vpletene znanosti.

Drugi cilj je bil razvoj številnih novih vrhunskih eksperimentalnih tehnik, dostop do katerih je bil omogočen prek Centra odličnosti nanoznanosti in nanotehnologije Nanocentra.

Te metode dajejo skupini in celotni slovenski raziskovalni skupnosti trdne snovi tehnološko osnovo, ki je kompetitivna na svetovnem nivoju. Skupina je tej aktivnosti posvetila velik del časa, zlasti v letih 2012 in 2013.

Glavni razvojni dosežki so opisani v naslednjem razdelku. Raziskovanje dinamike sistemov kompleksne snovi. Gonilo raziskav je bilo na področju ultrahitne elektronske, spinske in mrežne dinamike v različnih kompleksnih sistemih. Študirali smo dinamiko osnovnih ekscitacij v več različnih superprevodnikih, vključno s prvo objavo o ultrahitri dinamiki v pniktidu (Mertelj et al., *PRL*, 2009), ki je vodila do več nadaljnjih objav (*PRB*, 2010, *PRB*, 2013).

Raziskovali smo tudi sistematiko elektronskom mrežnih interakcij, kjer smo korelirali sklopitev s kritično temperaturo (Gadermaier et al., *PRL*, 2010, Gadermaier et al., *PRX*, 2014). Dva verjetno najpomembnejša rezultata pa sta bila raziskovanje trajektorije v sistemu kondenzirane snovi skozi prehod z zlomom simetrije, ki je prvič prikazal oscilacije ureditvenega parametra skozi prehod, vzpostavitev domen in njihovo koherentno uničenje z emisijami Higgsovega delcu podobnih ekscitacij, objavljeno v *Nature Physics* (Yusupov et al., 2010), z nadaljnjim od Toma Kibbla vabljenim člankom (Mihailovic et al., *J. Phys. Cond. Matt.*, 2013), in raziskovanje dinamike inkohherentnih defektov v sistemih z valom gostote naboja (Mertelj et al., *PRL*, 2013). Objavljeno je bilo tudi sistematično delo na dinamiki faznih prehodov v sistemih z valom gostote naboja (Schaefer et al., *PRB*, 2010). Poročali smo še o sistematičnih študijah superprevodnih prehodov sproženih s fotoekscitacijo (Stojchevska et al., *PRB*, 2011). Vrhunec najpomembnejšega raziskovalnega projekta v tem obdobju je bila objava v *Science* (Stojchevska et al., 2014) o odkritju skritega kvantnega stanja v halkogenidnem kristalu (1T-TaS₂), doseženega s fotoekscitacijo z ultrahitrimi laserskimi sunki, ki ga pretvorijo iz izolatorja v kovino. Ultrahitna minljiva generacija reda vala gostote spina v normalnem stanju BaFe₂As₂ gnanega s koherentnimi vibracijami mreže je bila objavljena v *Nature Materials* (Kim et al., 2012), medtem ko so bili posnetki kooperativnih atomskih gibanj v optičnem pomirjanju valov gostote naboja

objavljeni v *Nature* (Eichberger et al., 2012). Ultrahitna dinamika valov gostote naboja v 4HTaSe_2 je bila preiskovana s femtosekundnim elektronskim uklonom in objavljena v *PRL* (Erasmus et al., 2012). V isti reviji so bili objavljeni tudi netermično taljenje valov gostote naboja v TiSe_2 (MohrVorobeve et al., *PRL*, 2011), dinamika energijske reže superprevodnih tankih filmov NbN preučevanih s časovno ločljivo teraherčno spektroskopijo (Beck et al., *PRL*, 2011), prva študija ultrahitne dinamike kvazikristala (Mertelj et al., *PRL*, 2009) in prva objava kvazidelčne relaksacije v organskem superprevodniku (Toda et al., *PRL*, 2011).

Teoretično delo se je osredotočalo na nekonvencionalne mehanizme visokotemperaturne superprevodnosti (Alexandrov et al., *PRL*, 2011), preskakajoči magnetni transport prek neničelnih stanj tirne vrtilne količine in organske magnetoupornosti (Alexandrov et al., *PRL*, 2012), fazne zdrse in generacijo vrtnicev ob hitri spremembi magnetnega polja (LuDac et al., *PRL*, 2010) in dinamiko elektronske relaksacije (Alexandrov et al., *PRB*, 2009).

Druge sorodne aktivnosti članov skupine so bile v sintezi in funkcionalizaciji novih materialov ter novih napravah in aplikacijah. Naprimer, zelo uspešno področje izhajajoče iz raziskovanja nanožic MoSI je bil razvoj razločevalnih nanobiosenzorjev osnovanih na konjugaciji antidelcev ali aptamerov na substratih iz nanožic MoSI (Lin et al., *Biosensors and Bioelectronics*, 2011) in (Lin et al., *Electroanalysis*, 2009), z reproducibilnim zaznavanjem majhnih molekul in naprav. Pregledni članek na fizikalnih in funkcionalnih lastnostih halkohalidov prehodnih kovin je bil objavljen v visoko citirani reviji *Progress in Materials Science* (2010). Prenos naboja v ultratankih nanožicah MoSI s premerom 4 nm in obnašanjem podobnim Luttingerjevimi tekočinam je bil objavljen prvič kot predstavitev tehnologije (Uplaznik et al., *PRB*, 2009). Poročali smo o izjemnih samourejenih mrežah nanožic MoSI (Strle et al., *Nano Lett.*, 2009). Nanožice MoSI so bile uporabljene za predložno sintezo različnih materialov, vključno s superprevodnimi nanožicami MoN (Buh et al., *Nanotechnology*, 2014), in nanocevnimi hibridi MoS₂ (Remskar et al., *APL*, 2009). Raziskave obstoja magnetnih ekscitacij v superprevodnih kupratih skozi celoten fazni diagram so bili objavljeni v *Nature Materials* (Dean et al., 2013).

Raziskave so bile izvajane z veliko partnerji, ki so naštet v približnem redu po pogostosti sodelovanja: Stanford University, University of Konstanz, Loughborough University, University of Oxford, Trinity College Dublin, Hokkaido University, Politecnico Milano, ETH Zürich, Brookhaven National Laboratory, EPFL Lausanne, Peking University, Zhejiang University, Shanghai Jiao Tong University.

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

SLO

Raziskovalni program je krepko presegal cilje zastavljene v delovnem načrtu za obdobje 2009-2014, tako v smislu rezultatov, objav v revijah z visokim vplivom in predvsem v razvoju novih eksperimentalnih metod.

Raziskave funkcionalnih stanj kompleksnih sistemov so bile v raziskovalnem programu zastavljene precej široko in na določenih področjih tudi zelo splošno. V zadnjih nekaj letih smo uspeli zelo napredovati na več področjih, kar je vodilo v bolj osredotočen raziskovalni program z bistveno jasneje definiranimi cilji. Razvoj originalne nove tripulzne eksperimentalne metode nam omogoča raziskovanje trajektorije v kompleksnih sistemih skozi prehode z zlomom simetrije. To je odprlo nove možnosti za raziskovanje prehodov z zlomom simetrije v kompleksnih sistemih s pomembnimi posledicami na zelo raznolikih področjih znanosti od kozmologije do fizike delcev in fizike naprav.

Razvoj novih vrhunskih eksperimentalnih metod.

Skupina je neposredno zaslužna za postavitev več zelo zahtevnih eksperimentalnih metod, financiranih iz strukturnih skladov Evropske unije s pomembnimi nakupi raziskovalne opreme v letih 2012 in 2013 (www.nanocenter.si). Te tehnologije so nove v Sloveniji in so namenjene razvoju koherentne platforme za raziskave kondenzirane snovi, od osnovne znanosti do aplikacij na različnih področjih, ki se raztezajo vse od fizike koreliranih elektronov in sinteze novih materialov do karakterizacije in izdelave delujočih naprav.

a) Vodilni projekt: Nizkotemperaturni 4sondni STM/AFM/SEM mikroskopski sistem z optičnim dostopom. Ta edinstven sistem bo omogočil meritve lastnosti transporta vzporednega s površino materiala (ne zgolj transport v vzorec kot drugi tunelski mikroskopi), ta pa bo lahko v temi ali osvetljen. Sistem je zgradilo podjetje Omicron GmbH po naših specifikacijah zasnove in je v svetu prvi svoje vrste. Edinstven je v svojih zmogljivostih (delovanje pri 5 K, razdalja med sondami do le

20 nm, Q+AFM, optični dostop za laserski žarek in stolp elektronskega mikroskopa za pozicioniranje konic). Sistem je bil testiran in bo polno operativen v maju 2014.

b) Sinteza novih nanomaterialov in nanostrukturnih naprav: (i) Epitaksija z molekularnim žarkom (MBE) za epitaksialno rast halkogenidnih filmov, (ii) depozicija atomskih plasti (ALD) za izdelavo naprav v povezavi z elektronsko ali lasersko litografijo.

c) Karakterizacija: (i) Fokusiran ionski žarek (FIB) je bil postavljen in izvedeno šolanje zanj, (ii) 4sondne transportne meritve (4400K) in $B = 2,5$ T s konicami premera 25 mikronov. (iii) mikroRamans TERS v povezavi z AFM/STM. (iv) Magnetna polja do 7 T z optičnim dostopom. Rezultati z novo opremo so že predstavljeni v več nedavnih objavah (Buh et al., na naslovnici *Nanotechnology*, 2014; Stojchevska et al., *Science*, 2014).

5.Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega programa oziroma sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave programske skupine v letu 2014⁴

SLO

V letu 2014 je prišlo do nekaterih sprememb sestave programske skupine, in sicer A. Omerzu (15361), V. Baranov (32283), P. Kušar (23568) in M. Strojnik (32167) so v letu 2014 prekinili zaposlitev na RO in niso več člani programske skupine. V novembru 2014 je z delov v programski skupini pričel nov mladi raziskovalec, A. Kranjec (37463).

6.Najpomembnejši znanstveni rezultati programske skupine⁵

Znanstveni dosežek			
1.	COBISS ID	27627303	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Ultrahitri preklon v stabilno skrito stanje v elektronskem kristalu	
		ANG	Ultrafast switching to a stable hidden quantum state in an electronic crystal
	Opis	SLO	Skrita stanja snovi nastanejo, ko gre sistem iz svojega ravnovesja skozi trajektorijo do stanja, ki je ali nedosegljivo ali pa ne obstaja pod normalnimi ravnovesnimi pogoji. Tako skrito stanje snovi (H stanje) smo opazili v plastovitem 1TTaS2 kristalu (trigonalna faza), ki ga je možno doseči s kratkim 35 fs laserskim sunkom. V primerjavi z ostalimi faznimi stanji, H stanje spremlja padec električne upornosti, spremenjeni spektri v enodelčnem in kolektivnem načinu in močno spremenjena optična odbojnost. H stanje je stabilno in samo z osvetlitvijo z laserskim sunkom, z električnim tokom ali z gretjem lahko povrnemo sistem nazaj v njegovo termodinamično osnovno stanje.
		ANG	Hidden states of matter may be created if a system out of equilibrium follows a trajectory to a state that is inaccessible or does not exist under normal equilibrium conditions. We found such a hidden (H) electronic state in a layered dichalcogenide crystal of 1TTaS2 (the trigonal phase of tantalum disulfide) reached as a result of a quench caused by a single 35femtosecond laser pulse. In comparison to other states of the system, the H state exhibits a large drop of electrical resistance, strongly modified singleparticle and collectivemode spectra, and a marked change of optical reflectivity. The H state is stable until a laser pulse, electrical current, or thermal erase procedure is applied, causing it to revert to the thermodynamic ground state.
	Objavljeno v	American Association for the Advancement of Science; Science; 2014; Vol. 344, no. 6180; str. 177-180; Impact Factor: 31.477; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.663; A': 1; A': 1; WoS: RO; Avtorji / Authors: Stojchevska Ljupka, Vaskivskyi Igor, Mertelj Tomaž, Kušar Primož, Svetin Damjan, Brazovskii Serguei, Mihailović Dragan	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
2.	COBISS ID	27331623	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Predložna sinteza enofaznih $[\delta]_3\text{MoN}$ superprevodnih nanožic

		ANG	Template synthesis of single-phase δ -MoN superconducting nanowires
	Opis	SLO	Predstavili smo novo in učinkovito metodo za pripravo enofaznih superprevodnih δ -MoN nanožic iz svežnja Mo ₆ SyIz ($8.2 \leq y + z \leq 10$) nanožic, ki smo jih uporabili kot predlogo. Sinteza poteka v prisotnosti amonijaka. Meritve magnetne susceptibilnosti in električne upornosti so potrdile enofazno sintezo. Štirikontaktne meritve upora posameznih nanožic s premerom nad 100 nm v magnetnem polju smo uporabili za določitev kritičnega polja. Meritve upora v odvisnosti od premera nanožic in magnetizacijske meritve pa služijo ugotavljanju homogenosti nanožic.
		ANG	We demonstrate a new and effective method of producing singlephase superconducting δ -MoN nanowires from bundled Mo ₆ SyIz ($8.2 \leq y + z \leq 10$) nanowire templates in the presence of ammonia gas. Magnetic susceptibility and electrical resistance measurements confirm singlephase material synthesis. Measurements of fourcontact resistance on single wires with diameters above 100 nm in a magnetic field are used to determine the critical field, while diameter dependence and magnetization measurements are used to investigate the homogeneity of the nanowires.
	Objavljeno v		IOP Publishing; Nanotechnology; 2014; Vol. 25, no. 2; str. 025601-1 025601-6; Impact Factor: 3.672; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.554; A': 1; WoS: NS, PM, UB; Avtorji / Authors: Buh Jože, Kovič Andrej, Mrzel Aleš, Jagličič Zvonko, Jesih Adolf, Mihailović Dragan
	Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
	3. COBISS ID		23900711 Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Koherentna dinamika makroskopske elektronske ureditve skozi fazni prehod z zlomom simetrije
		ANG	Coherent dynamics of macroscopic electronic order through a symmetry breaking transition
	Opis	SLO	Poročamo o časovno visokoločljivostni študiji evolucije bozonskih in fermionskih ekscitacij skozi fazni prehod z zlomom simetrije urejenosti elektronskega naboja. S periodičnim gašenjem sistema z femtosekundnimi optičnimi pulzi smo zaznali prej nepoznane koherentne neperiodične undulacije parametra reda, kritično upočasnenje kolektivnega načina in evolucijo reže med delcem in vrzeljo, ko gre sistem skozi prehod. Modeliranje je osnovano na teoriji GinzburgLandaua, ki opažanja poustvari brez dodatnih parametrov. Posebej zanimivo je opažanje časovnih spektralnih distorzij, ki nastanejo kot posledica spontanega uničenja topoloških defektov, podobnih tistim, ki jih opisuje kozmološki model KibbleZureka.
		ANG	The study of the temporal evolution of systems undergoing symmetry breaking phase transitions—whether it is in condensedmatter physics, cosmology or finance—is difficult because they are hard to repeat, or they occur very rapidly. Here we report a hightimeresolution study of the evolution of both bosonic and fermionic excitations through an electronic chargeordering symmetry breaking phase transition. Periodically quenching our system with femtosecond optical pulses, we subsequently detect hithertounrecorded coherent aperiodic undulations of the order parameter, critical slowing down of the collective mode and evolution of the particle–hole gap as the system evolves through the transition. Modelling on the basis of Ginzburg–Landau theory is used to reproduce the observations without free parameters. Of particular interest is the observation of spectrotemporal distortions arising from spontaneous annihilation of topological defects, analogous to those

			discussed by the Kibble-Zurek cosmological model.
	Objavljeno v		Nature Pub.; Nature physics; 2010; Vol. 6, no. 9; str. 681-684; Impact Factor: 18.423; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.582; A'': 1; A': 1; WoS: UI; Avtorji / Authors: Yusupov Roman V., Mertelj Tomaž, Kabanov Viktor V., Brazovskii Serguei, Kušar Primož, Chu Jiun-Haw, Fisher Ian R., Mihailović Dragan
	Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
4.	COBISS ID	25766439	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Skakajoči magnetotransport skozi stanja z neničelnim vrtilnim momentom in organska magnetoupornost
		ANG	Hopping magnetotransport via nonzero orbital momentum states and organic magnetoresistance
	Opis	SLO	V dopiranih izolatorjih zunanje magnetno polje povzroči skrčenje valovne funkcije selektronov donorjev ali akceptorjev in s tem zmanjšuje prekrivanje valovnih funkcij kar povzroči pozitivno magnetoupornost, ki je kvadratična funkcija zunanjega magnetnega polja. Za razliko od stanj s, šibko magnetno polje širi valovne funkcije elektronov s pozitivnim magnetnim kvantnim številom in krči stanja z negativnim magnetnim kvantnim številom v širokem območju zunaj točkovnega defekta. To povzroči negativno magnetoupornost v območju šibkega magnetnega polja, ki je linearna funkcija zunanjega polja, ko se odpravi orbitalna degeneriranost. Teorija daje možno razlago velike magnetoupornosti v majhnem polju v neurejenih organskih materialih.
		ANG	In hopping magnetoresistance of doped insulators, an applied magnetic field shrinks the electron (hole) swave function of a donor or an acceptor and this reduces the overlap between hopping sites resulting in the positive magnetoresistance quadratic in a weak magnetic field, B. We extend the theory of hopping magnetoresistance to states with nonzero orbital momenta. Different from s states, a weak magnetic field expands the electron (hole) wave functions with positive magnetic quantum numbers, $m>0$, and shrinks the states with negative m in a wide region outside the point defect. This together with a magneticfield dependence of injection/ionization rates results in a negative weakfield magnetoresistance, which is linear in B when the orbital degeneracy is lifted. The theory provides a possible explanation of a large lowfield magnetoresistance in disordered n-conjugated organic materials.
	Objavljeno v		American Physical Society; Physical review letters; 2012; Vol. 108, no. 18; str. 186601-1-186601-5; Impact Factor: 7.943; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.685; A'': 1; A': 1; WoS: UI; Avtorji / Authors: Alexandrov Alexandre Sasha, Dediu Valentin A., Kabanov Viktor V.
	Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
5.	COBISS ID	25507111	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Femtosekundna relaksacija nosilcev naboja in fotoinducirana fazna separacija v $k(\text{BEDTTTF})[\text{sub}]2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})[\text{sub}]2]\text{X}$ (X=Br,Cl)
		ANG	Femtosecond carrier relaxation dynamics and photoinduced phase separation in $k-(\text{BEDT-TTF})[\text{sub}]2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})[\text{sub}]2]\text{X}$ (X=Br,Cl)
	Opis	SLO	We investigate the relaxation dynamics of nonequilibrium carriers in organic conductors $\kappa(\text{BEDTTTF})_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{X}$ (X=Br and Cl) using ultrafast timeresolved optical spectroscopy. The dynamics for both salts show similar temperature dependences, which is well characterized by the carrier relaxation across the pseudogap (PG) of the magnitude $\Delta(\text{PG}) \approx 16$ meV for Br salt and 7.0 meV for Cl salt. On the other hand, only the Br salt shows an abrupt increase of the decay time at low temperature, indicating

		an additional decay component associated with the superconducting (SC) gap below T_c . The fluence dependent dynamics at low temperature evidences the superposition of the SC component onto the PG component. These results indicate a metallic-insulating phase separation in the Br salt triggered by photoexcited nonequilibrium carriers.
	ANG	S časovno ločljivo optično spektroskopijo smo proučevali dinamiko relaksacije neravnovesnih nosilcev naboja v organskih prevodnikih (BEDTTTF)(2)Cu[N(CN)(2)]X (X=Br in Cl). Dinamiki v obeh materialih imata podobno temperaturno odvisnost, ki jo lahko opišemo z relaksacijo nosilcev naboja preko psevdoreže velikosti $\Delta(PG) \approx 16$ meV za Br sol in 7.0 meV za Cl sol. Zgolj v primeru Br soli pa smo opazili skokovito podaljšanje relaksacijskega časa pri nizkih temperaturah, ki nakazuje dodatno komponento v relaksaciji povezano s superprevodno režo pod kritično temperaturo. Intenzitetna odvisnost dinamike pri nizkih temperaturah nakazuje superpozicijo superprevodne komponente s komponento psevdoreže. Rezultati nakazujejo obstoj fazne separacije med kovinskimi in neprevodnimi deli v Br soli povzročene s fotovzbujenimi neravnovesnimi nosilci naboja.
Objavljeno v	American Physical Society; Physical review letters; 2011; Vol. 107, no. 22; str. 227002-1-227002-4; Impact Factor: 7.370; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.404; A'': 1; A': 1; WoS: UI; Avtorji / Authors: Toda Y., Mertelj Tomaž, Mihailović Dragan	
Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	

7. Najpomembnejši družbeno-ekonomski rezultati programske skupine⁶

	Družbeno-ekonomski dosežek		
1.	COBISS ID	26132007	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Vabljen predavanje
		ANG	Invited talk
	Opis	SLO	Izpostavljeno je eno izmed vabljenih predavanj. V obdobju 2009-2014 so člani programske skupine bili kot vabljeni predavatelji na številnih konferencah, univerzah ter drugih inštitucijah. Bibliografija skupine v tem obdobju šteje več kot 60 objavljenih povzetkov in prispevkov vabljenih predavanj ter vabljenih predavanj na tujih univerzah (1.06, 1.10, 3.14, 3.16).
		ANG	Just one of many invited talks presented by group members at conferences, Universities and other institutions is highlighted. Research group bibliography between 2009-2014 holds more than 60 published abstracts of invited talks (1.06, 1.10, 3.14, 3.16).
	Šifra	B.04 Vabljen predavanje	
	Objavljeno v	s. n.]; IMPACT 2012; 2012; Str. 58; Avtorji / Authors: Stojchevska Ljupka, Mertelj Tomaž, Šutar Petra, Svetin Damjan, Mihailović Dragan	
	Tipologija	1.10 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci (vabljen predavanje)	
2.	COBISS ID	26372647	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Organizacija konferenc in delavnic
		ANG	Conference and workshop organisation
			Izpostavljen je en workshop/delavnica kot izhodišče dosežka: člani programske skupine so v obdobju 2009-2014 sodelovali v več uredniških in organizacijskih odborih mednarodnih znanstvenih

	Opis	SLO	konferenc (PIPT5 2014, Nonequilibrium phenomena in complex matter 2012, Slonano 2009, Slonano 2010, Slonano 2011, Konferenca fizikov v osnovnih raziskavah 2012, Slonano 2012, Slonano 2013). Gre za znanstvene mednarodne dogodke, ki združujejo domače in tuje raziskovalne skupine in so osnova za nove projekte.	
		ANG	Only one of the events is highlighted; Group members were active board member or coorganizers of several international scientific conferences in period 2009-2014 ((PIPT52014, Nonequilibrium phenomena in complex matter 2012, Slonano 2009, Slonano 2010, Slonano 2011, Konferenca fizikov v osnovnih raziskavah 2012, Slonano 2012, Slonano 2013). International events bring together various research groups from Slovenia and rest of the world. Such events are basis for new projects.	
	Šifra		B.01 Organizator znanstvenega srečanja	
	Objavljeno v		Jožef Stefan; 2012; 48 str.; Avtorji / Authors: Mertelj Tomaž, Mihailović Dragan	
	Tipologija		2.25 Druge monografije in druga zaključena dela	
3.	COBISS ID		13147675	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Patenti	
		ANG	Patents	
	Opis	SLO	Izpostavljen je en patent; člani programske skupine so v obdobju 2009-2014 podali dve patentni prijavi (COBISS 2.23) ter kot soavtorji nastopajo pri 7 slovenskih in mednarodnih patentih (COBISS 2.24).	
		ANG	One of the patents is highlighted; group members have two patent applications and are coauthors of 7 international and slovene patents in period 2009-2014.	
	Šifra		F.32 Mednarodni patent	
	Objavljeno v		Deutsches Patent- und Markenamt; 2012; 8 f.; A'': 1; A': 1; Avtorji / Authors: Kovačič Drago, Van Aalst Jan, Podobnik Boštjan	
	Tipologija		2.24 Patent	
4.	COBISS ID		2564708	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	doktorska disertacija	
		ANG	doctoral theses	
	Opis	SLO	Izpostavljena je ena izmed doktorskih disertacij; člani programske skupine sodelujejo v pedagoškem procesu mladih kadrov kot mentorji pri doktorskih disertacijah, diplomskih delih ali pri študijskih praksah.	
		ANG	One of the doctoral theses is highlighted; group members have mentored several doctoral thesis, bachelor degrees and student practice work.	
	Šifra		D.09 Mentorstvo doktorandom	
	Objavljeno v		[M. Strojnik]; 2013; 118 str.; Avtorji / Authors: Strojnik Martin	
	Tipologija		2.08 Doktorska disertacija	
5.	COBISS ID		24434983	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Intervju	
		ANG	Interview	
	Opis	SLO	Vodja in člani projektne skupine so aktivno sodelovali pri ustanovitvi Centra odličnosti nanoznanosti in nanotehnologije Nanocenter in preko nabave vrhunske opreme v Slovenijo vpeljali povsem nove raziskovalne metode. Več v točki 10.1.	

	ANG	Head of the group and group members have been active in establishment of Center of excellence in nanoscience and nanotechnology where they have lead development of a number of new experimental techniques (details in 10.1.)
Šifra	D.02	Ustanovitev raziskovalnega centra, laboratorija, študija, društva
Objavljeno v	Delo; Delo; 2011; letn. 53, št. 24; str. 21; Avtorji / Authors: Lenarčič Jadran, Horvat Milena, Kristan Urška, Šlejkovec Zdenka, Stibilj Vekoslava, Kosec Marija, Holc Janez, Muševič Igor, Mihailović Dragan, Ude Aleš, Lavrač Nada, Turk Boris	
Tipologija	1.22	Intervju

8. Drugi pomembni rezultati programske skupine²

Člani programske skupine gojijo tesne mednarodne odnose z raziskovalnimi skupinami v svetu. Posledično se je zato v programskem obdobju 2009 - 2014, v primerjavi s preteklim programskim obdobjem, povečala vključenost članov programske skupine v raziskovalne programe EU.

Programska skupina oz. raziskovalno okolje, ki ga ponuja, postaja vedno bolj zanimivo, zato se je v programskem obdobju 2009 - 2014 povečal delež raziskovalcev (podokotrandov, študentov, raziskovalcev) iz tujine, ki jih je programska skupina gostila v obdobju več kot en mesec. Pomembno pa se je povečal tudi obisk tujih raziskovalcev za krajše, eno ali dva tedenske raziskovalne obiske.

9. Pomen raziskovalnih rezultatov programske skupine³

9.1. Pomen za razvoj znanosti⁹

SLO

Študij razvoja sistemov skozi prehode z zlomom simetrije v kondenzirani materiji, ki zlomijo različne vrste simetrij (prostorsko, umeritveno, obrat časa, itd.) z opazovanjem enodelčnih in kolektivnih vzbuditev ima pomembne posledice v temeljni fiziki časovno se razvijajočih sistemov. Analogija s kozmologijo je še posebej ustrezna, kot jo diskutirajo Kibble, Zurek, Varma, Volovik in drugi. Zanimivi so tudi ostali sistemi, kot npr. zlomi simetrije, ki nastanejo pri trkih osnovnih delcev, ki jih tipično diskutirajo v okviru teorij na osnovi teorije Ginzburga in Landaua, kot je npr. standardni model. Pomembnost projekta je, da lahko izbiramo različne simetrije v različnih laboratorijskih sistemih za posnemanje nedostopnih ali realno neponovljivih prehodov z zlomom simetrije kot so veliki pok in borzni zlomi. Nastanek različnih simetrij je možno raziskati z ustrezno izbiro sistema, kar omogoči pomembne analogije. Primer je analogija vrtincev in domenskih sten s kozmičnimi strunami in "branami". Analogi temne snovi se ponujajo s šibko sklopljenimi vzbuditvami, kot so fononi. Manipulacija prehodov z zlomom simetrije je temeljnega pomena kot sredstvo za usmerjanje sistemov v skrita urejena stanja, ki niso dosegljiva pri ergodičnih pogojih, kar odpira okno v tako imenovana "vzporedna vesolja". Polje teh raziskav se hitro širi in prva mednarodna konferenca na temo "Higgsovih bozonov v kondenzirani snovi" je bila organizirana na Yukawa Institute Kyoto leta 2014. Naši skupini so zaupali organizacijo mednarodne konference Photoinduced Phase Transitions 5. junija 2014 na Bledu in konferenco Flatlands beyond graphene v letu 2016, kar odseva ugled naše skupine na področju.

Sodeč po zgodovini objav (vključno s članki v Science, Nature revijah, PRL, PRX) ter uspehu pri vzpostavljanju novih raziskovalnih področij s pomočjo vrhunske opreme iz EU sredstev in drugih prestižnih virov (ERC, Marie Curie in drugi projekti iz 7OP), so aktivnosti članov skupine zelo cenjene tako v Sloveniji kot v svetu. Skupina je našla uspešen recept za izvajanje izvrstne znanosti, ki temelji na nizu študentov in maloštevilnega števila dobro koordiniranega izkušenega tima.

Predlagane raziskave imajo številne tehnološke "spinoffe". Prvi prihaja iz podporne znanosti o materialih, ki vodi do nove funkcionalnosti nanomaterialov, kar je bilo že dokazano v preteklosti

(npr. MoSI v baterijah, katalizi, substratih za prepoznavne senzorje in dodatkih lubrikantov). Razumevanje relaksacije energij fotovzbujenih elektronov je neposredno relevantno za razumevanje prenosa naboja in učinkovitosti solarnih celic ter drugih funkcionalnosti. Dosegli smo tudi do 60% izboljšanja izkoristka, kar je izjemen dosežek, saj je bil napredek tipično počasen, s tipičnimi izboljšanji manjšimi od 10%. Naslednja kategorija "spinoffov" je še bolj razburljiva in prihaja od fotoinduciranih prehodov samih. Kontrola prehodov z zlomom simetrije v času je pomembna v elektroniki, še posebej pomnilnikih. Potencialno revolucionarni razvoj je uporaba fotoinduciranega ali tokovno injiciranih prehodov v skrita stanja (Stojchevska et al., Science, 2014) za trajne pomnilne elemente, ki bi lahko premostili špranjo v hitrosti med hitrim dinamičnim in statičnim masivnim pomnilnikom, ki omejuje razvoj računalnikov že od leta 1980 (IBM report, G.W. Burr, 2013). Naš pristop je potencialno konkurenčen memristorju (HP), spinskonavornemu spominu (STM) in spominu na spremembo faze (PCM), ponujajoč prednosti v povezavi s hitrostjo in kompatibilnostjo s silicijevo tehnologijo.

V okviru CO Nanocentra je programski skupini dostopna vrhunska oprema, kot npr. instrument s fokusiranim ionskim snopom (FIB), epitaksija z molekularnim žarkom (MBE) in atomska enoslojna depozicija (ALD), 4sondni nizkotemperaturni instrument STM/AFM, LDI laser. Člani programske skupine so v veliki meri odgovorni za vzpostavitev nove tehnologije, ki jo ta oprema omogoča.

ANG

The study of the realtime evolution of systems through symmetry breaking transitions (SBTs) in condensed matter systems breaking different kinds of symmetries (spatial, gauge, timereversal etc.) by monitoring single particle and collective excitations has important consequences in the fundamental physics of temporally evolving systems. The analogy with cosmology (i.e. the Big Bang) is particularly pertinent, as discussed by Kibble, Zurek, Varma, Volovik etc.. Other systems are also of interest, such as SBTs which occur after collisions of elementary particles, typically discussed in terms of GinzburgLandau derived theories, such as the Standard model. The importance of the current project is that one can chose different symmetries in different laboratory systems to mimic inaccessible or irreproducible SBTs, such as the Big Bang or stock market crashes. Emergence of different symmetries can thus be explored by choice of system, and significant analogies can be drawn. Thus analogies between vortices and domain walls with cosmic strings and branes can be drawn. Dark matter analogues are offered by weakly interacting bosonic excitations, particularly phonons. The control of SBTs is of fundamental interest as a means of directing systems into hidden ordered states not reachable under ergodic conditions, opening a window into "parallel universes". The field is rapidly expanding and the first international conference on "Higgs bosons in condensed matter" was organized by the Yuakawa Institute Kyoto in 2014. Furthermore, our group has been trusted with the organization of international conference on Photoinduced Phase Transitions PIPT5 at Bled in June 2014, and the Flatlands beyond graphene conference in 2016, which reflects the respect our group commands in the field.

Judging by its publication record (including papers in Science, Nature, PRL, PRX), and its success in starting new research fields through procuring state of the art equipment from EU funds and other international funding (ERC advanced grant, MarieCurie and other FP7 projects), its activities are highly regarded both in Slovenia and abroad. The group has found a successful recipe for performing exciting science, resting on the shoulders of a stream of students and a smallnumbered wellcoordinated senior team.

Presented research also has a number of technology spinoffs. The first type comes from the underlying essential materials science which leads to new functionality of nanomaterials, which we have already demonstrated in the recent past (e.g. MoSI molecular wires in batteries, catalysis, recognitive sensor substrates and additives to lubricants). The understanding of photoexcited electron energy relaxation is directly relevant for understanding charge transfer dynamics and solar cell efficiency, and other functionalities. Improvements of up to 60% were observed, which is a remarkable achievement considering progress has typically been relatively slow, with typical improvements of the order 10% or less. The second category of spinoffs are even more exciting and come from the photoinduced phase transitions themselves. Control of SBTs in time is important in future electronics devices, particularly memory devices. A potentially revolutionary development is the use of photoinduced or current injection induced hidden state transitions (Stojchevska et al., Science, 2014) for nonvolatile memory devices, potentially bridging the gap in speed between fast dynamic RAM and static mass storage class memory which has held up computer development since the 1980's (IBM report, G.W. Burr,

2013). Our approach is potentially competitive with memristor (HP), spintorque memory (STM) and phase change memory (PCM), offering advantages in terms of speed and compatibility with silicon technology. Research group has access to state of the art equipment through CENN Nanocenter, such as FIB instrument, MBE and ALD, 4 probe low temperature STM/AFM with a SEM, LDI laser.

9.2. Pomen za razvoj Slovenije¹⁰

SLO

Raziskovalni program uvaja številne nove interdisciplinarne tehnologije ter nova in originalna raziskovalna področja v Sloveniji, še posebej časovno ločljivo spektroskopijo, nanoelektroniko in nanolitografijo (z elektronskim žarkom in uporabo običajnih laserjev). Izdelava FET nanonaprav, atomska enoslojna depozicija (ALD) ter MBE, so popolnoma nove tehnike v Sloveniji.

V zadnjih desetih letih so člani raziskovalnega programa odprli dve spinoff podjetji (Mo6 in NANOTUL). Področje prehodnih kovin, skupaj z njihovimi oksidi, karbidi, sulfidi in nitridi, predstavlja zelo zanimivo področje med kemijskimi in fizikalnimi znanostmi ter tehnologijo. Veliko teh spojin je tehnološko pomembnih na različnih področjih uporabe od elektronike, za trdna maziva, nanokompozite in materiale za shranjevanje in pretvorbo energije. Naslednje načrtovano odcepljeno podjetje bo razvijalo komercialno zelo zanimivi večkanalni detektor za femtosekundno spektroskopijo. Prototip je v fazi testiranja.

Člani raziskovalnega programa so vodili nabavo in vzdrževanje številne raziskovalne opreme: FIB, ALD, MBE, AFM Raman, 4sondni STM/AFM/SEM v okviru Centra odličnosti za nanoznanosti in nanotehnologije Nanocentra. Oprema, ki je bila nabavljena s sredstvi pridobljenimi v okviru evropskih skladov za prestrukturiranje, je namenjena za uporabo v akademskih krogih in pri industrijskih partnerjih.

Študentje, ki so se usposabljali v okviru programske skupine, so kot vrhunsko usposobljeni raziskovalci našli zaposlitev v slovenski industriji, zlasti v podjetjih z visoko dodano vrednostjo (npr. LPKF, Helios, BSH Bosh und Siemens Hausgeräte, Xpand, Litostroj Power, Elaphe, IOS, Količevo karton) ali v tujini (npr. IEE Luxemburg, Ilmenau University, Nemčija, German Research School for Simulation Science, University of Antwerpen, Belgija).

Močno sodelovanje poteka predvsem z LPKF mednarodnim, srednje velikim visokotehnološkim podjetjem, s katerim razvijamo lasersko litografijo nove generacije. Novi anorganski nanomateriali so v nenehnem razvoju za uporabo v kompozitih in premazih (Helios, Cinkarna Celje). V bionanosenzorjih (Kolektor/Nanotesla institut), pri elektrodah za baterije, primeseh v sončnih celicah in v elektroniki pričakujemo komercialno uporabne rezultate. Pri tem ločimo med novimi uporabami materialov, ki so jih odkrili drugi v svetu in tistimi, ki smo jih odkrili sami. Slednji so kot dosežki veliko bolj zanimivi, do njihove uporabnosti oz. komercializacije pa je navadno daljša pot. Dejavnosti industrije, kjer je možno sodelovanje z našo raziskovalno skupino, so zelo raznolika, od avtomobilske industrije, tiska, gospodinjskih aparatov, zdravil, laserjev itd.. Dosedanje sodelovanje raziskovalne skupine zajema podjetja iz različnih slovenskih regij (Idrija, Celje, Naklo, Domžale, Ljubljana), ki s svojimi izdelki nastopajo tudi na mednarodnih trgih.

Raziskovalna skupina ima eno od vodilnih svetovnih vlog na svojem raziskovalnem področju in sodeluje s skupinami iz vodilnih univerz in inštitutov. Podeljena nagrada vodi programske skupine ERC Advanced grant v letu 2013 priča o kakovosti skupine in njen pomen za promocijo Slovenije kot znanstveno in tehnološko napredne države. Programska skupina trenutno sodeluje v številnih projektih EU: ERC Advanced Grant, Marie Curie ITN, HINT EU projekt 7OP, več COST projektih in bilateralnih projektih. Raziskovalna skupina ima preko projektov CO Nanocentra dostop do preko 100 slovenskih in mednarodnih projektov, ki se navezujejo na opremo. Še posebej pomembne so sinergije, ki so se v okviru teh projektov razvile s partnerskimi institucijami, kot npr. TASC & Elettra Laboratories, Italija; Joanneum in Univerza v Gradcu, Avstrija; Univerza Oxfordu, Velika Britanija; Univerza Stanford, ZDA; Inštitutom za tehnologije in ETH, Švica; Nacionalni laboratoriji Brookhaven, ZDA; Univerza v Konstanz, Nemčija; Univerza Orsay, Francija, ki vpenjajo delovanje raziskovalne skupine v širši mednarodni prostor.

ANG

The research programme introduces a number of crossdisciplinary new technologies and a new and original research field to Slovenia, specifically timeresolved spectroscopy as a whole, nanoelectronics and nanolithography (both by electron beam and proprietary laser technology).

Nanoscale FET device construction, molecular beam epitaxy (MBE) and atomic layer deposition (ALD) are new techniques in Slovenia, and are introduced for the first time.

In the last 10 years, the group started two spinoff companies (Mo6 and NANOTUL). Experience suggests that new spinoff products and technologies can be expected to arise in the forthcoming period. The synthesis of transition metal oxides, carbides, chalcogenides and nitrides represents a very interesting field between chemical and physical sciences on one side and technological applications on the other. These compounds are important for a diverse range of technology, such as electronics, as lubricants, nanocomposites or for energy storage and conversion. Another spinoff in the pipeline will be developing multichannel detectors for femtosecond spectroscopy, which is commercially interesting. Prototypes are currently being tested and used in a number of publications.

The group is responsible for setting up and maintaining a number of research facilities: FIB/HRTEM dual beam instrument, ALD, MBE, AFM Raman, 4probe STM/AFM/SEM procured through European restructuring funds within the Centre of Excellence in Nanoscience and Nanotechnology - CENN Nanocenter.

The research field which has direct consequences for training top quality engineers for Slovenian high added value industry (like LPKF, Helios, BSH Bosh Siemens Hausgeräte, Xpand, Litostroj Power, Elaphe, IOS, Količevo karton) or abroad (like IEE Luxemburg, Ilmenau University, Germany, German Research School for Simulation Science, University of Antwerpen, Belgium).

Intense cooperation takes place with LPKF, a hightech medium size multinational company, developing the next generation of a laser lithography system (the current system, which was developed jointly with the Physics department at the University of Ljubljana is a marketed product). New nanomaterials, nanomaterials for composites are in use in paints and coatings industry (Helios, Cinkarna Celje). We expect commercial results in the field of battery electrode nanomaterials, solar cell components and sensor devices (Kolektor/Nanotesla institute).

The research group has a world leading position in the field, competing and/or collaborating with groups at leading universities. The award of an ERC Advanced grant TRAJECTORY to head of the group testifies to the quality of the group and its importance in promoting Slovenia worldwide as a scientifically and technologically advanced country. Our group is currently involved in a number of EU projects: ERC Advanced Grant, Marie Curie ITN, HINT EU project 7FP, several COST projects and bilateral projects. Research group has access to over 100 Slovene and international projects through CENN Nanocenter equipment. Especially important are the synergies within the framework of the projects developed with the partner institutions, such as TASC & Elettra Laboratories, Italy; Joanneum Research Institute and the University of Graz, Austria; University of Oxford, United Kingdom, and Stanford University in the USA, the Swiss Institute of Technology of Lausanne and ETH, Zurich, Brookhaven National Laboratory (USA), University of Konstanz, and the University of Orsay, which brings the work of the research groups in the wider international arena.

10. Zaključena mentorstva članov programske skupine pri vzgoji kadrov v obdobju 1.1.2009-31.12.2014¹¹

10.1. Diplome¹²

vrsta usposabljanja	število diplom
bolonjski program - I. stopnja	1
bolonjski program - II. stopnja	3
univerzitetni (stari) program	2

10.2. Magisterij znanosti in doktorat znanosti¹³

Šifra raziskovalca	Ime in priimek	Mag.	Dr.	MR	
32167	Martin Strojnik	☐	☒	☒	
32283	Vladimir Baranov	☐	☒	☒	

31085	Ljupka Stojčevska Malba	☐	☒	☒	
28483	Jure Strle	☐	☒	☒	
29531	Mathieu Lu-dac	☐	☒	☒	
25657	Andrej Tomelj	☐	☒	☒	

Legenda:

Mag. - Znanstveni magisterij**Dr.** - Doktorat znanosti**MR** - mladi raziskovalec**11. Pretok mladih raziskovalcev – zaposlitev po zaključenem usposabljanju¹⁴**

Šifra raziskovalca	Ime in priimek	Mag.	Dr.	Zaposlitev	
32167	Martin Strojnik	☐	☒	C - Gospodarstvo	
32283	Vladimir Baranov	☐	☒	E - Tujina	
31085	Ljupka Stojčevska Malbaši	☐	☒	A - raziskovalni zavodi	
28483	Jure Strle	☐	☒	A - raziskovalni zavodi	
29531	Mathieu Lu-dac	☐	☒	E - Tujina	
25657	Andrej Tomelj	☐	☒	C - Gospodarstvo	

Legenda zaposlitev:

A - visokošolski in javni raziskovalni zavodi**B** - gospodarstvo**C** - javna uprava**D** - družbene dejavnosti**E** - tujina**F** - drugo**12. Vključenost raziskovalcev iz podjetij in gostovanje raziskovalcev, podoktorandov ter študentov iz tujine, daljše od enega meseca, v obdobju 1.1.2009-31.12.2014**

Šifra raziskovalca	Ime in priimek	Sodelovanje v programski skupini	Število mesecev	
0	Andrei Schumilin	D - podoktorand	7	
0	Ivan Madan	C - študent – doktorand	24	
0	Igor Vaskivskyi	C - študent – doktorand	24	
0	Nevena Čelič	C - študent – doktorand	12	
0	Nataša Vujičić	D - podoktorand	8	
0	Daniele Vella	C - študent – doktorand	6	
0	Victor Vega Mayoral	C - študent – doktorand	6	
0	Johnatan Ward	C - študent – doktorand	3	
0	Tanuj Gupta	C - študent – doktorand	3	
0	Marina Davydova	C - študent – doktorand	4	
0	Sergeii Shelestiuk	D - podoktorand	2	

0	Yasunori Toda	B - uveljavljeni raziskovalec ▼	11	
---	---------------	---------------------------------	----	--

Legenda sodelovanja v programski skupini:

- A** - raziskovalec/strokovnjak iz podjetja
- B** - uveljavljeni raziskovalec iz tujine
- C** - študent – doktorand iz tujine
- D** - podoktorand iz tujine

13. Vključevanje v raziskovalne programe Evropske unije in v druge mednarodne raziskovalne in razvojne programe ter drugo mednarodno sodelovanje v obdobju 1.1.2009-31.12.2014¹⁵

SLO

COST Action MP1201: Nanoscale Superconductivity: Novel Functionalities through Optimized Confinement of Condensate and Fields NanoSC
 – COST
 doc. dr. Viktor Kabanov
 Trajanje: 19.10.2012 – 18.10.2016
http://www.cost.eu/domains_actions/mpns/Actions/MP1201/%28glossary%29/off
 7. OP – TRAJECTORY, Coherent Trajectories through Symmetry Breaking Transitions
 SP2Ideas,
 Support for frontier research (ERC) / Koherentne trajektorije skozi fazne prehode z zlomom simetrije, ERC Advanced Grant, ERC2012ADG_20120216, Grant Agreement Number 320602
 prof. dr. Dragan Mihailović
 Trajanje: 01.05.2013 30.04.2018
[MoWSeS Nanoelectronics based on twodimensional dichalcogenides/ Nanoelektronika na osnovi dvodimenzionalnih dihalogenidov, MC Networks for Initial Training \(ITN\), FP7PEOPLE2012ITN, GA no. 317451](#)
 dr. Cristoph Gadermaier
 Trajanje: 01.03.2013 28.02.2017
<http://moweses.epfl.ch/>
 HINTSNext
 generation Hybrid Interfaces for Spintronics Application, FP7NMP2011SMALL4
 Doc. dr. V. Kabanov, Institut Jožef Stefan
 Trajanje: 01.06.2011 31.05.2014
 COST Action MP0902: Composites of Inorganic Nanotubes and Polymers (COINAPO)
 Prof. D. Mihailović, Institut Jožef Stefan
 Trajanje: 27.10.2009 25.05.2013
 eGAP,
 Royal Society Joint Projects 2009/R2
 Prof. S. Alexandrov, Loughborough University; Prof. D. Mihailović, Institut Jožef Stefan
 Trajanje: 15.11.2009 14.11.2011
 Določanje elektronskofononske sklopitve v superprevodnikih z višjo kritično temperaturo iz femtosekundnih relaksacijskih časov
 Vodja: doc. dr. Viktor Kabanov
 Trajanje: 01.04.2011 31.12.2013
 ARRS številka: BIIT/1113001
 Časovno ločljiva spektroskopija kolektivnih elektronsko urejenih stanj v železovih pniktidih
 Vodja: doc. dr. Viktor Kabanov
 Trajanje: 01.07.2011 30.06.2013
 ARRS številka: BICN/1113003
 Gojenje kristalov in filmov kupratnih superprevodnikov in časovno ločljiva optična

spektroskopija superprevodnega stanja

Vodja: doc. dr. Tomaž Mertelj

Trajanje: 01.07.2011 30.06.2013

ARRS številka: BICN/

1113014

Nelinearna optična spektroskopija in proučevanje elektronske paramagnetne resonance dolinskopolariziranih

nabojev v enoplastnem molibdenovem disulfidu

Vodja: dr. Christoph Gadermaier

Trajanje: 1.1.2014 31.12.2015

ARRS številka: BIRU/

1415046

Spekter kolektivnih vzbuditev kvazi enodimenzionalnih prevodnikov z valom gostote naboja v ravnovesnem in neravnovesnem stanju

Vodja: dr. Viktor Kabanov

Trajanje: 01.01.2012 31.12.2013

ARRS številka: BIRU/

1213003

Eksperimentalne raziskave kolektivnih ekscitacij v Peierlsovih prevodnikih z optičnimi

metodami

Vodja: dr. Viktor Kabanov

Trajanje: 01.01.2010 31.12.2011

ARRS številka: BIRU/

1011003

14.Vključenost v projekte za uporabnike, ki so v obdobju trajanja raziskovalnega programa (1.1.2009–31.12.2014) potekali izven financiranja ARRS¹⁶

SLO

Sodelovanje v projektih s Centrom odličnosti nanoznanosti in nanotehnologije CO Nanocenter pri uvedbi novih znanstvenih metod v Sloveniji:

1. dr. Jure Strle: razvoj metode depozicije za rast monokristalnih tankih plasti za izdelovanje filmov različnih materialov (kovine, polprevodniki, magnetni materiali,...)
2. dr. Martin Strojnik: razvoj metode atomske depozicije za nanašanje različnih atomskih plasti
3. Miloš Borovšak, MR: razvoj metode za konfokalne meritve in AFM meritve vzorcev velikosti 50x50 mm pri atomski ločljivosti
4. Jože Buh, MR: razvoj metode s tehniko fokusiranega ionskega snopa. Tehnika se uporablja v industriji polprevodnikov, pri vedah o materialih in biologiji za različne analize
5. doc. dr. Tomaž Mertelj: razvoj metode optičnih meritev v prečnem in vzdolžnem magnetnem polju do 7 T v območju temperature 1,5 300 K
6. prof. dr. Dragan Mihailović: razvoj mikroskopske metode s 4sondnim STM UHV sistemom, namenjenim za karakterizacijo in procesiranje tankih filmov in nanostruktur.

15.Ocena tehnološke zrelosti rezultatov raziskovalnega programa in možnosti za njihovo implementacijo v praksi (točka ni namenjena raziskovalnim programom s področij humanističnih ved)¹⁷

SLO

Delo na optimizaciji naprave za lasersko risanje v sodelovanju s podjetjem LPKF Laser&Electronics d.o.o. je privedlo do proizvoda LDI, naprave za prototipsko risanje vezije, ki je v letu 2013 prešla v redno proizvodnjo. Delo skupine je bilo usmerjeno v ekstenzivno testiranje in optimizacijo postopkov za risanje vezij. Delo je potekalo v sodelovanju s Fakulteto za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani, Centrom odličnosti Nanocenter ter LPKF Laser&Electronics d.o.o. Naprava je bila tudi uporabljena v članku, ki je leta 2014 izšel v reviji Science, kar služi kot promocija omenjenemu proizvodu. Posnet je bil tudi kratek promocijski film

z opisom rezultatov članka v Science in LDI naprave. Prospekt naprave je dosegljiv na strani <http://www.lpkf.com/mediafiles/2009protolaserldi.pdf>

16. Ocenite, ali bi doseženi rezultati v okviru programa lahko vodili do ustanovitve spin-off podjetja, kolikšen finančni vložek bi zahteval ta korak ter kakšno infrastrukturo in opremo bi potrebovali

možnost ustanovitve spin-off podjetja	☐ DA ☒ NE
potrebni finančni vložek	EUR
ocena potrebne infrastrukture in opreme ¹⁸	

17. Izjemni dosežek v letu 2014¹⁹

17.1. Izjemni znanstveni dosežek

Raziskovalci so pod vodstvom prof. dr. Dragana Mihailovića odkrili prvi primer stabilnega »skritega« stanja v naravi. O svojem odkritju so poročali v ugledni reviji Science (344, 2014). Skrito stanje je drugačno od vseh znanih stanj v snovi - tega je mogoče doseči zgolj s pomočjo močnega in izredno kratkega laserskega sunka. Ko snovi spreminjamo temperaturo, gre pogosto skozi enega ali več faznih prehodov, na primer iz tekočega v trdno stanje ali iz nemagnetnega v magnetno stanje in podobno. Fazni prehodi lahko povzročijo tudi spremembo tlaka ali elektromagnetnega polja. V vseh omenjenih primerih pa je snov skoraj v ravnovesju in gre počasi skozi običajna stanja v snovi. Odkritje je pomembno, saj je prvi primer stabilnega skritega stanja v naravi sploh. Kaže na to, da so tovrstna stanja dejansko mogoča, in s tem odpira raziskave skritih stanj v različnih sistemih, vse od paralelnega vesolja do novih elementarnih delcev in novih oblik kondenzirane materije.

17.2. Izjemni družbeno-ekonomski dosežek

Programski skupini Dinamika kompleksnih snovi (P1-0040) je mednarodni programski odbor zaupal organizacijo mednarodne znanstvene konference Photoinduced Phase Transitions 5, ki je potekala junija 2014 na Bledu. Vsebinsko so prispevki pokrivali naslednja področja(i) New phenomena in nonequilibrium collective behaviour, hidden states of matter and metastability, (ii) New materials exhibiting photoinduced phase transitions and cooperative phenomena, (iii) New time-resolved experimental technologies for studies of nonequilibrium phenomena in condensed matter systems, (iv) Theoretical developments in nonequilibrium phase transitions. Med uglednimi domačimi govorniki, so svoje delo na dogodku predstavili tudi uveljavljeni tuji predavatelji iz Evrope, ZDA in Japonske. Knjiga povzetkov je dostopna na: http://pipt5.ijs.si/files/BOOK-OF-ABSTRACTS_2014-06-05.pdf

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 in obdelavo teh podatkov za evidence ARRS;
- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v papirnati obliki;
- so z vsebino poročila seznanjeni in se strinjajo vsi izvajalci raziskovalnega programa.

Podpisi:

*zastopnik oz. pooblaščen oseba
matične RO (JRO in/ali RO s
koncesijo):*

in

vodja raziskovalnega programa:

Institut "Jožef Stefan"

Dragan D. Mihailović

ŽIG

Kraj in datum:

Ljubljana

13.3.2015

Oznaka poročila: ARRS-RPROG-ZP-2015/131

¹ Napišite povzetek raziskovalnega programa v slovenskem jeziku (največ 3.000 znakov vključno s presledki – približno pol strani, velikost pisave 11) in angleškem jeziku (največ 3.000 znakov vključno s presledki – približno pol strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

² Napišite kratko vsebinsko poročilo, v katerem predstavite raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja, rezultate in učinke raziskovalnega programa in njihovo uporabo ter sodelovanje s tujimi partnerji. V primeru odobrenega povečanja obsega financiranja raziskovalnega programa v letu 2014 mora poročilo o realizaciji programa dela zajemati predložen program dela ob prijavi in predložen dopolnjen program dela v letu 2014. Največ 12.000 znakov vključno s presledki (približno dve strani, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

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

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

⁵ Navedite znanstvene dosežke (največ pet), ki so nastali v okviru izvajanja raziskovalnega programa. Raziskovalni dosežek iz obdobja izvajanja programa 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 (največ pet), ki so nastali v okviru izvajanja raziskovalnega programa. Družbeno-ekonomski dosežek iz obdobja izvajanja programa 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 programa ... - v obeh primerih ni COBISS ID). [Nazaj](#)

⁷ Navedite rezultate raziskovalnega programa iz obdobja izvajanja programa v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 6 in 7 (npr. ker se ga v sistemu COBISS ne vodi). Največ 2.000 znakov vključno s presledki (približno 1/3 strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

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

⁹ Največ 4.000 znakov vključno s presledki (približno 2/3 strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

¹⁰ Največ 4.000 znakov vključno s presledki (približno 2/3 strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

¹¹ Upoštevajo se le tiste diplome, magisteriji znanosti in doktorati znanosti (zaključene/i v obdobju 1.1.2009–31.12.2014), pri katerih so kot mentorji sodelovali člani programske skupine. [Nazaj](#)

¹² Vpišite število opravljenih diplom v času izvajanja raziskovalnega programa glede na vrsto usposabljanja. [Nazaj](#)

¹³ Vpišite šifro raziskovalca in/ali ime in priimek osebe, ki je v času izvajanja raziskovalnega programa pridobila naziv magister znanosti in/ali doktor znanosti ter označite doseženo izobrazbo. V primeru, da se je oseba usposabljala po programu Mladi raziskovalci, označite "MR". [Nazaj](#)

¹⁴ Za mlade raziskovalce, ki ste jih navedli v tabeli 11.2. točke (usposabljanje so uspešno zaključili v obdobju od 1.1.2009 do 31.12.2014), izberite oz. označite, kje so se zaposlili po zaključenem usposabljanju. [Nazaj](#)

¹⁵ Navedite naslove projektov in ime člana programske skupine, ki je bil vodja/koordinator navedenega projekta. Največ

6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

¹⁶ Navedite naslove projektov, ki ne sodijo v okvir financiranja ARRS (npr: industrijski projekti, projekti za druge naročnike, državno upravo, občine idr.) in ime člana programske skupine, ki je bil vodja/koordinator navedenega projekta. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

¹⁷ Opišite možnosti za uporabo rezultatov v praksi. Opišite izdelke oziroma tehnologijo in potencialne trge oziroma tržne niše, v katere sodijo. Ocenite dodano vrednost izdelkov, katerih osnova je znanje, razvito v okviru programa oziroma dodano vrednost na zaposlenega, če jo je mogoče oceniti (npr. v primerih, ko je rezultat izboljšava obstoječih tehnologij oziroma izdelkov). Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

¹⁸ Največ 1.000 znakov vključno s presledki (približno 1/6 strani, velikost pisave 11) [Nazaj](#)

¹⁹ Navedite en izjemni znanstveni dosežek in/ali en izjemni družbeno-ekonomski dosežek raziskovalnega programa v letu 2014 (največ 1000 znakov, vključno s presledki, velikost pisave 11). 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-RPROG-ZP/2015 v1.00b

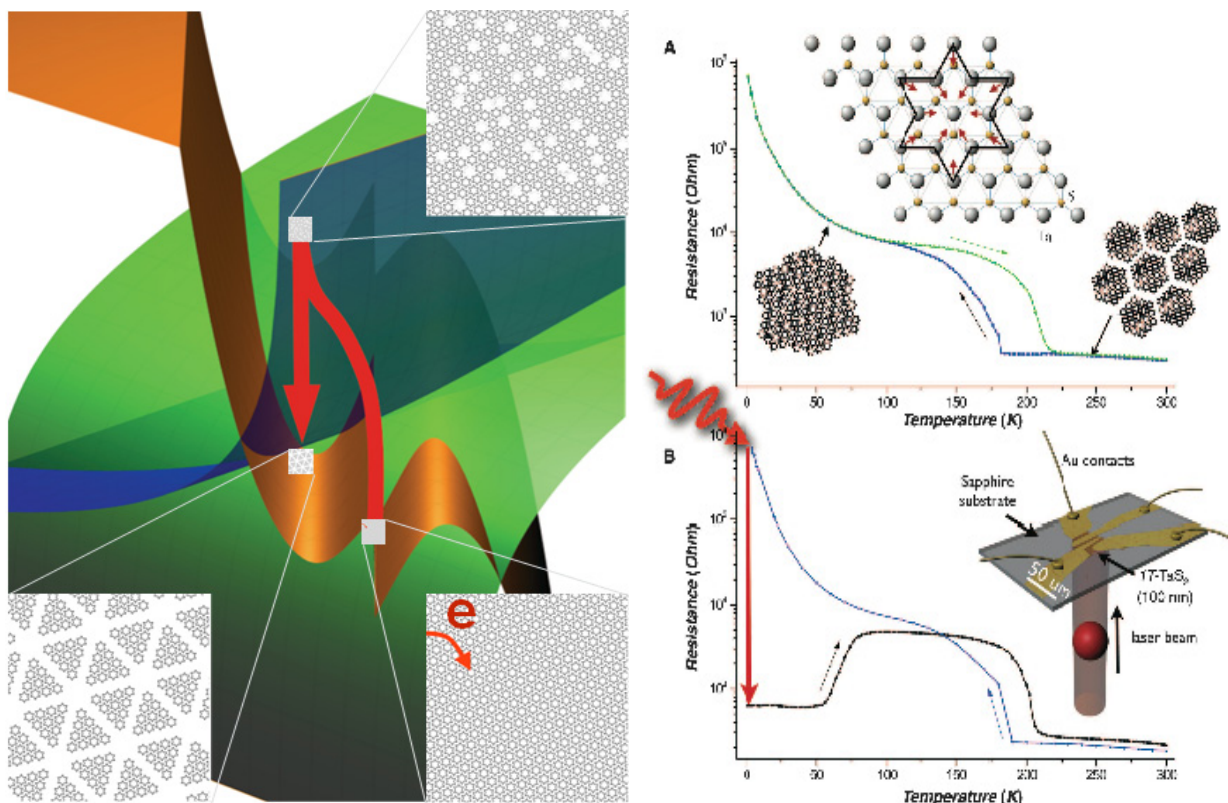
6D-E9-27-91-68-76-54-B4-3D-59-A8-59-48-DE-86-F1-B3-9A-BA-AE

Priloga 1

VEDA

Področje: šifra in naziv področja: 1.02 Naravoslovje, Fizika

Dosežek 1: **Izjemni znanstveni dosežek:** Primer stabilnega „skritega“ stanja v naravi, Vir: STOJCHEVSKA, Ljupka, VASKIVSKYI, Igor, MERTELJ, Tomaž, KUŠAR, Primož, SVETIN, Damjan, BRAZOVSKII, Serguei, MIHAILOVIĆ, Dragan. Ultrafast switching to a stable hidden quantum state in an electronic crystal. *Science*, ISSN 0036-8075, 2014, vol. 344, no. 6180, str. 177-180.



Novo kvantno stanje je povsem stabilno. Raziskovalci v svojem delu prikažejo, kako je kristal mogoče preklopiti tudi nazaj v običajno stanje. Življenjska doba novoodkritega stanja je pri sobni temperaturi skoraj sekunda, ocenjena življenjska doba pri nizkih temperaturah pa je daljša od starosti vesolja. Še posebej zanimivo je, da se ob preklopu v delčku sekunde snov spremeni iz izolatorja v kovino, s spremljajočo spremembo barve in upornosti. Stabilna skrita stanja so bila odslej le hipotetična, peščica znanih primerov meta stabilnih stanja pa je zelo kratkoživih in jih je bilo zato zelo težko raziskovati. Dosežku daje dodatno vrednost uvodni članek uredništva revije *Science* in visoka citiranost članka.