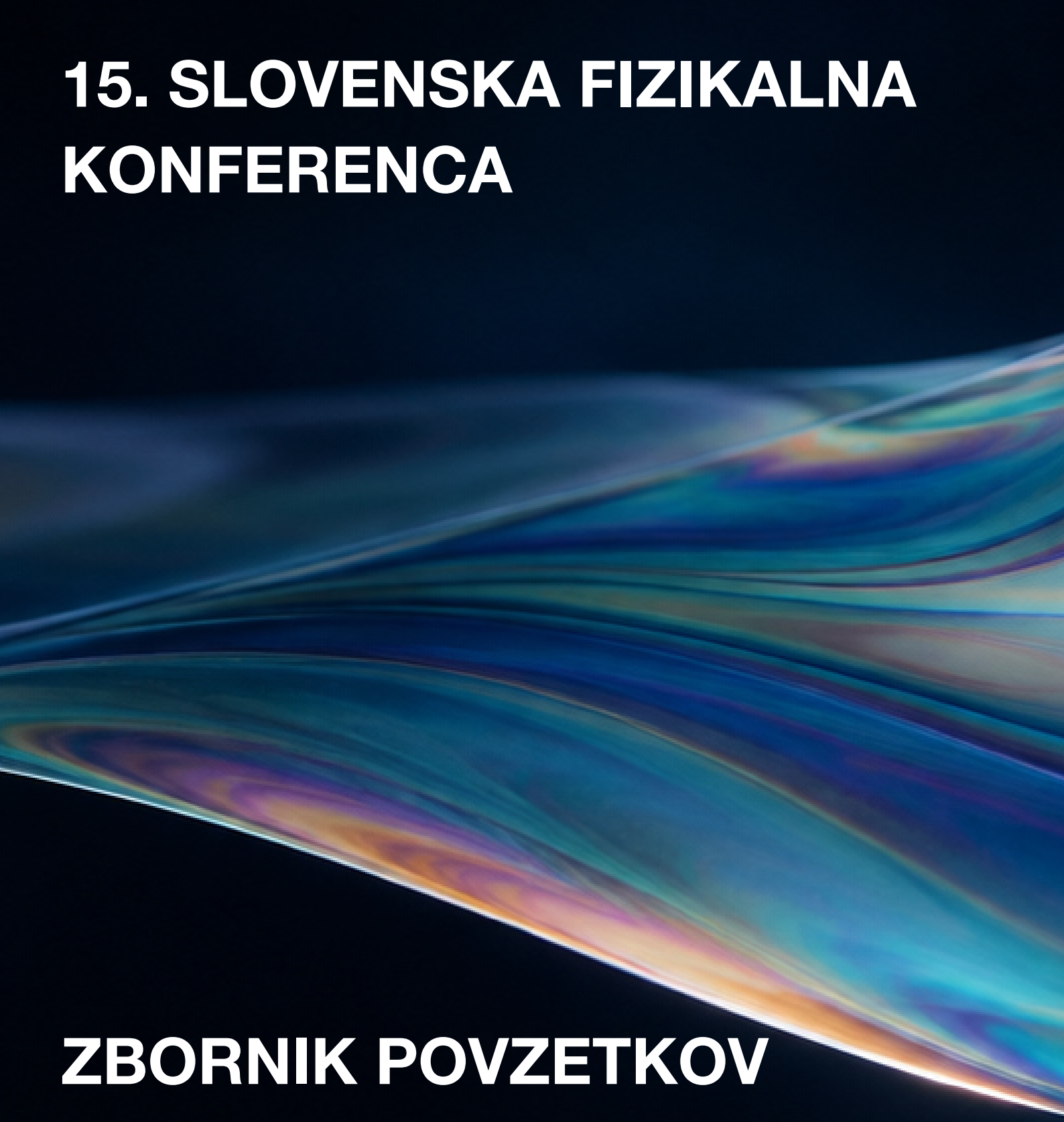
15. SLOVENSKA FIZIKALNA KONFERENCA



ZBORNIK POVZETKOV

Brdo pri Kranju

20. november 2026

SFK

SLOVENSKA FIZIKALNA KONFERENCA

15. Slovenska fizikalna konferenca

ZBORNIK POVZETKOV

Brdo pri Kranju
20. november 2026

Organizatorja

Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Institut »Jožef Stefan«

Programski odbor

prof. dr. Primož Ziherl, prof. dr. Denis Arčon, prof. dr. rer. nat. Maruša Bradač, prof. dr. Uroš Cvelbar, prof. dr. Irena Drevenšek Olenik, prof. dr. Jernej Fesel Kamenik, prof. dr. Andreja Gomboc, prof. dr. Robert Jeraj, prof. dr. Borut Paul Kerševan, prof. dr. Rok Petkovšek, prof. dr. Tomaž Prosen, prof. dr. Iztok Tiselj, prof. dr. Nataša Vaupotič, prof. dr. Rok Žitko, prof. dr. Matjaž Žitnik

Organizacijski odbor

Jošt Stergar
Luka Cmok
Primož Ziherl
Črt Keber

Uredniki

Jošt Stergar
Primož Ziherl

Spletna stran

sfk.fmf.uni-lj.si

Program 15. Slovenske fizikalne konference

Brdo pri Kranju, 20. 11. 2026

8.50	-	9.00	Pozdravni nagovor
9.00	-	9.30	**Jaka Vodeb: Kvantna simulacija razpada lažnega vakuuma s 5564 superprevodnimi kubiti**
9.30	-	9.45	Gregor Humar: Resonančni razpad lažnega vakuuma v dveh dimenzijah na kvantnem žarilniku
9.45	-	10.00	Marko Ljubotina: Od koherentnih magnonov do superdifuzije v kaoticnem kvantnem sistemu
10.00	-	10.15	Katja Gosar: Posamezni cezijevi atomi v optičnih pincetah: priprava, nedestruktivno slikanje in vzbujanje v Rydbergova stanja
10.15	-	10.45	Odmor
10.45	-	11.15	**Lorenzo Ubaldi: Colliders are not testing locality via Bell's inequality nor providing an unconditional proof of entanglement**
11.15	-	11.30	Lenart Jerala: Elektrošibki popravki Sudakova v simulacijah z več curki in razpadi resonanc
11.30	-	12.00	**Anna Razumnaya: Topološka stanja v nanostrukturiranih feroelektrikih**
12.00	-	12.15	Marion van Midden Mavrič: Od 2D mrež do kvazi-1D verig: inkapsulacija radikalov C59N• v [10]CPP in njihova lokalna elektronska struktura
12.15	-	12.30	Maruša Mur: Znotrajcelično 3D tiskanje z dvo-fotonsko fotolitografijo
12.30	-	14.30	Kosilo
14.30	-	15.00	**Matija Milanič: Fizika večnivojskega slikanja: od strukture tkiv do biomarkerjev bolezni**
15.00	-	15.15	Vid Agrež: Optična karakterizacija udarnih valov ob kolapsu kavitacijskih mehurčkov
15.15	-	15.30	Primož Pelicon: Nov ionski pospeševalnik na IJS
15.30	-	15.45	Sabina Markelj: Raziskave poškodb ter zadrževanja vodikovih izotopov v materialih za fuzijske namene
15.45	-	16.00	DMFA predavanje
16.00	-	17.45	Ogled plakatov in odmor
18.00	-	19.00	Podelitev Blinčevih nagrad
19.00	-	21.00	Večerja
21.00			Zaključek

Seznam plakatov

P001	Lara Erzin	Od molekularne strukture do makroskopskih lastnosti terapevtskih proteinov
P002	Vid Pograjc	Adsorpcija surfaktantov na površini: atomistični pristop na osnovi proste energije
P003	Ervin Mustafić	Večkanalna fluorescenčna mikroskopija s časovno-spektralno dekompozicijo in korekcijo saturacije detektorja
P004	Katarina Kokalj	Vpogled v dinamiko pretrganja ultra tankih sufraktantnih filmov
P005	Jan Rozman	Tkiva kot aktivna snov
P006	Fran Ivan Vrban	Kapljični model in zvezdasti polimeri v dvodimenzionalni utesnitvi
P007	Jaka Godec	Strižni tok kot vir magnetnega polja v izotropnih suspenzijah magnetnih nanoploščic
P008	Anej Sterle	Anizotropna difuzija ionov v feroelektričnih nematskih tekočinah
P009	Irena Drevenšek Olenik	Generacija toka tekočin z magnetoaktivnimi mikrostrukturami
P010	Izidor Straus	Preučevanje preurejanja mikrodelcev v magnetoaktivnih elastomerih z nevtronskim sipanjem
P011	Martin Horvat	Dinamična tekočekristalna celica za nadzor in oblikovanje disklinacijskih linij
P012	Peter Medle Rupnik	Hidrodinamski pojavi v feroelektrični nematski tekočini
P013	Mojca Vilfan	Raziskave na področju fizike mehke snovi v skupini Svetloba in snov
P014	Ema Hanžel	Struktura in topologija antiferoelektričnih nematikov v diskih in površinskih kapljicah
P015	Ema Pilih	Karakterizacija strukture feroelektričnih nematskih tekočekristalnih krogelnih lupin s pomočjo linearne in nelinearne optične mikroskopije
P016	Uroš Jagodič	Izdelava koloidnih delcev s poljubno porazdelitvijo površinskega sidranja nematskih tekočih kristalov
P017	Jan Rugelj	Oblikovanje topoloških defektov v tekočih kristalih z dvofotonskim laserskim risanjem
P018	Jaka Mur	Optične meritve asimetričnih udarnih valov
P019	Žiga Kos	Neravnovesna topološka mehka snov
P020	Egon Pavlica	Effect of electric field on islands aspect ratio in organic molecular-beam epitaxy
P021	Matjaž Žitnik	Efekt interakcije spin-tir na resonantni Augerjev razpad pri disociaciji HCl
P022	Jan Gobec	Preučevanje pozicije devterija v poškodovanem volframu s pomočjo ionskih metod v načinu kanaliziranja
P023	Mitja Kelemen	Implantacijska infrastruktura na IJS za potrebe kvantnih tehnologij
P024	Klemen Bučar	Nadzor dvofotonskega vzbujanja helijevih stanj s koherentno večbarvno svetlobo
P025	Janez Turnšek	Proženje, nadzor in vidne sledi samoojačane emisije iz dvojno vzbujenih stanj helija
P026	Gregor Košir	Prvi prototip eksperimenta HISPEC-10
P027	Robert Hauko	Rentgenski emisijski spektri elementov med Fe in As nad absorpcijskim robom K
P028	Luka Jevšenak	Sipanje dveh pionov in resonanca ρ v kvantni kromodinamiki na mreži
P029	Ihor Prudiiev	Iskanje razpada B-nič v K-šhort τ+ τ −
P030	Guri K. Buza	Šibki dekoherenčni učinki gravitonov
P031	Lara Srdojević	Dolgoživi nevtralni skalarji v gugalničnem mehanizmu tipa II
P032	Nikiša Plešec	Vpliv kvantnih fluktuacij na razpadno širino lažnega vakuuma v limiti tanke stene
P033	Filip Kos Maligoj	Simulacija nizkotlačne induktivno sklopljene plazme
P034	Jože Luzar	Vpliv Cu in Al na fizikalne lastnosti srednje- in visokoentropijskih zlitin na osnovi CoFeNi
P035	Juš Polanšek	Plazemska predobdelava preje PA6 za barvanje pri nižjih temperaturah
P036	Shafayet Yaseen	Plazmonska laserska litografija brez maske neposredno na podlagah
P037	Urška Gazdag	Izboljšanje odziva senzorjev na osnovi nanoporoznih tankih plasti z vključevanjem ionskih tekočin
P038	Marcel Malovrh	Mionska mesta in vpliv mionov na kristalna električna polja v kvantnem magnetu ErTa7O19
P039	Julia Petrović	Nekonvencionalni magnetizem v srednjeentropijskih zlitinah iz lahkih redkih zemelj CexPrNdSm
P040	Izidor Benedičič	Spremljanje fazne separacije z meritvami šibkega magnetizma v CaFe3O5
P041	Aljaž Krivograd	Simulacije kvantnega magneta ErTa7O19 s klasičnimi spinskimi pristopi
P042	Maj Mejak	Frakcionalizacija v frustriranem kvantnem magnetu BaCo2(AsO4)2
P043	Kevin Jaksetič	Eksotični magnetizem in vztrajna spinska dinamika v frustriranem antiferomagnetu trikotne mreže z Jeff = 1/2
P044	Matija Marolt	Simulacija spinskih sistemov z variacijskimi kvantnimi algoritmi
P045	Jaka Strohsack	Odtis skritega vala gostote naboja v ultrahitri fotovzbujeni reflektivnost v Pb(TaSe2)2
P046	Bor Luka Urlep	Simulacija kvantnega pomnilnika v alkalijskih atomih
P047	Mario Pezer	Momentna odvisnost lastne energije v šibko koreliranih d^{1} perovskitnih oksidih SrVO$_3$, SrNbO$_3$ in SrTaO$_3$
P048	Sara Klopčič	Kvantna prepletenost in kvantno slikanje v strukturah tekočih kristalov
P049	Hadis Torbatiyan	When Decoherence Creates Interference: An Optical Simulation of Matter Waves
P050	Adrian Udovičić	Entanglement-based quantum key distribution over a 110 km deployed fiber link
P051	Shreya Gupta	Trade-off between the heralding efficiency and the bandwidth of a cavity-enhanced SPDC source

P052	Fatemeh Pourkhavari	Optimizing the design for a compact cavity-enhanced source of polarization entangled photon pairs
P053	Peter Jeglič	Večpulzni eksperimenti na kvantnem pomnilniku s cezijevimi atomi
P054	Jure Pirman	Holografija svetlobe shranjene v cezijevih atomih
P055	Rok Podlipec	Avtomatizirana hiperspektralna analiza optičnih mikroresonanc v primarnih človeških maščobnih celicah
P056	Lucijan De Reggi	Optični mikroresonatorji kot senzorji lomnega količnika tekočega medija pod ekstremnimi tlaki
P057	Tilen Knaflič	Neposredne meritve odvoda spektra optično detektirane magnetne resonance
P058	Urban Simončič	Odstranjevanje repnih artefaktov v OCT angiografiji
P059	Aljaž Robek	Korekcija geometrijskih popačenj pri optični koherenčni tomografiji
P060	Milica Pena	Preučevanje prenosa plina skozi dolge mikrokapilare
P061	Matej Gabrijelčič	MAS NMR vpogled v vključevanje in hidracijo litijevih soli v MOF-808
P062	Matija Budja	Strojno učenje za segmentacijo zrn pri kompleksnih visokoentropijskih zlitinah
P063	Andreja Jelen	Spinodalni razpad v feromagnetnih visokoentropijskih zlitinah
P064	Laura Martinčič	Plazemsko podprta površinska modifikacija Ti2C MXenov za visokozmogljive superkondenzatorje
P065	Boris Majaron	Razvoj fototermalne tomografije za uporabo v biomedicini
P066	Marko Toroš	Kvantna optika in mehanske rotacije
P067	Gašper Letnar	Primerjava izračunov zakasnele toplote izgorelega jedrskega goriva z meritvami
P068	Jan Kaufman	Karakterizacija toka v zunanje hlajeni slepi cevi s predpisanim robnim pogojem na ustju
P069	Simon Lončarič	Vpliv moči reaktorja in hlajenja bazena na temperaturno porazdelitev v sredici reaktorja TRIGA
P070	Žan Butala	Simulacija turbulentnega toka hladila v povratnem kanalu jedrske elektrarne Krško
P071	Gianluca Lagnese	Modeliranje disipativne dinamike z nevronskimi mrežami
P072	Viktoriia Yursa	Programirljiv superprevodnik, ustvarjen s svetlobo
P073	Primož Ziherl	Biofizika
P074	Matic Kunšek	Od celice do zdravila: fizika, modeliranje in podatkovna znanost v razvoju podobnih bioloških zdravil

Zlati partner:

SANDOZ | lek

Zlata sponzorja:

ATOM QUANTUM LABS

NOVARTIS

Sponzorja:

hse

GEN SKUPINA

Podpornik:

Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije

VABLJENA PREDAVANJA

Kvantna simulacija razpada lažnega vakuuma s 5564 superprevodnimi kubiti

Jaka Vodeb[1], Jean-Yves Desaules[2,3], Andrew Hallam[3], Andrea Rava[1,4], Gregor Humar[5,6], Dennis Willsch[1,7], Fengping Jin[1], Madita Willsch[1,8], Kristel Michielsen[1,4,8] in Zlatko Papić[3]

1. *Jülich Supercomputing Centre, Institute for Advanced Simulation, Forschungszentrum Jülich, Jülich, Nemčija*
2. *Institute of Science and Technology Austria (ISTA), Klosterneuburg, Avstrija*
3. *School of Physics and Astronomy, University of Leeds, Leeds, Združeno kraljestvo*
4. *RWTH Aachen University, Aachen, Nemčija*
5. *Odsek za kompleksno snov, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana, Slovenija*
6. *Oddelek za fiziko, Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija*
7. *Faculty of Medical Engineering and Technomathematics, University of Applied Sciences Aachen, Jülich, Nemčija*
8. *AIDAS, Jülich, Nemčija*

Razpad lažnega vakuuma, pri katerem metastabilno kvantno stanje preide v energijsko ugodnejše stanje pravega vakuuma, je eden izmed temeljnih neravnovesnih pojavov v kvantni teoriji polja. Pomembno vlogo ima tudi v kozmologiji, kjer je povezan z vprašanji stabilnosti vakuuma in razvoja zgodnjega vesolja. Zaradi neperturbativne narave procesa sta njegov teoretični opis in neposredno eksperimentalno opazovanje izjemno zahtevna.

V raziskavi [1] smo s pomočjo kvantnega žarilnika s 5564 superprevodnimi kubiti simulirali razpad lažnega vakuuma v enodimenzionalnem kvantnem Isingovem modelu. Pokazali smo, da razpad poteka prek resonančnega nastajanja kvantiziranih mehurčkov pravega vakuuma, katerih velikost lahko nadzorujemo z zunanjim magnetnim poljem. Opazovali smo resonančno nastajanje mehurčkov različnih velikosti in karakteristične skalirne zakonitosti, ki odražajo koherentno večdelčno kvantno dinamiko kljub prisotnosti disipacije.

Posebej zanimiva je dinamika po nastanku mehurčkov. Ugotovili smo, da so večji mehurčki v izolaciji praktično nepremični, medtem ko lahko medsebojno interagirajo in si izmenjujejo delce. Pri tem nastajajo manjši, gibljivi mehurčki, ki omogočajo prenos vzbuditev skozi sistem. Rezultati razkrivajo nepričakovano bogato kolektivno dinamiko razpada lažnega vakuuma in kažejo, da lahko sodobne kvantne naprave uporabimo za raziskovanje fundamentalnih neravnovesnih kvantnih pojavov, ki so s klasičnimi numeričnimi metodami težko dostopni.

[1] J. Vodeb in sod., *Nature Physics* 21, 386–392 (2025).

Colliders are not testing locality via Bell's inequality nor providing an unconditional proof of entanglement

Steven A. Abel[1], Herbi K. Dreiner[2], Rhitaja Sengupta[2], Lorenzo Ubaldi[3]

1. IPPP, and Department of Mathematical Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK
2. BCTP & Physikalisches Institut der Universität Bonn, Nußallee 12, 53115 Bonn, Germany
3. Jožef Stefan Institute, Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenia

Recently there has been an increased interest in possible tests of locality via Bell's inequality or tests of entanglement at colliders, in particular at the LHC. These have involved various physical processes, such as tbar t, or $\tau^+\tau^-$ production, or the decay of a Higgs boson to 2 vector bosons $H \to VV^*$. We argue that *none* of these proposals constitute a test of locality via Bell's inequality or a test of quantum entanglement versus non-entanglement. In all cases what is measured are the momenta of the final state particles. Using the construction proposed by Kasday (1971) in a different context, and adapted to collider scenarios by Abel, Dittmar, and Dreiner (1992), it is straightforward to construct a local hidden variable theory (LHVT) which exactly reproduces the data. This construction is only possible as the final state momenta all commute. This LHVT satisfies Bell's inequality and is by construction not entangled. Thus a test of locality via Bell's inequality or a test of entanglement versus non-entanglement is inherently not possible.

Topološka stanja v nanostrukturiranih feroelektrikih

Anna Razumnaya

Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

Topološka polarizacijska stanja, med katera sodijo vrtinci, hopfioni in skirmioni, se vse bolj uveljavljajo kot ključno raziskovalno področje fizike feroelektrikov, saj jih poganjata nanometrska omejitev in dolgosežne elektrostatične interakcije. Čeprav so ta stanja intenzivno preučevana teoretično, njihovo neposredno eksperimentalno opazovanje v samostoječih feroelektričnih nanostrukturah ostaja omejeno.

V tem prispevku združujemo temeljne koncepte topologije in topološke hidrodinamike z naprednimi eksperimentalnimi pristopi [1]. V okviru Arnoldove topologije teoretični modeli napovedujejo in razvrščajo možne polarizacijske konfiguracije ter usmerjajo načrtovanje geometrije vzorcev, robnih pogojev in zunanjih dražljajev.

Za povezavo med napovedmi in meritvami raziskava združuje teoretično analizo, fazno-poljske in atomistične simulacije ter visoko ločljive eksperimentalne podatke, pridobljene s piezoresonančno silovno mikroskopijo, Braggovo koherentno rentgensko difrakcijo in vrstično presevno elektronsko mikroskopijo. Tak integrirani pristop omogoča rekonstrukcijo tridimenzionalnih polarizacijskih polj in nadzorovano manipulacijo topoloških polarizacijskih stanj, vključno z reverzibilnim preklapljanjem kiralnosti.

Čeprav validacija še poteka za samostoječe arhitekture, rezultati že potrjujejo zanesljivo rekonstrukcijo in nadzorovano manipulacijo polarizacijskega polja ter nakazujejo praktične poti za generiranje, pretvorbo in stabilizacijo topoloških stanj. Ti dosežki odpirajo nove možnosti za kiralno optoelektroniko, kvantne naprave in nevromorfne sisteme.

[1] I. Luk'yanchuk, A. Razumnaya, S. Kondovych et al., Physics Reports. 1110, 3, 1 (2025).

Fizika večnivojskega slikanja: od strukture tkiv do biomarkerjev bolezni

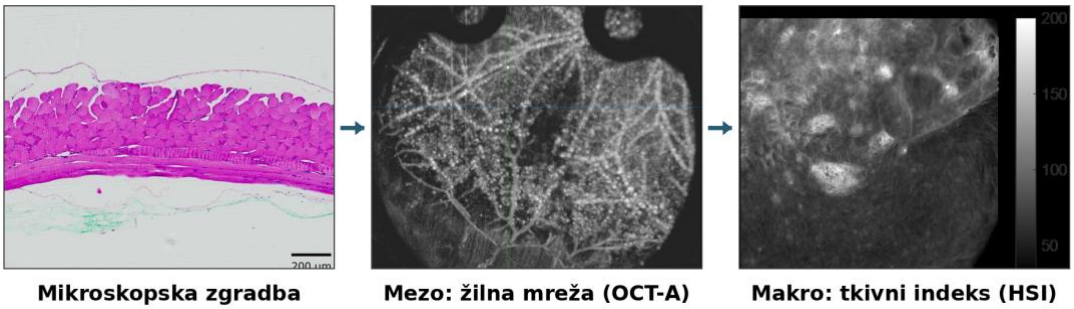
Matija Milanič[1,2], Črt Keber[1], Tadej Tomanič[1], Aljaž Robek[2], Doruntina Hoxha[1], Boštjan Markelc[3], Aleš Grošelj[3], Gregor Serša[3], Martina Modic[2,1],Urban Simončič[1,2] in Jošt Stergar[1,2]

1. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Ljubljana
2. Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana
3. Onkološki inštitut, Ljubljana

Biološka tkiva so hierarhično organiziran medij z značilnimi absorpcijskimi in sipalnimi lastnostmi izvirajoč iz tkivne sestave in funkcije. Večnivojsko optično slikanje tkiv ne pomeni zgolj povečevanja prostorske ločljivosti slik, temveč povezovanje komplementarnih informacij od mikroskopske organizacije celic do fiziologije celotnega tkiva. Osrednjo povezovalno vlogo med različnimi nivoji imajo fizikalni modeli interakcije svetlobe s tkivom.

Na mikroskopski ravni bomo na histoloških rezinah tkiv obravnavali organizacijo celic in jeder ter prostorsko urejenost. Takšni pristopi omogočajo določanje kvantitativnih kazalnikov tkivne organizacije, povezanih s stopnjo vnetja ali malignimi spremembami. Na mezoskopski ravni optična koherenčna tomografija omogoča 3D vrednotenje strukture in tumorskega žilja. Na makroskopski ravni hiperspektralno slikanje omogoča prikaz strukturnih in fizioloških parametrov, povezanih s hemoglobinom, oksigenacijo, perfuzijo in heterogenostjo tkiva. Klasični modeli transporta svetlobe zagotavljajo interpretabilnost slik, metode strojnega učenja pa pospešijo in izboljšajo reševanje s tem povezanih problemov.

Na primerih pokažemo, da posamezni nivoji niso zamenljivi: histologija razkrije mikroskopsko organizacijo celic ob vnetju, OCT prostorsko arhitekturo tkiv in žilje v tumorjih, hiperspektralno slikanje pa funkcionalno stanje vnetih in tumorskih tkiv. Ključni izziv prihodnosti je povezovanje informacij od celične organizacije do funkcionalnega stanja tkiv v kvantitativne biomarkerje in digitalne modele bolezni.



Slika 1: Povezovanje mikroskopske zgradbe, mezoskopske žilne arhitekture in makroskopskih funkcionalnih porazdelitev z modeli za določanje slikovnih biomarkerjev. Viri slik [4–6].

[1] J. Stergar in ostali, Biomedical Optics Express 11, 1991–2006 (2020).
[2] T. Tomanič in ostali, Journal of Biophotonics 16, e202200181 (2023).
[3] D. Hoxha in ostali, Cancers 17, 1622 (2025).
[4] J. Stergar in ostali, APS Global Physics Summit (2025).
[5] U. Simončič in ostali, APS Global Physics Summit (2025).
[6] Č. Keber in ostali, APS Global Physics Summit (2025).

PREDAVANJA

Resonančni razpad lažnega vakuuma v dveh dimenzijah na kvantnem žarilniku s 4000 kubiti

Gregor Humar,[1, 2] Jean-Yves Desaules,[3] Luka Pavešić,[4, 5] Marko Ljubotina,[6, 7] Zlatko Papić,[8] Kristel Michielsen,[9, 10] and Jaka Vodeb[1, 11, 12]

1. Odsek za kompleksno snov, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. Institute of Science and Technology Austria (ISTA), Klosterneuburg, Avstrija
4. Department of Physics and Astronomy "G. Galilei", University of Padova, Padova, Italija
5. National Institute for Nuclear Physics (INFN), Section of Padova, Padova, Italija
6. Technical University of Munich, TUM School of Natural Sciences, Physics Department, Garching, Nemčija
7. Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST), München, Nemčija
8. School of Physics and Astronomy, University of Leeds, Leeds, Združeno kraljestvo
9. Jülich Supercomputing Centre, Forschungszentrum Jülich, Jülich, Nemčija
10. Department of Computer Science, University of Cologne, Cologne, Nemčija
11. CENN Nanocenter, Ljubljana, Slovenija
12. Jülich Supercomputing Centre, Institute for Advanced Simulation, Forschungszentrum Jülich, Jülich, Nemčija

Razpad lažnega vakuuma je temeljni pojav v kvantni teoriji polja in statistični mehaniki. Običajno ga opišemo kot dvostopenjski proces, v katerem semiklasični nukleaciji mehurčka pravega vakuuma sledi širjenje. Kompleksnost in omejena eksperimentalna dostopnost otežujeta proučevanje tega pojava, zato ključna vprašanja o nastanku, širjenju in medsebojnem vplivu mehurčkov pravega vakuuma ostajajo odprta [1–3]. Na podlagi raziskav enodimenzionalnih Isingovih verig [4] smo razpad lažnega vakuuma preučili v dvodimenzionalnem kvantnem Isingovem modelu. Odkrili smo nov dinamični režim, v katerem sta nukleacija in rast mehurčkov povezani preko lokalnih resonančnih pogojev [5]. Na programirljivem kvantnem žarilniku z več kot 4000 kubiti smo pripravili metastabilni lažni vakuum, v katerem obrati posameznih spinov na robu mehurčka pravega vakuuma pri resonanci ohranjajo energijo, kar omogoča kinetično omejeno, fraktalu podobno rast. Eksperimente smo dopolnili s simulacijami s tenzorskimi mrežami in modeliranjem s stohastičnimi vezji. Pokazali smo robustno balistično širjenje valovne fronte pravega vakuuma, ki vztraja tudi ob disipaciji in neredi. Širina meje mehurčka pa hkrati narašča subbalistično, kar ustreza univerzalnostnemu razredu Kardar–Parisi–Zhang (KPZ). Rezultati razkrivajo nov, resonančno gnan režim razpada lažnega vakuuma, v katerem prevladuje rast in ki presega običajno ločitev med nukleacijo in širjenjem.

[1] G. Lagnese et al., Phys. Rev. B 104, L201106 (2021).
[2] A. Zenesini et al., Nat. Phys. 20, 558–563 (2024).
[3] A. Milsted et al., PRX Quantum 3, 02031 (2022).
[4] J. Vodeb et al., Nat. Phys. 21, 386–392 (2025).
[5] G. Humar et al., arXiv:2606.25889 (2026).

Od koherentnih magnonov do superdifuzije v kaotičnem kvantnem sistemu

Marko Ljubotina[1,2]

1. Physics Department, Technical University of Munich, TUM School of Natural Sciences, Garching, Nemčija

2. Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST), Monakovo, Nemčija

V generičnih kaotičnih večdelčnih kvantnih sistemih pričakujemo, da se ohranjene količine, kot je energija, pri dolgih časih širijo difuzivno. Kinetične omejitve, ki se naravno pojavijo na primer v kvantnih simulatorjih z Rydbergovimi atomi, lahko to sliko bistveno spremenijo. V našem prejšnjem delu smo pokazali, da je v kinetično omejenem modelu PXP transport energije pri neskončni temperaturi superdifuziven, z dinamičnim eksponentom $z \approx 3/2$, podobnim kot v razredu Kardar-Parisi-Zhang [1]. Mikroskopski izvor tega anomalnega transporta pa ostaja nepojasnjen.

V predavanju na kratko predstavimo transport energije v istem modelu pri končni temperaturi [2]. Pri kratkih časih avtokorelacijsko funkcijo energije določa koherentna dinamika enega samega magnonskega pasu, ki jo lahko opišemo analitično. Ta se s časom popolnoma zaduši in jo nadomesti hidrodinamika, v kateri se efektivni dinamični eksponent približuje vrednosti $z = 3/2$. Čas tega prehoda z nižanjem temperature hitro narašča.

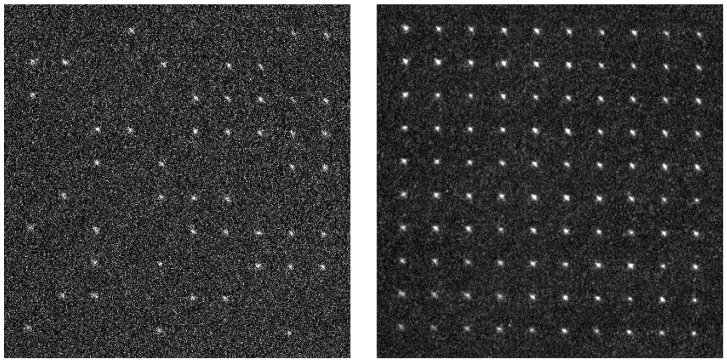
[1] M. Ljubotina, J.-Y. Desaules, M. Serbyn in Z. Papić, Physical Review X **13**, 011033 (2023)
[2] S. Jiang, J.-Y. Desaules, M. Ljubotina in T. Scaffidi, Physical Review B **114**, 084306 (2026)

Posamezni cezijevi atomi v optičnih pincetah: priprava, nedestruktivno slikanje in vzbujanje v Rydbergova stanja

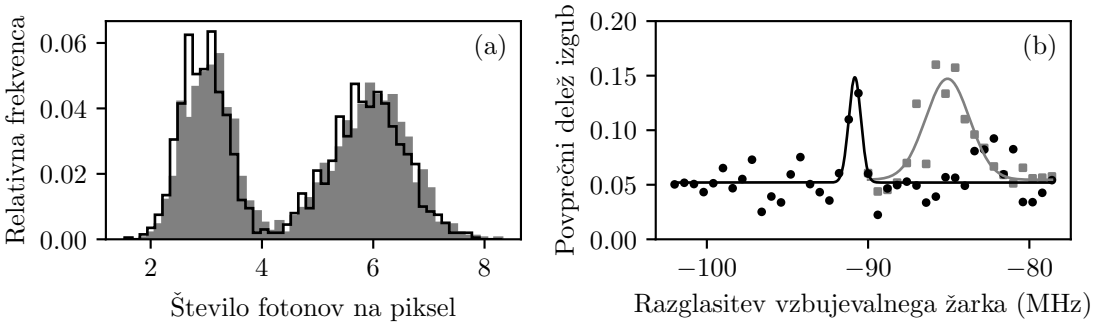
Katja Gosar[1,2], Jure Pirman[1,2], Ema Stopar[1,2], Erik Zupanič[1,3] in Peter Jeglič[1,2]

1. Odsek za fiziko kondenzirane snovi, Institut Jožef Stefan, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana
3. AtomQL, Ljubljana

Optične pincete omogočajo lovljenje posameznih atomov, ki jih lahko uporabimo kot gradnike kvantnih simulatorjev in kvantnih računalnikov. Z vzbujanjem v Rydbergova stanja lahko dosežemo močne interakcije med atomi v ločenih optičnih pasteh na razdaljah več mikrometrov. V prispevku opišemo postopek priprave posameznih atomov z uporabo svetlobno induciranih trkov (angl. light-assisted collisions). Določimo tudi pogoje fluorescenčnega slikanja, ki omogočajo razlikovanje med praznimi in zasedenimi pincetami (slika 1) ob majhni verjetnosti izgube atomov (slika 2a). Nazadnje pokažemo dvofotonsko vzbujanje posameznih atomov v Rydbergova stanja, pri katerem izgubo atomov iz pasti uporabimo za zaznavanje atoma v Rydbergovem stanju (slika 2b). Prikazani postopki so osnova za nadaljnje poskuse z Rydbergovimi atomi v mrežah optičnih pincet.



Slika 1: Primer fluorescenčne slike posameznih atomov (levo) in povprečje 40 slik (desno). Mrežna razdalja je 20 μm.



Slika 2: (a) Histograma zaporednih fluorescenčnih slik mreže optičnih pincet. Vrhova ustrezata praznim pincetam in pincetam z enim atomom. Sivo je prikazan histogram prve slike, s črno linijo pa druge, posnete 50 ms po prvi. Med slikanjem izgubimo 3% atomov. (b) Povprečni delež izgub atomov v odvisnosti od razglasitve vzbujevalnega žarka pri dvofotonskem vzbujanju v Rydbergova stanja. Črno so prikazane meritve z ugasnjenimi optičnimi pastmi med vzbujanjem, sivo pa meritve s prižganimi pastmi. Drugi vzbujevalni žarek ima razglasitev 81 MHz.

Elektrošibki popravki Sudakova v simulacijah z več curki in razpadi resonanc

Lenart Jerala[1,2], Rikkert Frederix[3], Miha Muškinja[1,2], Davide Pagani[4], Timea Vitos[5,6] in Marco Zaro[7]

1. Odsek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. Oddelek za fiziko, Univerza v Lundu, Švedska
4. INFN, Sezione di Bologna, Italija
5. Oddelek za fiziko in astronomijo, Univerza v Uppsali, Švedska
6. Inštitut za teoretično fiziko, Univerza Eötvös Loránd, Budimpešta, Madžarska
7. TIFLab, Univerza v Milanu in INFN, Sezione di Milano, Italija

Trenutno stanje sodobnih simulacij Monte Carlo za splošen proces za trkalnik LHC so izračuni kvantne kromodinamike v naslednjem vodilnem redu (NLO QCD), usklajeni s partonsko prho. Večcurkovno združevanje poveže izračune z različnim številom dodatnih partonov v skupno napoved za dogodke z več curki.

Izračuni elektrošibkih popravkov naslednjega reda so dodobra poznani, vendar njihovo usklajevanje s partonskim pljuskom ni splošno razvito. Vendar niso zanemarljivi – pri visokih energijah lahko ti popravki dosežejo več deset odstotkov. Njihov prevladujoči del pri teh energijah opišejo elektrošibki logaritmi Sudakova (EWSL).

V programu MadGraph5_aMC@NLO obstoječe preuteževanje dogodkov z EWSL [1] razširimo na večcurkovne, združene vzorce in razpade resonanc [2]. Pri vzorcih FxFx [3] popravek izračunamo na prvi konfiguraciji v zgodovini gručenja, pri kateri so absolutne vrednosti kinematičnih invariant nad izbranim pragom. Pri resonancah W, Z in t popravimo spinsko gostotno matriko produkcije in jo kontraktiramo z razpadnimi matrikami [4]. Tako ohranimo spinske korelacije in upoštevamo odvisnost popravka od polarizacije resonanc.

Metodo preverimo pri produkciji bozona Z s curki ter pri produkciji parov W^+W^- z leptonskimi razpadi. Pri $p_{\mathrm{T}}(Z) = 1\,\mathrm{TeV}$ popravek znaša približno $-15\,\%$ in se ujema s celotnim izračunom elektrošibkega popravka naslednjega reda. Odvisnost od praga gručenja je v preizkušenem razponu manjša od odstotka.

[1] D. Pagani, T. Vitos in M. Zaro, European Physical Journal C **84**, 514 (2024).
[2] L. Jerala, R. Frederix, M. Muškinja, D. Pagani, T. Vitos in M. Zaro, arXiv:2610.08950 [hep-ph] (2026).
[3] R. Frederix in S. Frixione, Journal of High Energy Physics **12**, 061 (2012).
[4] V. Durupt, F. Maltoni in O. Mattelaer, Journal of High Energy Physics **04**, 103 (2026).

Od 2D mrež do kvazi-1D verig: inkapsulacija radikalov $C_{59}N$• v [10]CPP in njihova lokalna elektronska struktura

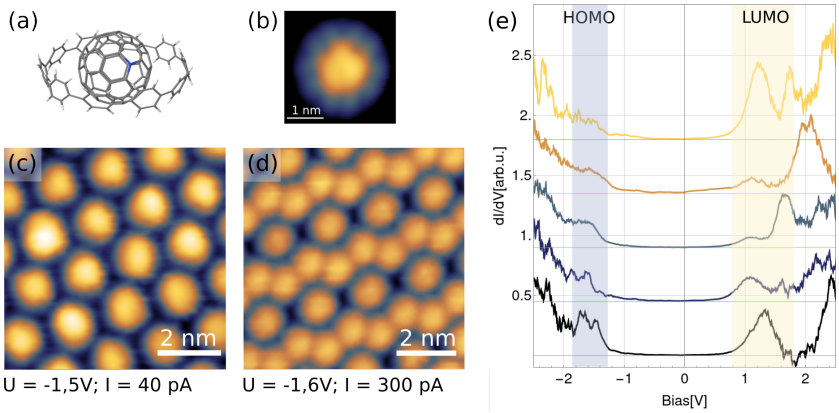
Marion A. van Midden Mavrič[1], Dean Cvetko[2,3], Bastien Anézo[1,4], Gregor Kladnik[2,3], Gregor Bavdek[3,5], Cristopher Ewels[4] in Denis Arčon[1,2]

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. CNR-IOM, Instituto Officina dei Materiali, Basovizza, Trieste, Italija
4. Institut des Matériaux de Nantes Jean Rouxel (IMN), Nantes University, Nantes, France.
5. Pedagoška fakulteta, UL, Ljubljana

Kubiti na osnovi spina prostega elektrona molekulskih radikalov imajo številne prednosti. Sintetizirati je mogoče veliko število popolnoma enakih molekul, s samourejanjem na površinah pa lahko dobimo velike urejene mreže. Eden glavnih izzivov pa je, kako preprečiti, da bi molekule reagirale z okolico, saj so običajno izjemno reaktivne.

V prispevku bomo predstavili raziskave azafulerenskih radikalov $C_{59}N$•, katerih spin zaščitimo z inkapsulacijo v nano-obroče [10]-cikloparafenilena (CPP) [1,2]. S kombinacijo izračunov na osnovi teorije gostotnega funkcionala (angl. density functional theory ali DFT) in vrstične tunelske mikroskopije (VTM) smo raziskali kinetične poti inkapsulacije $C_{59}N$•. Pokazali smo, da lahko s spreminjanjem parametrov naparevanja nadzorujemo samourejanje molekul na površini, kar omogoča, da se isti molekulski radikali urejajo tako v dvodimenzionalne mreže kot kvazienodimenzionalne verige.

Z uporabo nizkotemperaturne vrstične tunelske spektroskopije smo preučevali elektronske lastnosti inkapsuliranih radikalov. Analizirali smo energije in prostorsko porazdelitev signala posameznih molekulskih orbital in opazili vrh, ki ga lahko pripišemo polzasedeni molekulski orbitali. Z uporabo visokoločljivih meritev smo v bližini Fermijeve energije opazili Kondojevo resonanco, ki kaže na prisotnost lokaliziranega spina na inkapsuliranih radikalih.



Slika 1: Shema (a) in slika (b) inkapsuliranega radikala $C_{59}N$• ⊂ [10]-CPP, ki na površini Au(111) tvorijo urejene dvodimenzionalne mreže (c) in kvazienodimenzionalne verige (d). Orientacije $C_{59}N$• vpliva na energijo in oblika vrhov molekulskih orbital izmerjenih z vrstično tunelsko spektroskopijo (e).

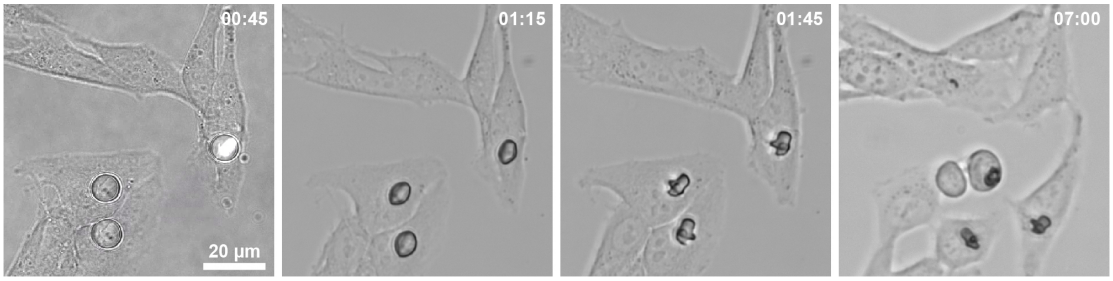
[1] Y. Tanuma, G. Kladnik *et al.*, ACS Nano **17**, 24, (2023).
[2] G. Kladnik, L. Schio, G. Bavdek *et al.*, Nature Communications **16**, 193 (2025).

Znotrajcelično 3D tiskanje z dvo-fotonsko fotolitografijo

Maruša Mur[1], Aljaž Kavčič[1,2], Uroš Jagodič[1], Rok Podlipec[1] in Matjaž Humar[1,2,3]

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. CENN Nanocenter, Ljubljana

3D tiskanje se je uveljavilo kot orodje, ki nam olajša vsakdan, nepogrešljivo pa je postalo tudi na številnih področjih v znanosti. Dvo-fotonska fotolitografija je ena od metod 3D tiskanja, ki omogoča tiskanje na mikrometrski skali s sub-mikrometrsko resolucijo. Uporablja se na številnih področjih, kot so mikrofluidika, mikrooptika in mikrofotonika, pa tudi v bioloških sistemih, predvsem za izgradnjo raznovrstnih ogrodij za rast celic. V zadnjem času so poročali tudi o nekaj primerih tiskanja znotraj živih organizmov, mi pa smo kot prvi to metodo uporabili za 3D tiskanje znotraj posameznih živih celic [1]. V kapljici foto-občutljivega materiala, ki smo jo predhodno injicirali v celico, strukture natisnemo s selektivnim osvetljevanjem s fokusiranim laserskim snopom. Kljub lomu svetlobe na površini kapljice, strukture niso zaznavno deformirane, kar smo potrdili s simulacijo in s SEM slikanjem v kapljicah natisnjenih struktur. Celice z natisnjenimi strukturami ohranijo normalno morfologijo, migrirajo in se delijo, struktura pa preide v eno od hčerinskih celic. Velike strukture podaljšajo čas delitve celic, kar kaže, da lahko natisnjeni objekti spremenijo biologijo celice. Kot primere funkcionalnih struktur smo natisnili 3D črtne kode za sledenje celic, uklonske mrežice za oddaljeno branje ter "*whispering gallery mode*" mikrolaserje. Pristop odpira pot do novih načinov znotrajceličnega zaznavanja in mehanskega vplivanja na celice, še posebej v celicah, ki nimajo fagocitoze in v katere večje strukture po naravni poti ne morejo vstopiti.



Slika: 3D-tiskanje struktur v celicah. Po vbrizganju kapljice foto-občutljivega materiala v celico z osvetljevanjem prek dvo-fotonske polimerizacije ustvarimo strukturo poljubne oblike. Nepolimeriziran material se s časom raztopi, v celici pa ostane toga polimerna struktura.

[1] M. Mur, A. Kavčič, U. Jagodič, R. Podlipec, and M. Humar, "Two-Photon 3D Printing of Functional Microstructures Inside Living Cells." *Advanced Materials* **38**, no. 25 (2026): e19286.

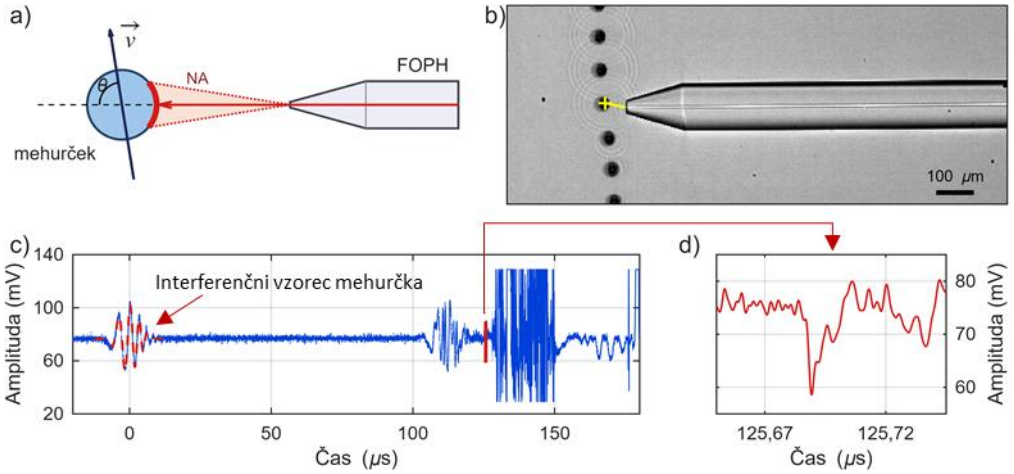
Optična karakterizacija udarnih valov ob kolapsu kavitacijskih mehurčkov

Vid Agrež[1], Jaka Petelin[1], Shubham Sharma[2], Joseph Katz[2], Rok Petkovšek[1]

1. *Fakulteta za strojništvo, UL, Ljubljana*
2. *Department of Mechanical Engineering, Johns Hopkins University, Baltimore, ZDA*

Udarni valovi, ki nastanejo ob kolapsu kavitacijskih mehurčkov, predstavljajo enega od ključnih mehanizmov kavitacijske erozije. Zaradi relativno majhnih dimenzij kavitacijskih mehurčkov in majhnega dosega udarnih valov, ki se v tekočini hitro širijo, je njihovo merjenje precej zahtevno. V ta namen smo uporabili posebej izdelan hidrofon z zelo majhnim detekcijskim območjem (pod 10 μm) in zelo širokim dinamičnim območjem. Hidrofon je osnovan na optičnih vlaknih (FOPH). Ima odzivni čas reda 100 ps [1,2]. Poleg neposrednega merjenja udarnih valov s hidrofonom smo uporabili tudi posebno tehniko ultrahitrega snemanja s senčno fotografijo z večkratno osvetlitvijo posameznih slik, kar omogoča opazovanje tako razvoja kavitacijskih mehurčkov kot širjenja udarnih valov.

Kolaps mehurčkov smo vzbudili s fokusiranim ultrazvokom. Mehurčki so vsebovali različne pline (enoatomne in dvoatomne). Uporabili pa smo tudi kapljevine z različno vsebnostjo raztopljenega plina. Na razdaljah nekaj 10 μm od središča kolapsa se udarni val, izmerjen s hidrofonom, manifestira kot tlačni skok s trajanjem 10–20 ns in dvižnim časom pod 1 ns (Slika 1d). Amplituda tlaka je povezana z vsebnostjo plina in tlakom okoliške tekočine. Odziv hidrofona omogoča tudi natančno določitev lege mehurčkov: iz interference svetlobe, ki izhaja iz hidrofona (Slika 1c), določimo smer, hitrost in globinsko lego mehurčka. S senčno fotografijo določimo še mesto kolapsa, tj. izvor udarnih valov, kar omogoča njihovo primerjavo pri različnih pogojih.



Slika 1: Zaznava mehurčka in udarnega vala s FOPH (Ar v cikloheksanu). (a) Mehurček prečka sprejemni stožec vlakna pod kotom θ s hitrostjo v. (b) Posnetek ob kolapsu. (c) Signal z interferenčnim vzorcem mehurčkov, prilagojenim modelom (črtkano) in prihodom udarnega vala (d).

[1] Petelin, J., Lokar, Ž., Horvat, D. & Petkovšek, R. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control **69**, 369–376 (2022).

[2] Lokar, Ž., Petelin, J., Horvat, D., Agrež, V. & Petkovšek, R. Exp. Therm. Fluid Sci. **172**, 111655 (2026).

Nov ionski pospeševalnik na IJS

Primož Pelicon[1], Primož Vavpetič[1], Mitja Kelemen[1], Žiga Brenčič[1], Mirko Ribič[1], Matevž Skobe[1]

1. *Odsek za fiziko nizkih in srednjih energij, IJS, Ljubljana*

Konec leta 2025 smo pričeli z instalacijo in marca 2026 uradno otvorili nov ionski pospeševalnik na Institutu Jožef Stefan (IJS). Pospeševalnik je tandemskega tipa z maksimalno pospeševalno napetostjo 3 MV in omogoča pospeševanje skoraj vseh atomarnih ionov iz periodnega sistema elementov. Oblikovanje ionskih žarkov pričnemo s tvorbo nizkoenergijskih negativnih ionskih žarkov v enem izmed treh ionskih izvorov. Tvorbo protonskih žarkov pričnemo z oblikovanjem zelo intenzivnega in svetlega žarka negativnih vodikovih ionov v izvoru s plazemskim vedrom. Ionske žarke težjih elementov, kot so npr. ^{15}N, P, ^{28}Si, ^{35}Cl, Fe, W, oblikujemo v odprševalnem izvoru, kjer s cezijevimi ioni odstreljujemo izbrani material v trdnem agregatnem stanju in iz bogate mešanice negativno nabitih odpršenih ionov z magnetnim selektorjem izberemo iskano vrsto negativnih ionov. Ionski žarek ^{3}He za potrebe raziskav na področju fuzije oblikujemo v plazemskem izvoru tipa duoplazmatron.

Predstavil bom nekaj rezultatov raziskav z ionskimi žarki, ki smo jih izvedli v preteklih letih na starem pospeševalniku, kot tudi prve rezultate raziskav na novem pospeševalniku. Med te sodijo raziskave z ionskimi spektroskopijami na področjih biologije, medicine in fuzije. Zadnje nadgradnje instrumentacije omogočajo ionsko implantacijo (skoraj) poljubne vrste ionov. Pokazal bom rezultate implantacije ionov ^{15}N v diamant, s katero tvorimo gosto polje kvantnih centrov dušik-vrzel (NV) za izdelavo senzorja magnetnega polja. Da bi ionsko implantacijo lahko izvajali tako pri energijah v območju MeV, kjer ione potisnemo v substrat do globin več mikrometrov, kot tudi pri energijah nekaj 10 keV, kjer ione potisnemo v substrat do globin nekaj deset nanometrov, smo predelali sklop ionskih izvorov in zgradili namensko žarkovno linijo za delo z nizkoenergijskimi ionskimi žarki.

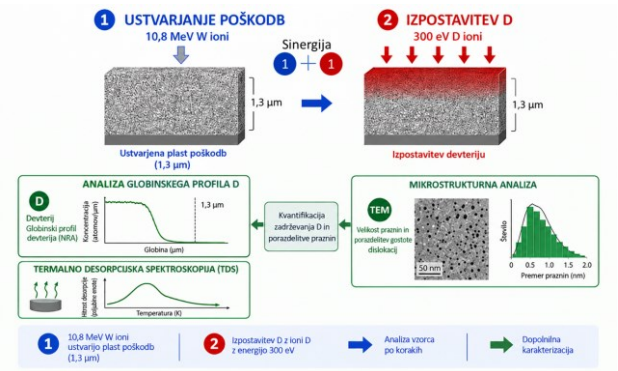
Raziskave poškodb ter zadrževanja vodikovih izotopov v materialih za fuzijske namene

Sabina Markelj

Odsek za fiziko nizkih in srednjih energij, IJS, Ljubljana

V prihodnjih termonuklearnih fuzijskih napravah, kot je DEMO, bodo v materialih na prvi steni zaradi 14 MeV fuzijskih nevtronov, nastalih pri D–T fuzijski reakciji, nastajale poškodbe kristalne mreže. Hkrati bodo materiali pri visokih temperaturah izpostavljeni visokim fluksom ionov vodikovih izotopov (HI). Številne raziskave v zadnjih dveh desetletjih so pokazale, da na zadrževanje in transport vodikovih izotopov pomembno vpliva njihovo ujetje na poškodbah, nastalih zaradi obsevanja [1]. Zaradi varnostnih omejitev, povezanih z radioaktivnim tritijem, je za zanesljive napovedi zadrževanja in transporta goriva v prihodnjih fuzijskih napravah nujno upoštevati sinergijski vpliv nastajanja poškodb kristalne mreže in prisotnosti vodikovih izotopov v materialih.

Zaradi svojih ugodnih lastnosti je volfram (W) glavni kandidat za material, ki bo v prihodnosti izpostavljen plazmi v fuzijskih reaktorjih. Vendar pa bo v prihodnjem jedrskem okolju kristalna mreža W močno spremenjena zaradi poškodb zaradi 14 MeV nevtronov, kar bo vplivalo na fizikalne lastnosti materiala ter ujemanje goriva v stenah reaktorja. V tej predstavitvi bom pokazala kako lahko z raziskavami na ionskem pospeševalniku na Mikroanalitskem centru na Institutu Jožef Stefan prispevamo pri raziskavah v fuziji. Tako na eni strani simuliramo učinke obsevanja 14 MeV nevtronov tako da obstreljujemo vzorce z MeV ioni W pri različnih dozah ter temperaturah. Vzorce nato izpostavimo ionom devterija ter jih analiziramo z ionsko metodo s pomočjo jedrske reakcije (NRA) in tako preučujemo zadrževanje vodikovih izotopov v poškodovanem volframu ter razvoj napak (Slika 1). Pokazala bom nekaj primerov raziskav [2,3], kjer smo spreminjali pogoje obstreljevanja z W ioni ter preučevali kako se spreminja zadrževanje devterija ter posledično tudi gostota poškodb.



Slika 1: Shematska slika preučevanja poškodb ter zadrževanja v vzorcih za fuzijske raziskave

Da bi se približali pogojem v fuzijskem reaktorju smo prvi izvedli tudi sočasno obstreljevanje z MeV W ioni in z nizkoenergijskim ioni D pri temperaturah med 450 in 1100 K, kjer smo opazili sinergijski učinek, ki se kaže v povečanem zadrževanju D [2].

[1] A. P. Persianova, & A. V. Golubeva, A Review. Phys. Metals Metallogr. 125, 278–306 (2024).
[2] S. Markelj, et al., Nucl. Fusion 59, 086050 (2019); M. Pečovnik et al. Nucl. Fusion 60 (2020) 036024.
[3] S. Markelj et al. Acta Materialia 263 (2024) 119499; S. Markelj, et al. Nucl. Mater. Energ. 39, 101630 (2024); J. Zavašnik et al. Materials Characterization 224 (2025) 115050.

PLAKATI

Od molekularne strukture do makroskopskih lastnosti terapevtskih proteinov

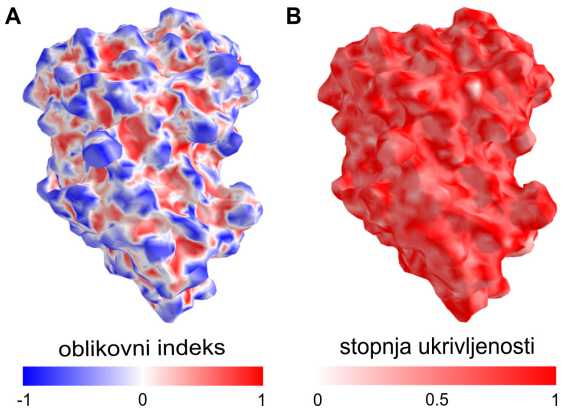
Lara Erzin[1,2], Benjamin Knez[1,2], Jure Cerar[2] in Miha Ravnik[1,3]

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
2. Razvoj bioloških učinkovin, Novartis d.o.o., Mengeš
3. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

Povezava mikroskopske strukture proteinov z njihovimi makroskopskimi lastnostmi ostaja velik izziv v biofiziki. Struktura proteinov, površinske lastnosti in konformacijska dinamika so odgovorne za medmolekulske interakcije in lokalno kemijsko reaktivnost, kar posledično vpliva na agregacijo, viskoznost raztopine, fragmentacijo in afiniteto vezave. Razumevanje in napovedovanje teh lastnosti sta ključna za hiter in uspešen razvoj novih bioloških zdravil.

V tem prispevku bom predstavila računalniške metode, ki združujejo eksperimentalne ali napovedane tridimenzionalne strukture s simulacijami molekularne dinamike za zajem proteinskih konformacijskih ansamblov. Na podlagi teh struktur nato uvedem deskriptorje, ki opisujejo površino dostopno topilu, hidrofobnost, elektrostatiko, lokalno ukrivljenost površine in fleksibilnost, ter jih povežem z eksperimentalno izmerjenimi lastnostmi. S kombinacijo lokalne površinske ukrivljenosti in hidrofobnosti smo razvili model, ki napoveduje stopnjo agregacije monoklonskih protiteles s korelacijo r = 0,91 na naboru 20 molekul [1]. Sorodna analiza je povezala interakcijski potencial hidrofobnih in elektrostatičnih površinskih regij z viskoznostjo koncentriranih proteinskih raztopin, razlikovala protitelesa z nizko in visoko viskoznostjo ter poudarila pomen njihove prostorske organizacije [2]. Analiza podkožne biološke razpoložljivosti pa je razkrila omejitve napovedovanja kompleksnega biološkega vedenja zgolj na podlagi lastnosti površine proteinov, kar kaže, da pomembni dejavniki ostajajo nerešeni.

Opisano delo je prispevek k vzpostavljanju napredne metodologije za napovedovanje različnih lastnosti biofarmacevtskih proteinskih sistemov.



Slika 1: Površina Fv segmenta protitelesa pobarvana glede na vrednost oblikovnega indeksa **(A)** in stopnje ukrivljenosti **(B)**.

[1] Knez, B., Erzin, L., Kos, Ž. et al. Sci Rep 15, 28266 (2025).
[2] Knez, B., Ravnik, M., & Zidar, M. mAbs, 18(1) (2026).

Adsorpcija surfaktantov na površini: atomistični pristop na osnovi proste energije

Vid Pograjc[1,2] in Matej Kanduč[1]

1. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Surfaktanti so amfifilne molekule, ki se spontano adsorbirajo in uredijo na vodnih površinah. Prisotni so v številnih tehnoloških in bioloških procesih: delujejo kot detergenti, omogočajo nastanek emulzij, služijo kot prenašalci zdravilnih učinkovin in stabilizirajo pene. Njihove lastnosti določa ravnovesje med hidrofilnimi in hidrofobnimi interakcijami, od katerih je odvisna tudi hitrost izmenjave molekul med površino in raztopino [1]. Čas izmenjave narašča eksponentno z dolžino alkilne verige: z vsako skupino CH_2 se poveča za faktor 2–3, zato se odvisno od strukture surfaktanta lahko razlikuje za več velikostnih razredov [2].

Kratkoverižni surfaktanti (≤C7) se izmenjujejo v nanosekundni časovni skali, zato je adsorpcijsko ravnovesje mogoče neposredno spremljati z atomističnimi simulacijami molekulske dinamike. Izmenjevalni čas pri industrijsko najpogostejših srednjeverižnih surfaktantih (C7–C16) je od mikrosekund do sekund, kar presega zmožnosti atomističnih simulacij, zato adsorpcijskega ravnovesja ne moremo neposredno določiti [3].

Da bi to omejitev obšli, namesto neposrednih simulacij uporabimo molekularno termodinamsko teorijo (MTT), pri kateri predpostavimo enakost kemijskih potencialov v soobstoječih fazah. Kot vhodni podatek uporabimo prosto energijo, potrebno za premik molekule surfaktanta s površine v vodno fazo, ki jo izračunamo z metodami za izračun proste energije, npr. z umbrella sampling. Na tej podlagi lahko določimo koncentracijo surfaktanta v raztopini ter izračunamo adsorpcijsko izotermo in izotermo površinskega tlaka [3]. Pristop smo preverili na preprostem surfaktantu heksanolu (C6), pri katerem so neposredne ravnovesne simulacije še mogoče, kar omogoča validacijo MTT.

[1] M. J. Rosen in J. T. Kunjappu, Surfactants and Interfacial Phenomena, Wiley, **1**. izd. (2012)
[2] F. Staniscia in M. Kanduč, Journal of Colloid and Interface Science **698**, 137928 (2025)
[3] M. Kanduč, C. Stubenrauch, R. Miller in E. Schneck, Journal of Chemical Theory and Computation **20**, 1568 (2025)

Večkanalna fluorescenčna mikroskopija s časovno-spektralno dekompozicijo in korekcijo saturacije detektorja

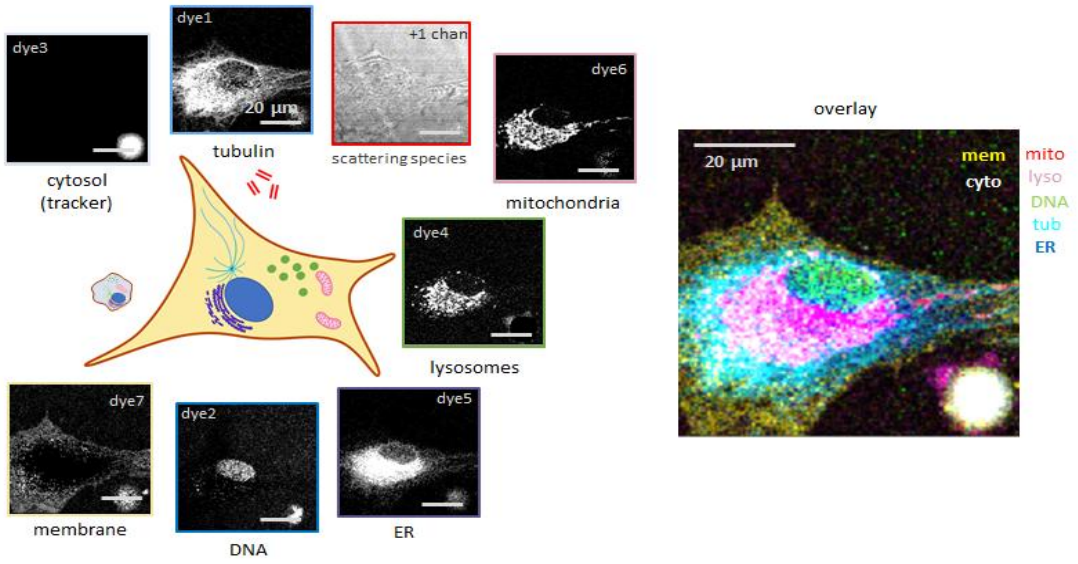
Ervin Mustafić[1], Hana Kokot[1], Boštjan Kokot[1], Eva Cerkvenik[1], Tomazs Kołodziej[2], Janez Štrancar[1,2], Iztok Urbančič[1]

1. Odsek za fiziko trdne snovi, Laboratorij za biofiziko, IJS, Ljubljana
2. Infinite d.o.o., Maribor

Pri klasični večkanalni fluorescenčni mikroskopiji lahko z izbiro spektralno ločenih fluoroforov in detekcijskih kanalov običajno razločimo tri fluorofore. Za sočasno spremljanje večjega števila fluoroforov lahko izkoristimo tudi razlike v njihovih življenjskih časih, prekrivajoče se signale pa ločimo s spektralno dekompozicijo na podlagi mešalne matrike. [1]

Pri visokih intenzitetah mrtvi čas detektorja povzroči saturacijo signala in s tem nelinearno spremeni razmerja med detekcijskimi kanali. Korekcija mrtvega časa detektorja popravi pričakovano vrednost signala, ne pa njegove statistične porazdelitve, saj poveča šum. Ker dekompozicijski algoritem Richardson-Lucy predpostavlja Poissonovo porazdelitev detekcije fotonov [2], ki zdaj ne velja več, smo razvili dekompozicijski algoritem, ki temelji na negativni binomski porazdelitvi detekcije fotonov. Presežno varianco zaradi odziva detektorja smo mehanistično povezali z mrtvim časom detektorja in časom zajema ter tako vzpostavili neposredno povezavo med teoretično napovedjo detekcije fotonov in eksperimentom ter oba pristopa primerjali v simulacijah.

S pristopom smo na posnetkih živih celic razločili sedem fluorescentno označenih struktur (Slika 1). Upoštevanje odziva detektorja omogoča bolj realističen opis statistike detektiranih fotonov in s tem predstavlja korak k zanesljivejši kvantitativni analizi fluorescenčnih posnetkov.



Slika 1: Prikaz sedmih fluorescentno označenih celičnih struktur na primeru žive celice po spektralni dekompoziciji. Merilo: 20 µm.

[1] T. Zimmermann in sod., Methods in Molecular Biology **1075**, 129-148 (2014).
[2] A. Kumar in sod., Nature Photonics **19**, 1146-1156 (2025).

Vpogled v dinamiko pretrganja ultra tankih sufraktantnih filmov

Katarina Kokalj[1,2] in Matej Kanduč[1]

1. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Ultra tanki surfaktantni filmi so ključni za stabilnost pen, emulzij in sorodnih mehkih medfaznih sistemov, vendar molekularni mehanizmi, ki določajo njihovo nestabilnost in pretrganje, še niso povsem razumljeni [1–3]. Pretrganje filma se običajno začne z nastankom pore kot posledica termičnih fluktuacij in se nato razširi, ko le-ta preseže kritično velikost, kar je skladno s klasično teorijo nukleacije [1,4]. V tej raziskavi smo s simulacijami molekulske dinamike preučili nukleacijo pore in pretrganje filmov v dveh reprezentativnih sistemih z različnima vrstama surfaktantov: n-dodecil-β-D-maltozida (filmi na osnovi maltozidnega surfaktanta) in heksaetilenglikol monododecil etra (filmi na osnovi PEG-surfaktanta).

Očitne razlike se pokažejo že na ravni površinske dinamike. Filmi na osnovi maltozidnega surfaktanta tvorijo razmeroma toge surfaktantne monosloje, v katerih je gibljivost surfaktantov majhna. Nasprotno pa so filmi na osnovi PEG surfaktanta izrazito bolj dinamični, vključno z večjo lateralno gibljivostjo in pogostimi prehodi molekul med obema surfaktantnima monoslojema (angl. flip-flop events).

Te razlike v dinamiki vodijo do zelo različnih mehanizmov pretrganja. Filmi na osnovi PEG-surfaktanta se pretrgajo z rastjo okrogle pore, pri čemer proces poteka v časovnem merilu nekaj nanosekund. Nasprotno so filmi na osnovi maltozidnega surfaktanta odpornejši na pretrganje in odpovejo z nastankom podolgovate pore, podobne razpoki, kar privede do popolnega pretrganja filma v časovnem merilu nekaj pikosekund.

Ugotovili smo, da je mehanizem pretrganja v veliki meri neodvisen od prisotnosti vmesne vodne plasti, kar kaže, da na stabilnost filma močneje vplivajo medfazne lastnosti, zlasti pakiranje surfaktantov in linijska napetost, kot pa sami prispevki topila. Razlike v nagnjenosti k pretrganju med posameznimi sistemi je mogoče povezati z razlikami v linijski napetosti in obsegu mreže vodikovih vezi znotraj surfaktantnih monoslojev.

Rezultati omogočajo molekularni vpogled v nestabilnost surfaktantnih filmov ter izpostavljajo ključne parametre, ki določajo pretrganje v mehkih medfaznih sistemih.

[1] R. Pugh, Advances in Colloid and Interface Science, **64**, 67–142 (1996).
[2] L. Chiappisi, Current Opinion in Colloid & Interface Science, **72**, 101823 (2024).
[3] J. Lamolinairie, B. Dollet, J.-L. Bridot, P. Bauduin, O. Diat, L. Chiappisi, Soft Matter, **18**, 8733-8747 (2022).
[4] D. Langevin, Advances in Colloid and Interface Science, **275**, 102075 (2020).

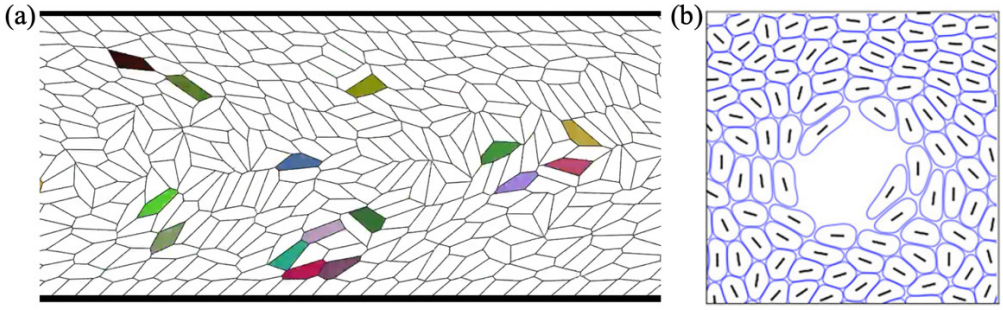
Tkiva kot aktivna snov

Jan Rozman[1,2], Chaithanya K. V. S.[3], Diogo E. P. Pinto[4], Toshikaze Chiba[1], Matej Krajnc[1], Julia M. Yeomans[5], Rastko Sknepnek[6,7]

1. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. Department of Chemical Engineering, IIT Indore, Indore, Indija
4. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lizbona, Portugalska
5. Rudolf Peierls Centre for Theoretical Physics, University of Oxford, Oxford, Združeno kraljestvo
6. Faculty of Life Sciences, University of Dundee, Dundee, Združeno kraljestvo
7. Faculty of Science, Engineering and Business, University of Dundee, Dundee, Združeno kraljestvo

Kolektivno gibanje celic v epitelijskih tkivih lahko opišemo s pomočjo teorije aktivne snovi. Nekateri epiteliji na primer spominjajo na aktivne nematike. Tu s pomočjo formalizma ogliščnih modelov [1], razširjenega z nematsko aktivnostjo [2], najprej raziščemo vlogo nematske aktivnosti pri urejanju mešanic različnih celic [3]. S tem modelom nato pokažemo tudi, da ima viskoznost lahko ključno vlogo pri koordiniranem gibanju celic (slika 1a) [4]. Nato z viskoznostjo razširimo tudi bolj podroben opis tkiva, ki ga omogoča model večfaznega polja. Ugotovimo, da je viskoznost lahko pomembna tudi pri spontanem nastanku odprtin v aktivnem tkivu (slika 1b) [5].

V zgoraj predstavljenih primerih smo uporabili dvodimenzionalne opise tkiva, kar je pogost teoretičen pristop. Naposled se posvetimo vlogi tretje dimenzije in pokažemo, da ima lahko tudi v enoslojnem tkivu pomemben vpliv na obnašanje sistema [6].



Slika 1: (a) Tok aktivnih celic v kanalu [4]. (b) Spontana odprtina v modelu večfaznega polja [5].

[1] R. Farhadifar, J.-C. Röper, B. Aigouy, S. Eaton in F. Jülicher, Curr. Biol. **17**, 2095 (2007)
[2] S.-Z. Lin, M. Merkel in J.-F. Rupprecht, Phys. Rev. Lett. **130**, 058202 (2023)
[3] J. Rozman in J. M. Yeomans, Phys. Rev. Lett. **133,** 248401 (2024)
[4] J. Rozman, Chaithanya K. V. S., J. M. Yeomans in R. Sknepnek, Nat. Commun. **16**, 530 (2025)
[5] D. E. P. Pinto, J. Rozman in J. M. Yeomans, Nat. Commun. **17**, 8288 (2026)
[6] T. Chiba, J. Rozman in M. Krajnc, arXiv:2610.20030 (2026)

LIQUID DROPS MEET STAR POLYMERS IN TWO-DIMENSIONAL CONFINEMENT

Fran Ivan Vrban[1], Reyhaneh A. Farimani[2], Christos N. Likos[2] and Primož Ziherl[1,3]

[1] *Faculty of Mathematics and Physics, University of Ljubljana*

[2] *Faculty of Physics, University of Vienna*

[3] *Jožef Stefan Institute, Ljubljana*

Soft colloidal and nanocolloidal particles are commonly described either by discrete bead–spring models, which resolve microscopic architecture, or by continuum free-energy theories, which provide compact mechanical descriptions but lack an immediate microscopic foundation [1]. Here we show that the geometry of soft-particle aggregates can bridge these two representations. Using monomer-resolved simulations, we study clusters of quasi-twodimensional star polymers under varying solvent quality and map their shapes onto those predicted by a two-dimensional liquid-drop model [2]. This mapping relates the microscopic solvent-quality parameter to the effective tension ratio controlling adhesion in the continuum description. Across cluster sizes and functionalities, we find an approximately linear relation between these two parameters. We further extract the reduced Egelstaff–Widom length and identify a solvent-quality-dependent cross-over in the effective compressibility of the stars. By analyzing the internal monomer density, we find that this mechanical cross-over is associated with a structural rearrangement within individual confined stars. These results show that geometry-based coarse-graining can connect microscopic simulations to continuum elastic parameters while exposing structural changes that are not directly apparent at the monomer level.

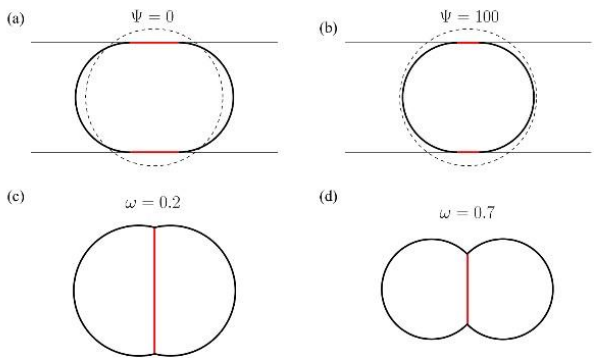


Figure 1: 2D liquid-drop model**.**

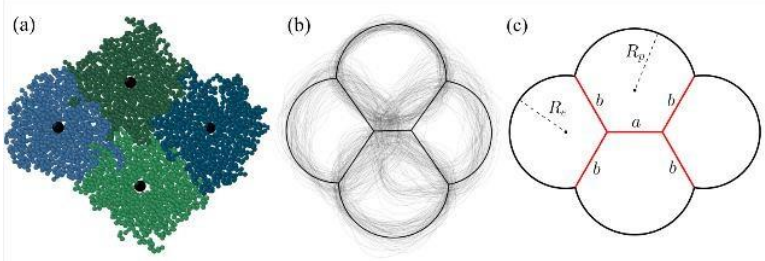


Figure 2: Simulation and geometry of a seven-particle cluster.

REFERENCES

[1] R.A. Farimani and C.N. Likos, Macromolecules **[58]**, [11827–11840] ([2025])

[2] F.I. Vrban, A. Šiber, P. Ziherl, Physical Review Letters **[137]**, [178202] ([2026])

Strižni tok kot vir magnetnega polja v izotropnih suspenzijah magnetnih nanoploščic

Jaka Godec[1], Jošt Ručl[2], Darja Lisjak[2], Alenka Mertelj[3], Vojko Jazbinšek[4] in Natan Osterman[1,3]

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
2. Odsek za sintezo materialov (K8), IJS, Ljubljana
3. Odsek za kompleksno snov (F7), IJS, Ljubljana
4. Inštitut za matematiko, fiziko in mehaniko, Ljubljana

Za ferofluide, ki vsebujejo anizotropne magnetne delce, je značilna kompleksna sklopitev med tokom tekočine in magnetnim odzivom. V tej raziskavi smo preučevali suspenzije nanoploščic barijevega heksaferita (BaHF), ki imajo močne magnetne dipolne momente v kombinaciji z anizotropno obliko [1]. Analizirali smo njihovo obnašanje v strižnem toku, kjer pride do ureditve anizotropnih delcev [2]. Pokazali smo, da lahko z optično črpanim magnetometrom izmerimo magnetno polje, ki nastane zaradi kolektivnega urejanja dipolov. Ureditev, ki jo povzroča strižna sila, torej povzroči merljiv makroskopski magnetni signal, kar je skladno s pojavom magnetizacije v suspenziji.



Slika 1: Ureditev nanoploščic v strižnem toku povzroči makroskopsko magnetizacijo suspenzije.

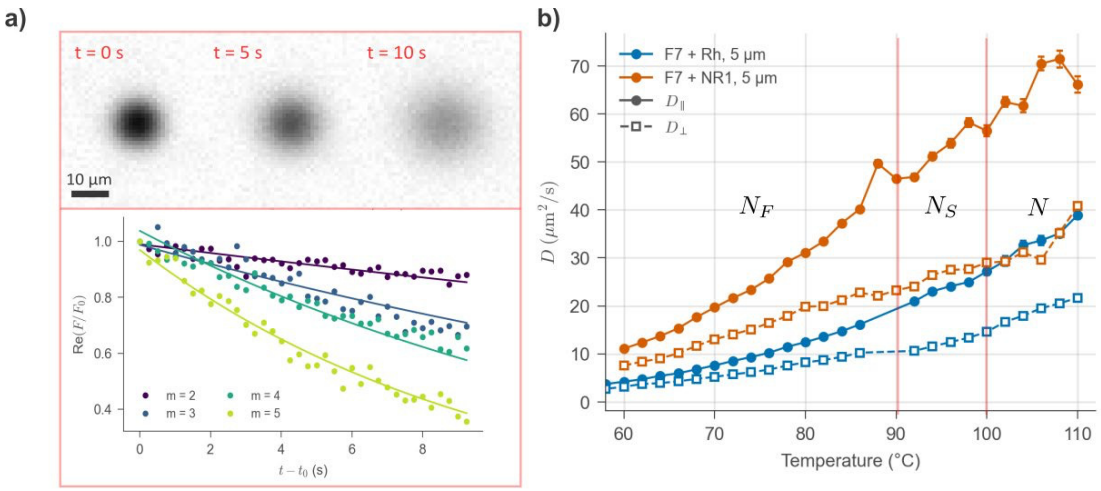
[1] P. Hribar Boštjančič, M. Tomšič, A. Jamnik, D. Lisjak, in A. Mertelj, J. Phys. Chem. C **123**, 23272 (2019).
[2] M. P. Lettinga, P. Holmqvist, P. Ballesta, S. Rogers, D. Kleshchanok, in B. Struth, Phys. Rev. Lett. **109**, 246001 (2012).

Anizotropna difuzija ionov v feroelektričnih nematskih tekočinah

Anej Sterle[1, 2], Peter Medle Rupnik[1, 2], Natan Osterman[1, 2], Calum J. Gibb[3], Jordan Hobbs[4], Richard J. Mandle[3, 4], Nerea Sebastián[1] in Alenka Mertelj[1]

1. Institut "Jožef Stefan" (IJS), Slovenija
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Slovenija
3. School of Chemistry, University of Leeds, Združeno kraljestvo
4. School of Physics and Astronomy, University of Leeds, Združeno kraljestvo

Posebnost feroelektričnih nematskih tekočin je, da imajo tekočo fazo z veliko spontano električno polarizacijo vzdolž direktorja [1]. Pri nastanku struktur v teh materialih imajo pomembno vlogo elektrostatske interakcije in notranja lokalna električna polja. Lokalna električna polja lahko preučujemo z uporabo ionskih fluoroforov in fluorescenčne mikroskopije [2]. Za to je potrebno razumevanje osnovnih transportnih pojavov, kot sta difuzija in elektroforetska mobilnost ionov. V tem delu za njihovo preučevanje uporabimo metodo FRAP (angl. *fluorescence recovery after bleaching*), pri kateri z močnim laserskim žarkom močno zmanjšamo fluorescenco na majhem območju in nato opazujemo, kako se fluorescentni signal zaradi difuzije molekul spreminja (slika 1a) [3]. V tem delu smo izmerili temperaturno odvisnost difuzijskih konstant v feroelektričnih nematskih tekočinah vzdolž ($D_\parallel$) in pravokotno ($D_\perp$) na direktor (slika 1b). Difuzijske konstante lahko izluščimo iz časovnega poteka prostorsko odvisne intenzitete fluorescence s pomočjo Fourierove dekompozicije (slika 1a). Ugotovili smo, da je difuzija fluorescentnih ionov počasnejša od difuzije neionskih fluoroforov primerljive velikosti. Metoda omogoča preprost in neinvaziven način za preučevanje anizotropnega transporta v polarnih tekočinah.



Slika 1 : **a)** Slike pridobljene s fluorescenčno mikroskopijo in pripadajoče Fourierove komponente. **b)** Temperaturna odvisnost difuzijskih konstant ionskega (Rh) in neionskega (NR1) fluorofora v materialu F7 s feroelektrično (N_F), antiferoelektrično (N_S) in paraelektrično (N) nematsko fazo .

[1] N. Sebastián, M. Čopič in A. Mertelj, Physical Review E **106**, 021001 (2022)
[2] A. Sterle *et al.*, arXiv:2608.02209 (2026)
[3] E. A. J. Reits in J. J. Neefjes, Nature Cell Biology **3**, E145 (2001)

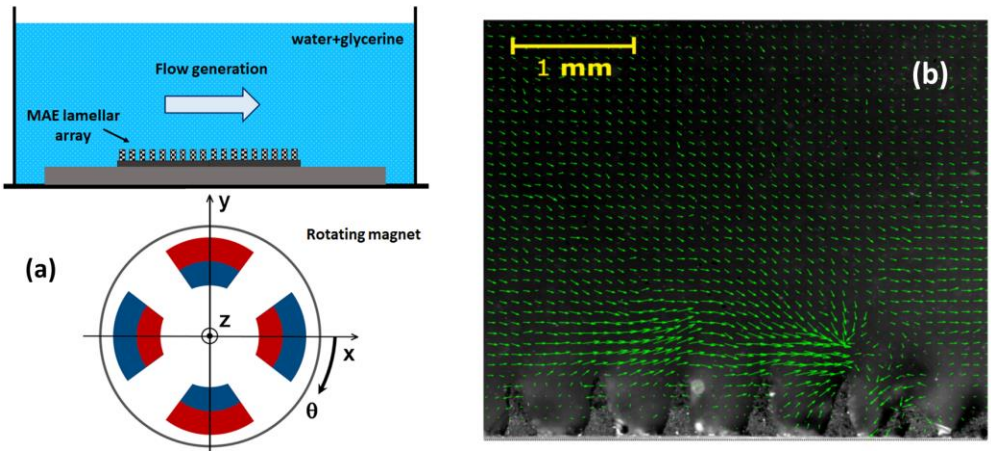
Generacija toka tekočin z magnetoaktivnimi mikrostrukturami

V. Ilijaš[1], I. Straus[1], A. Geldof[1], R. Kriegl[2], G. Kravanja[3], L. Hribar[3], M. Jezeršek[3], M. Shamonin[2], G. Kokot[1], and I. Drevenšek-Olenik[1,4]

1 *University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, Jadranska 19, SI-1000, Ljubljana, Slovenia*
2 *East Bavarian Centre for Intelligent Materials (EBACIM), Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Regensburg, Seybothstr. 2, 93053 Regensburg, Germany*
3 *University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Aškerčeva 6, SI-1000, Ljubljana, Slovenia*
4 *Department of Complex Matter, J. Stefan Institute, Jamova 39, SI-1000, Ljubljana, Slovenia*

Proučevali smo hitrostno polje **v**(**r**), ki ga v mešanici vode in glicerina ustvarja mikrolamelarna struktura iz magnetoaktivnega elastomera (MAE), izdelana z metodo laserskega mikrostrukturiranja [1]. Tekočina, ki se je nahajala v posodi, precej večji od dimenzij lamel, je vsebovala delce titanovega dioksida, ki odbijajo svetlobo in so služili za vizualizacijo toka. Lamele smo poganjali z vrtečim se magnetnim poljem kvadrupolnega trajnega magneta (slika 1a). Zaradi izrazite asimetrije z magnetnim poljem induciranega upogibnega gibanja lamel, se hitrostno polje med fazo efektivnega zamaha (slika 1b) bistveno razlikuje od tistega med fazo povratnega zamaha, kar povzroči neto pretok tekočine.

Največja hitrost ustvarjenega pretoka je dosegla vrednost približno 20 ml/min. Preučili smo tudi odvisnost pretoka od mešalnega razmerja med vodo in glicerinom ter ugotovili, da se smer pretoka obrne pri viskoznosti približno 3,5 mPa·s. Naši rezultati kažejo, da lahko mikrolamelarne strukture iz MAE učinkovito in brezkontaktno pretvorijo rotacijsko gibanje trajnega magneta v usmerjen transport tekočine, kar nakazuje njihov potencial za uporabo kot magnetno gnane mikročrpalke.



Slika 1: (a) Shematski prikaz postavitve eksperimenta. (b) Profil v(r) med fazo efektivnega zamaha.

[1] G. Kravanja et al., Advanced materials Technologies **7**, 2101045 (2022)

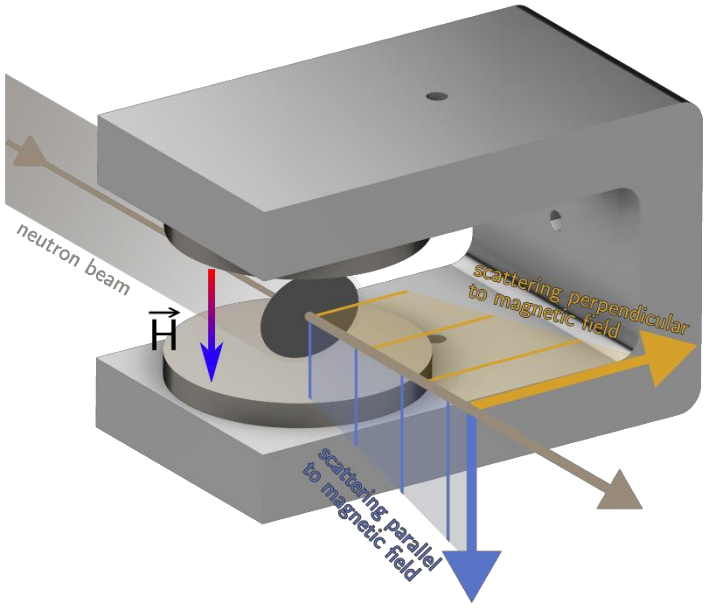
Preučevanje preurejanja mikrodelcev v magnetoaktivnih elastomerih z nevtronskim sipanjem

Izidor Straus[1]*, Arne Geldof[1], Hartmut Lemmel[2], Gašper Kokot[1], Jürgen Klepp[3,4], Raphael Kriegl[5], Mikhail Shamonin[5], Irena Drevenšek-Olenik[1,6]

1. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Ljubljana, Slovenija, 2. Institut Laue-Langevin (ILL), Grenoble, Francija, 3. Fakulteta za fiziko, Univerza na Dunaju, Dunaj, Avstrija, 4. Atominstitut, TU Wien, Dunaj, Avstrija, 5. East Bavarian Centre for Intelligent Materials (EBACIM), Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Regensburg, Regensburg, Nemčija, 6. Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija

Magnetoaktivni elastomeri (MAE), ki smo jih preučevali, so kompoziti mikrodelcev karbonilnega železa (CIP), vgrajenih v polidimetilsiloksan (PDMS) polimer. Ob izpostavitvi magnetnemu polju se njihove mehanske in površinske lastnosti izrazito spremenijo [1]. Z nevtronskim sipanjem pri ultramajhnih kotih (USANS) smo »in situ« preučevali prerazporeditev delcev v elastomerni matrici.

Preučevali smo 200 µm debele vzorce s 30- in 75-odstotnim masnim deležem CIP. Merilna postaja S18 inštituta ILL omogoča meritev strukturnih korelacij na dolžinskih skalah od 0,2 do 30 µm.



Z večnivojsko Guinier–Porodovo analizo sipalnega signala smo razločili hierarhične strukture in ugotovili, da so njihove značilne dolžinske skale močno odvisne od koncentracije delcev. Pri interpretaciji je treba upoštevati polidisperznost velikosti delcev, meddelčne interakcije in prispevek magnetnega sipanja. V homogenem magnetnem polju z gostoto približno 370 mT smo zaznali anizotropne spremembe sipalnega signala, ki so se razlikovale v smereh vzporedno in pravokotno na polje. Spremembe na mikrometrskih dolžinskih skalah smo povezali s preurejanjem delcev, značilnosti na manjših skalah pa pripisali magnetnemu sipanju. Za kvantitativno razlago opažanj smo izvedli simulacije Monte Carlo z dipolno-dipolnimi interakcijami med delci. Simulacije so reproducirale opaženo anizotropijo in pokazale, da so premiki delcev razmeroma majhni ter le šibko usmerjeni v smeri zunanjega polja.

Rezultati kažejo, da USANS omogoča neposredno proučevanje preurejanja mezoskopskih struktur v MAE. Prispevajo tudi k razumevanju povezave med preurejanjem delcev in spremembami makroskopskih mehanskih lastnosti materiala.

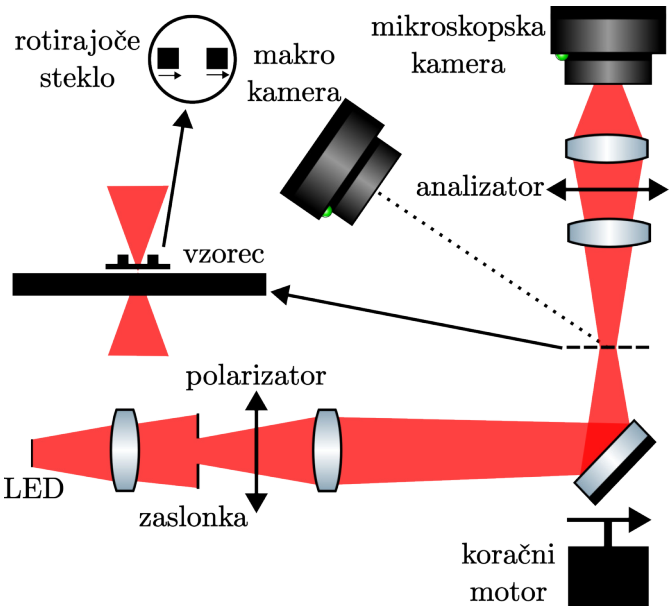
Raziskavo so podprli ARIS (program P1-0192), slovensko-nemški bilateralni raziskovalni projekt (ARIS–DAAD, BI-DE/25-27−003, ID projekta: 5773025) in Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, projekt št. 524921900).

[1] A. Stoll, M. Mayer, G. J. Monkman in M. Shamonin, Evaluation of highly compliant magneto-active elastomers with colossal magnetorheological response, Journal of Applied Polymer Science 131 (2014).

Dinamična tekočekristalna celica za nadzor in oblikovanje disklinacijskih linij

Martin Horvat[1], Natan Osterman [1,2]

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
2. Odsek za kompleksne snovi F7, IJS, Ljubljana



Za nematske tekoče kristale je značilen njihov orientacijski red. Če je ta singularen vzdolž krivulje to imenujemo disklinacijska linija. Te so zanimive zaradi interakcije s koloidi in svetlobo ter zaradi analogij z drugimi vejami fizike. S spreminjanjem lokalnega zasuka direktorskega polja, se disklinacijske linije deformirajo [1]. S tem namenom smo razvili dinamično tekočekristalno celico, kjer zgornjo površino rotiramo s pomočjo magnetnega polja. Tak sistem omogoča eksperimente kjer preučujemo dinamiko disklinacijske linije med točkovnima defektoma s topološkima nabojema +1/2 in -1/2 oziroma +1 in -1. Dodatno lahko eksperimentalno realiziramo poljubno deformacijo disklinacijske linije, kjer je njen potek zakodiran v ureditvi na spodnji površini [2].

[1] C. Long, M. J. Deutsch, J. Angelo, C. Culbreath, H. Yokoyama, J. V. Selinger in R. L. B. Selinger, Physical Review X **14**, 011044 (2024)
[2] Y. Tsubery in H. Aharoni, Proceedings of the National Academy of Sciences **122**, e2508362122 (2025)

Hidrodinamski pojavi v feroelektrični nematski tekočini

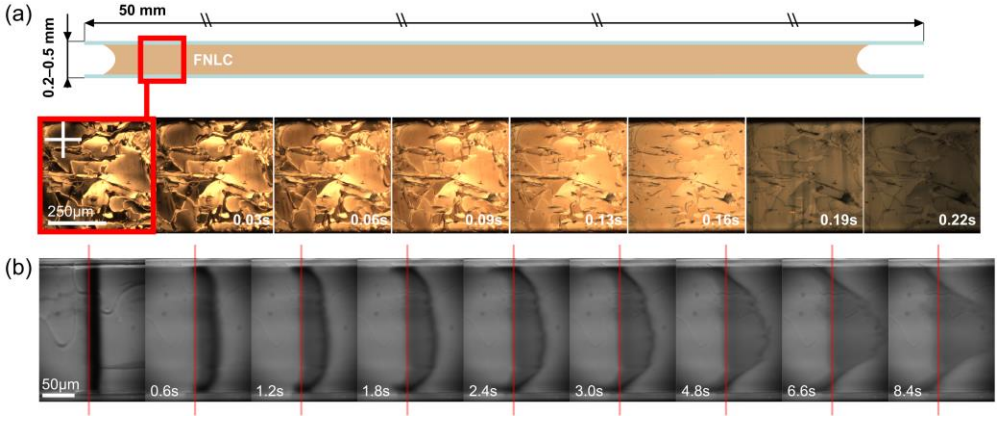
Peter Medle Rupnik[1,2], Nerea Sebastián[1], Natan Osterman,[1,2] Uroš Jagodič[1] in Alenka Mertelj[1]

1. Institut "Jožef Stefan", Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Feroelektrični nematski tekoči kristali združujejo spontano električno polarizacijo in 3D fluidnost. Ko tekočina miruje, polarizacija v snovi zavzame takšne konfiguracije, ki minimizirajo elektrostatično energijo. Kadar v tekočini induciramo strižni tok, nematodinamski pojavi povzročijo reorientacijo električne polarizacije. V posebnih primerih lahko nastale deformacije polarizacijske strukture spremenijo depolarizacijsko polje, ki ga je mogoče zaznati v obliki mehanoelektričnih pojavov [1]. Depolarizacijsko polje je odvisno od celotne polarizacijske konfiguracije v vzorcu. Ker takšno polje povzroča v materialu elektrostatične sile in navore dolgega dosega, ki vplivajo na nematodinamske pojave, le-teh v splošnem ne moremo obravnavati z reduciranim lokalnim opisom.

V naši študiji smo feroelektrično nematsko tekočino zaprli v tanke steklene kapilare in jih povezali z regulatorjem tlaka. Tako smo nadzorovano inducirali tok tekočine ter hkrati optično opazovali strukturne spremembe in tokovne vzorce. Opazili smo, da strižni tokovi povzročajo delno poravnavo električne polarizacije, čemur sledi povečanje depolarizacijskega polja. Poleg tega smo lokalno opazili prisotnost dvosmernega toka, ki na ravni celotnega vzorca povzroča kompleksne krožne tokove. Opažene pojave je mogoče pojasniti upoštevajoč prispevke elektrostatične samointerakcije dolgega dosega, ki se pojavi v vzorcu ob prisotnosti strižnih tokov.

Ta študija je bila financirana s projekti J1-50004 in J1-50006 ter programom P1-0192 Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije. Feroelektrični nematski tekoči kristal, uporabljen v študiji, smo pridobili od Merck Electronics KGaA.



Slika 1: (a) Shema tanke kapilare napolnjene s feroelektrično nematično tekočino. Spodaj je prikazan odziv v delu vzorca po vzpostavitvi tlačne razlike $\Delta p = 50$ mbar ($d = 40$ μm). (b) Fotografije flourescence dela vzorca prikazujejo evolucijo crtnega vzorca, ki sledi lokalnemu toku tekočine. Črno območje smo lasersko vgravirali z metodo foto-bledenja.

[1] P. Medle Rupnik, L. Cmok, N. Sebastián in A. Mertelj, Advanced Functional Materials **34**, 2402554 (2024).

Raziskave na področju fizike mehke snovi v skupini Svetloba in snov

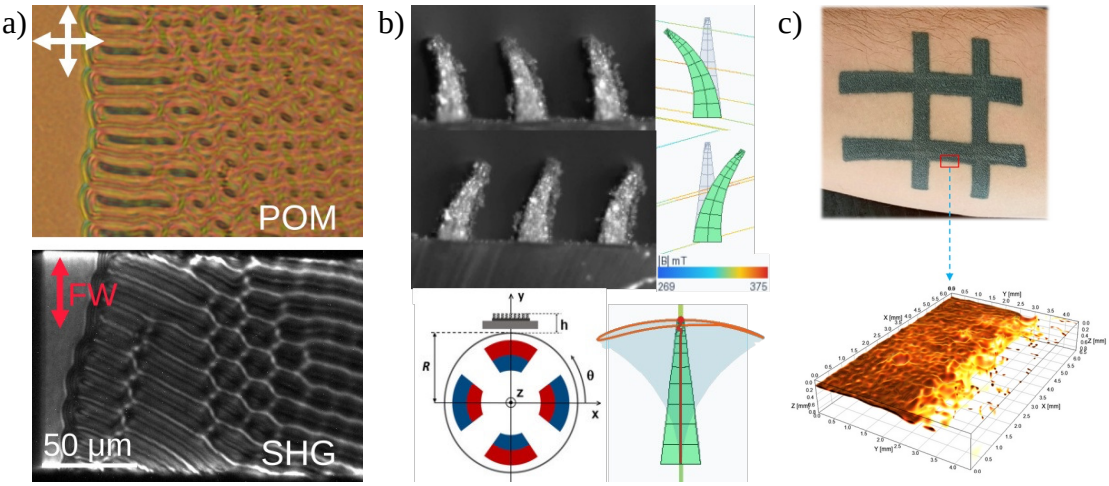
Luka Cmok[1,2] in Mojca Vilfan[1,2]

[1]Odsek za kompleksne snovi, Institut Jožef Stefan, Ljubljana
[2]Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Interakcija svetlobe s snovjo je eden od osnovnih mehanizmov za proučevanje fizikalnih lastnosti snovi. Zaradi bogatega nabora optičnih pojavov ima pomembno vlogo tako v osnovnih raziskavah kot v sodobnih tehnologijah. S svetlobo lahko snovi proučujemo, vzbujamo, spreminjamo in manipuliramo, hkrati pa lahko z ustrezno izbiro in strukturiranjem snovi vplivamo na lastnosti svetlobe in opazujemo nove fizikalne pojave.

V programski skupini Svetloba in snov (http://complex.ijs.si) z optičnimi metodami raziskujemo različne oblike mehke snovi, pri čemer se osredotočamo na tekoče kristale, koloidne sisteme, elastomere in biološke snovi. Zanimajo nas njihova struktura, fazni prehodi, dinamika ter odzivi na zunanja polja. Pri tem uporabljamo in razvijamo različne eksperimentalne metode, od optične in nelinearne mikroskopije, optične pincete in navzkrižne diferenčne dinamične mikroskopije do spektroskopskih tehnik, ki jih izpopolnjujemo in prilagajamo specifičnim raziskavam.

Najobširnejše raziskave obsegajo polarne tekočekristalne faze, kakršne so feroelektrične in feromagnetne nematične faze, pri katerih proučujemo fizikalne lastnosti in odzive na zunanja polja. Posebej zanimive so njihove nelinearne optične lastnosti in možnosti prostorskega strukturiranja optičnega odziva, med drugim za nastavljive fotonske procese (slika 1a). Raziskujemo lasersko strukturirane magnetne elastomere, ki jih krmilimo z magnetnim poljem in ustvarjamo tok tekočin, kar obeta široke možnosti uporabe v mehki robotiki in mikrofluidiki (slika 1b). Na področju eksperimentalne biofizike sodelujemo s farmacevtskimi partnerji in raziskujemo procese agregacije beljakovin, ki so pomembni pri razvoju bioloških zdravil. Razvijamo tudi nove metode za neinvazivno karakterizacijo bioloških tkiv in organov ter tomografsko slikanje patologij v človeški koži (slika 1c).



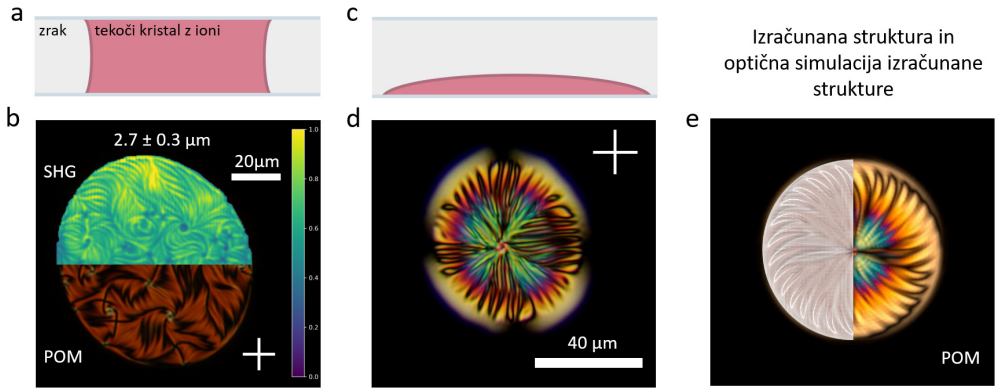
Slika: Vzorci v kiralnih feroelektričnih nematičnih tekočih kristalih (a); magnetne elastomerne lamele in njihov odziv v magnetnem polju (b); tomografska slika roba tetovaže v človeški koži (c)

Struktura in topologija antiferoelektričnih nematikov v diskih in površinskih kapljicah

Ema Hanžel[1,2], Aditya Vats[2], Natan Osterman[1,2], Nerea Sebastián[1], Richard J. Mandle[3,4], Miha Ravnik[1,2] in Alenka Mertelj[1]

1. Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija
3. School of Physics and Astronomy, Univerza v Leedsu, Leeds, Združeno kraljestvo
4. School of Chemistry, Univerza v Leedsu, Leeds, Združeno kraljestvo

Odkritje feroelektrične nematske faze je spodbudilo identifikacijo in raziskave še mnogo drugih podobnih faz, med njimi tudi antiferoelektrične faze, ki se običajno pojavi med nepolarno in feroelektrično nematsko fazo. Zanjo sta značilna antiferoelektrični odziv na električno polje in prostorsko modulirana polarizacija s periodo od nekaj deset nanometrov do nekaj mikrometrov [1]. Preučevali smo vpliv omejene geometrije na strukturo v diskih (slika 1a) in kapljicah na površini (slika 1c) različnih velikosti in debelin z uporabo polarizacijske optične mikroskopije (POM) in mikroskopije s podvojeno frekvenco (SHG). Karakterizirali smo tudi topološke defekte. V debelih vzorcih je struktura periodična v dveh dimenzijah s karakteristično periodo $p = 2.7 \pm 0.3$ µm. Pri vzorcih tanjših od p postane struktura periodična v eni dimenziji in modulacija se poveča na 3.6 ± 0.3 µm.



Slika 1: (a) grafični prikaz diskov (b) POM in SHG slika diska (c) grafični prikaz kapljice na površini (d) POM slika kapljice na površini (e) izračunana struktura in optična simulacija izračunane strukture.

Strukturo smo modelirali s pomočjo proste energije po vzoru Landau-de Gennesa [2]. Za izračunane strukture smo simulirali optične slike (slika 1e) z metodo dtmm [3]. Modelirana struktura se kvalitativno ujema z eksperimenti.

[1] P. Medle Rupnik, E. Hanžel, M. Lovšin, N. Osterman, C. J. Gibb, R. J. Mandle, N. Sebastián, and A. Mertelj, "Antiferroelectric Order in Nematic Liquids: Flexoelectricity Versus Electrostatics," Advanced Science, 12, 2414818 (2025).
[2] A. Vats, A. Mertelj, and M. Ravnik, "Bulk mesophases modeling of ferroelectric nematic liquid crystals," Nat Commun, (2026).
[3] A. Petelin, IJSComplexMatter/dtmm: Version 0.6.1. https://doi.org/ 10.5281/zenodo.4266242 (2020).

Ta študija je bila financirana z ARIS projektoma J1-50004 in N1-0336, ARIS programoma P1-0192 in P1-0099 ter UKRI Future Leaders Fellowship MR/W006391/1. Feroelektrični nematski tekoči kristal, uporabljen v študiji, smo pridobili od Merck Electronics KGaA.

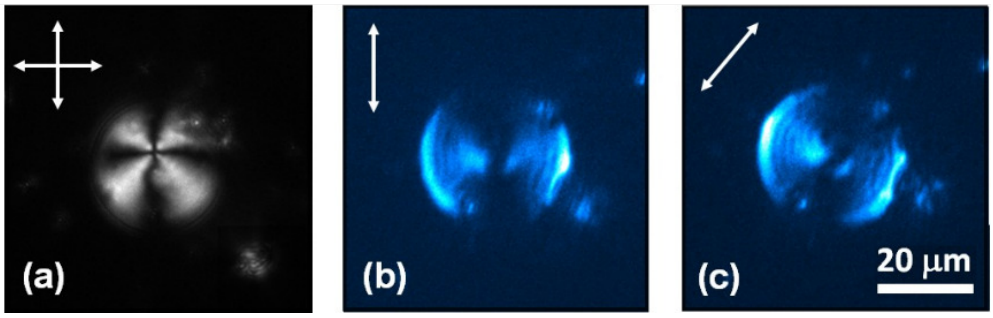
Karakterizacija strukture feroelektričnih nematskih tekočekristalnih krogelnih lupin s pomočjo linearne in nelinearne optične mikroskopije

Ema Pilih[1], Luka Cmok[1,2], Churchill B. Agoni[3], Jan P.F. Lagerwall[3], Natan Osterman[1,2] in Irena Drevenšek Olenik[1,2]

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
2. Odsek za kompleksno snov, IJS, Ljubljana
3. Oddelek za fiziko in materiale, Univerza v Luksemburgu, Luksemburg

Če tekoči kristal prostorsko omejimo v krogelno lupino, smo s tem v sistem uvedli topološke omejitve. Le-te skupaj z robnimi pogoji na zunanji in notranji površini lupine narekujejo ureditev direktorskega polja v posebne orientacijske konfiguracije, ki jih prepoznamo po njihovih značilnih topoloških defektih. Pričakujemo, da so v polarnih tekočekristalnih fazah zaradi njihove nižje simetrije nekatere vrste topoloških defektov, ki jih običajno srečamo v nepolarnih fazah, prepovedane. V polarnih fazah so poleg tega prisotni tudi elektrostatični efekti, ki dodatno vplivajo na stabilnost struktur.

Zgoraj opisane pojave smo analizirali v feroelektrični nematski tekočekristalni fazi (N_F) mešanice dveh zelo znanih polarnih TK materialov: RM734 in DIO [1]. Ker je faza N_F polarna in torej necentrosimetrična, lahko za njeno karakterizacijo poleg linearnih uporabimo tudi nelinearne optične pojave, kot je na primer podvajanje optične frekvence (SHG) [2]. Z metodami standardne polarizacijske optične mikroskopije (POM) ter širokokotne in vrstične nelinearne optične mikroskopije na osnovi frekvenčno podvojene svetlobe (SHG mikroskopija), smo izvedli polarimetrično slikanje lupin s premeri na območju od 20 - 100 μm. Iz dobljenih rezultatov smo nato določili orientacijsko ureditev tekočega kristala znotraj lupine.



Slika 1: Tekočekristalna lupina s premerom okoli 25 μm v NF fazi, posneta z (a) polarizacijsko optično mikroskopijo ter (b) in (c) z SHG mikroskopijo pri dveh različnih orientacijah polarizacije linearno polariziranega osnovnega optičnega žarka.

[1] J Thoen et al., Phys Rev E **107**, 014701 (2023)
[2] M. Lovšin et al., Adv. Optical Mater. e03018 (2026).

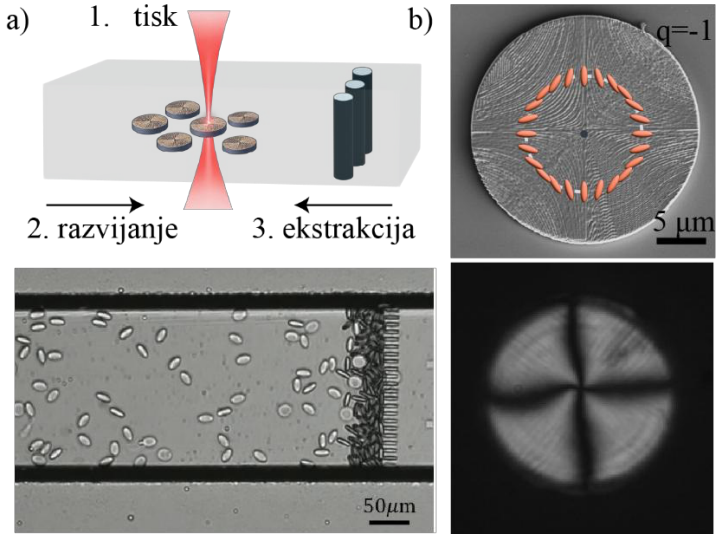
Zahvala: Zahvaljujemo se ARIS in FNR za financiranje v okviru projekta N1-0336.

Izdelava koloidnih delcev s poljubno porazdelitvijo površinskega sidranja nematskih tekočih kristalov

Tine Krajnc[1,2], Jan Rugelj[2], Uroš Jagodič[2]

[1] Fakulteta za naravoslovje in matematiko UM, Maribor
[2] Institut Jožef Stefan, Ljubljana

Direktno lasersko pisanje (DLW) na osnovi dvofotonske polimerizacije omogoča izdelavo tridimenzionalnih mikrostruktur s poljubno geometrijo ter funkcionalizacijo njihovih površin v dveh in treh dimenzijah. Z lasersko zapisanimi nanoutori lahko lokalno določimo smer površinskega sidranja tekočega kristala in tako ustvarimo prostorsko spreminjajoče se robne pogoje za orientacijo direktorskega polja [1].
S prenosom tega postopka v mikrofluidične kanale omogočimo neposredno izdelavo koloidnih delcev, pri katerih lahko neodvisno določimo površinsko sidranje na zgornji in spodnji ploskvi ter na stranskih površinah. Takšen pristop odpravlja potrebo po mehanskem odstranjevanju delcev s podlage in omogoča njihovo nadaljnjo manipulacijo s pretokom tekočine [2].
S tem pridobimo nadzor ne le nad geometrijo koloidnih delcev, temveč tudi nad topologijo direktorskega polja v njihovi okolici. Z neodvisno določenim navitjem direktorja na zgornji in spodnji ploskvi lahko vplivamo na topološki naboj in strukturo defektov, medtem ko sidranje na stranskih površinah omogoča oblikovanje elastičnih interakcij med delci. Predstavljena metoda tako odpira temeljno fizikalno vprašanje, v kolikšni meri lahko topologijo in meddelčne interakcije določamo neodvisno od geometrije delcev, zgolj z izbiro površinskih robnih pogojev.



Slika 1: a) Shematski prikaz izdelave koloidnih delcev v mikrofluidičnem kanalu: 1. direktno lasersko pisanje delcev, 2. razvijanje in 3. ekstrakcija delcev s pretokom tekočine. Spodaj je prikazana slika delcev med transportom in zadrževanjem na mikropregradi. b) SEM slika koloidnega delca z lasersko zapisanimi nanoutori, ki določajo površinsko orientacijo tekočega kristala z navitjem q = −1, ter pripadajoča POM slika delca v 5CB. Merili: a) 50 µm in b) 5 µm.

[1] Jagodič, U., Pišljar, J., Jelen, A., Škarabot, M., & Muševič, I. (2025). Three-dimensional planar alignment of nematic liquid crystal by direct laser writing of nanogratings. *ACS Photonics, 12*(11), 5970–5977. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.5c01342
[2] Lüken, A., Stüwe, L., Rauer, S. B., Oelker, J., Linkhorst, J., & Wessling, M. (2022). Fabrication, flow assembly, and permeation of microscopic any-shape particles. *Small, 18*(15), e2107508. https://doi.org/10.1002/smll.202107508

Oblikovanje topoloških defektov v tekočih kristalih z dvofotonskim laserskim risanjem

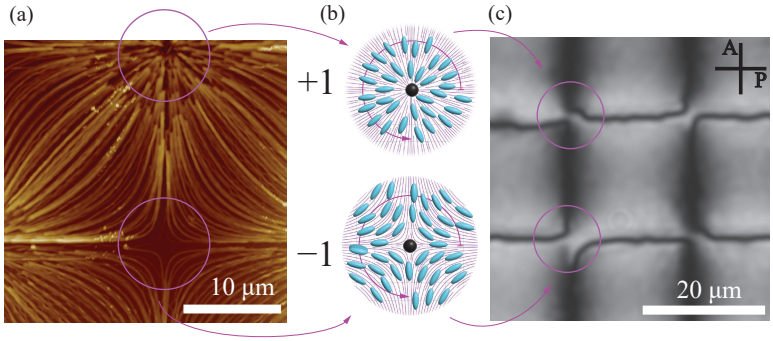
Jan Rugelj[1], Miha Škarabot[1,2] in Uroš Jagodič[1]

1. Odsek za fiziko trdne snovi F5, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Topološki defekti v nematskih tekočih kristalih nastanejo zaradi geometrijskih in topoloških omejitev direktorskega polja. Njihova lega in topološki naboj pomembno vplivata na lokalno ureditev tekočega kristala in njegove optične lastnosti. Nadzorovano oblikovanje takšnih defektov zato zahteva prostorsko določanje orientacije direktorja, ki ga s klasičnimi metodami enosmernega površinskega urejanja, kot je mehansko drgnjenje polimernih plasti, ni mogoče doseči.

V raziskavi predstavljamo metodo oblikovanja in prostorskega razporejanja topoloških defektov z uporabo nanometrskih utorov, izdelanih z dvofotonskim laserskim pisanjem [1, 2]. Z lokalnim spreminjanjem orientacije utorov določimo smer površinskega sidranja nematskega tekočega kristala in tako ustvarimo urejevalne vzorce z izbranim številom navitja. Metodo smo uporabili za izdelavo vzorcev s številom navitja $w = +1$ in $w = -1$, pri katerih orientacija utorov sledi predvideni razporeditvi direktorskega polja v okolici defekta.

Izdelane površinske strukture smo karakterizirali z mikroskopijo na atomsko silo, ureditev nematskega tekočega kristala pa preverili s polarizacijsko optično mikroskopijo (Slika 1). Opazovane optične teksture so skladne s pričakovano ureditvijo direktorja za izbrana topološka naboja. Rezultati kažejo, da lahko z neposrednim zapisovanjem nanoutorov določamo tako topološki naboj kot položaj defektov na površini, kar omogoča načrtovanje kompleksnejših direktorskih polj in raziskovanje njihovega vpliva na optične lastnosti tekočih kristalov.



Slika 1: Oblikovanje topoloških defektov s številoma navitja $w = +1$ in $w = -1$ z uporabo nanometrskih utorov. (a) Posnetek izdelanih utorov z mikroskopom na atomsko silo (AFM). (b) Shematski prikaz predvidene ureditve direktorja v okolici defektov s številom navitja $w = +1$ (zgoraj) in $w = -1$ (spodaj). (c) Polarizacijska mikroskopska slika nematskega tekočega kristala med prekrižanima polarizatorjema (POM).

[1] D. W. Berreman, Physical Review Letters **28**, 1683 (1972)
[2] U. Jagodič, J. Pišljar, A. Jelen, M. Škarabot in I. Muševič, ACS Photonics **12**, 5970 (2025)

Optične meritve asimetričnih udarnih valov

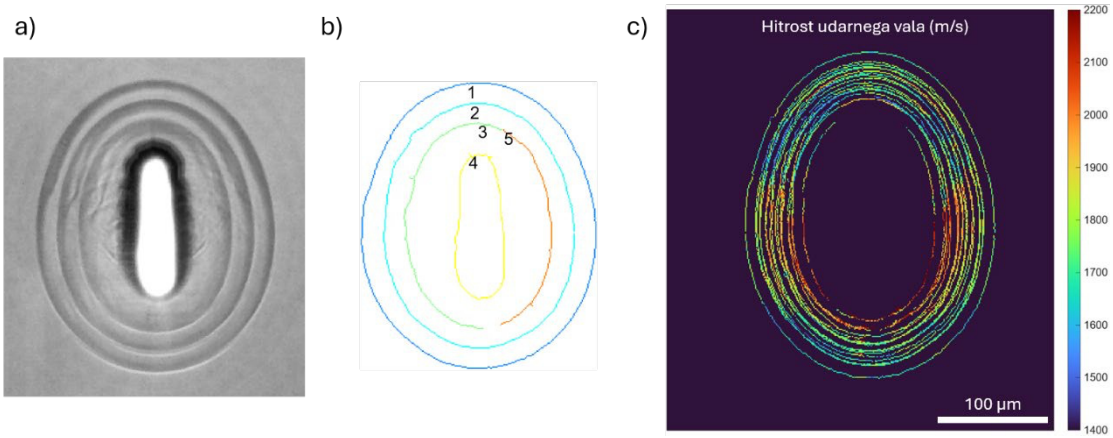
Jaka Mur[1] in Rok Petkovšek[1]

1. Fakulteta za strojništvo, UL, Ljubljana

Pri laserskem preboju v vodi nastane plazma, hiter prenos njene energije v okoliško tekočino pa sproži udarne valove. Merjenje tlaka udarnih valov je pomembno pri raziskavah kavitacije, laserskih obdelovalnih procesov in biomedicinskih aplikacij, saj velikost in prostorska porazdelitev tlačnih obremenitev določata mehanski odziv okolice. V neposredni bližini izvora se hitrost širjenja in tlačna amplituda udarnega vala spreminjata na mikrometrskih razdaljah in v nanosekundnih časovnih intervalih. Pri nanosekundnem laserskem preboju je plazma pogosto podolgovata in nepravilne oblike. Širjenje in slabljenje udarnega vala sta zato odvisna od smeri širjenja in mesta nastanka na robu plazme, česar z meritvijo v posamezni točki ne zajamemo v celoti.

V predhodnih raziskavah smo s senčno fotografijo z večkratno osvetlitvijo merili hitrosti udarnih valov in iz njih izračunane tlake primerjali s točkovnimi meritvami z optičnim hidrofonom [1]. Razvoj metode v smeri analize hitrostnega polja je omogočil spremljanje spreminjajočih se valovnih front ter smerno odvisne tlačne amplitude [2].

V tej raziskavi s tremi osvetlitvenimi pulzi v medsebojnem časovnem razmiku 10 ns na enem posnetku zabeležimo tri zaporedne položaje udarnega vala (slika 1a). Zajem obsega 20 ns trajanja razvoja udarnega vala in omogoča določitev povprečne lokalne hitrosti v dveh zaporednih časovnih intervalih. Z zaznavanjem robov prepoznamo in označimo valovne fronte (slika 1b), prečno na katere merimo hitrosti in posredno preko enačbe stanja vode določimo tlake. S tem ohranimo informacijo o dvodimenzionalnem širjenju valovne fronte v slikovni ravnini. Rezultati kažejo asimetrične valovne fronte in izrazite prostorske razlike v hitrosti širjenja (slika 1c). Lokalne hitrosti dosegajo približno 2200 m/s, kar ustreza tlaku okoli 800 MPa. Največje vrednosti izmerimo na spodnjih bočnih delih front, manjše pa v zgornjem območju ob vzdolžni osi plazme. Meritve omogočajo prostorsko razločeno spremljanje širjenja asimetričnih udarnih valov ter so podlaga za izračun njihovih lokalnih tlačnih amplitud.



Slika 1: a) Posnetek udarnega vala s trojno osvetlitvijo. b) Prepoznani in označeni robovi. c) Porazdelitev lokalnih hitrosti širjenja udarnega vala okoli asimetričnega izvora, podolgovate plazme v vodi.

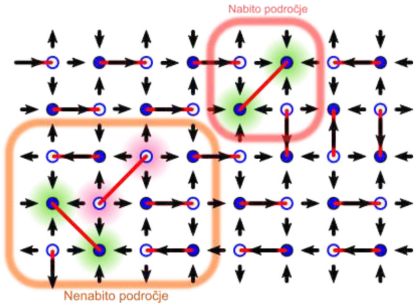
[1] J. Mur, F. Reuter, J. J. Kočica, Ž. Lokar, J. Petelin, V. Agrež, C.-D. Ohl in R. Petkovšek, Optics Express **30**, 37664–37674 (2022)
[2] F. Reuter, J. Mur, J. Petelin, R. Petkovšek in C.-D. Ohl, Physics of Fluids **36**, 017127 (2024)

Neravnovesna topološka mehka snov

Žiga Kos[1]

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
2. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

Mehka snov je pogosto izrazito zunaj ravnovesja, na primer v bakterijskih kolonijah ali gnanih tekočih kristalih. V takšnih sistemih je ključna sklopitev med tokom snovi, strukturo tekočine in topološkimi lastnostmi materiala. Na plakatu so predstavljeni izbrani rezultati raziskav dinamike neravnovesnih sistemov mehke snovi: dimerni model v nematskih celicah in topološka dinamika takšnih stanj [1], plavanje mikroplavalcev v kompleksnih tekočinah [2], aktivna turbulenca [3] ter napovedovanje biofizikalnih lastnosti proteinov [4].



Slika 1: Kvazidelčne vzbuditve v efektivnem dimernem modelu tekočekristalnih celic z vzorci sidranja.

[1] C. Meng, J. S. Wu, Ž. Kos, J. Dunkel, C. Nisoli in I. I. Smalyukh, Physical Review X **15**, 021084S (2025)
[2] S. Kim, Ž. Kos, E. Um in J. Jeong, Nature Communication **15**, 3 (2024)
[1] N. Kralj, M. Ravnik in Ž. Kos, Phys. Review Letters **130**, 128101 (2023)
[2] B. Knez, L. Erzin, Ž. Kos, D. Kuzman in M. Ravnik, Scientific reports **15**, 28266 (2025)

Effect of electric field on islands aspect ratio in organic molecular-beam epitaxy

Vadym Tkachuk[1], Griša Prinčič[2], Knarik Yeritsyan[1], Jernej Iskra[2], and Egon Pavlica[1]

1. Laboratory for Organic Matter Physics, University of Nova Gorica, Vipavska 13, 5000 Nova Gorica, Slovenia

2. University of Ljubljana, Faculty of Chemistry and Chemical Technology, Večna pot 113, Ljubljana, 1000, Slovenia

We have studied epitaxial growth of dipolar organic molecules on a SiO2 surface. The molecule was a derivative of benzonitrile and benzoic acid moieties forming approximately 1 nm long dipole. The anisotropy of the system was introduced during epitaxy by a strong electric field between two metal electrodes. We varied the electric field magnitude up to the values of 600 MV/m. Using atomic force microscopy, we have characterized the aspect ratio and the orientation of epitaxially grown islands versus the direction of the electric field. We have found, that island exhibit significantly anisotropic shape. In Fig. 1 we present the angle between the direction of the electric field and the major axis of the island. Our results demonstrate relatively independent orientation of islands in electric fields below 100 MV/m. This phenomenon results due to competition of two independent processes during epitaxial growth: alignment of dipolar molecules to the externally applied electric field and the rearrangement of molecules due to intermolecular interactions in thin film. In order to understand the extent of intermolecular interactions, we have performed a set of density-functional calculations using ORCA [1] to examine electronic association energies of an idealized parallel and antiparallel dimers. We have found that the electronic association of antiparallel dimer is lower by 2.67 kJ/mol compared to parallel dimer, which explains the observed threshold of the alignment of islands to the electric field.

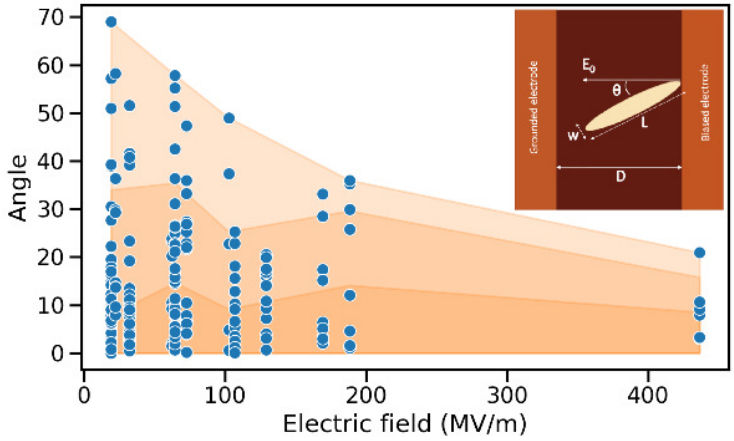


Figure 1: Distribution of measured angles Θ in degrees between the direction of the electric field and the major axis of the islands (see inset).

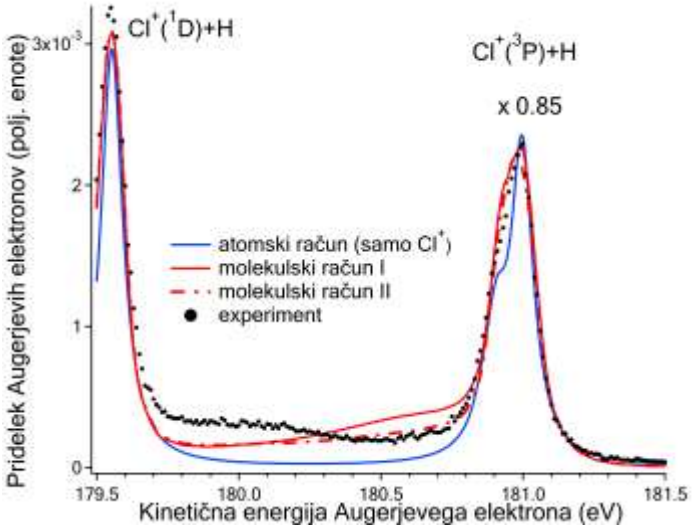
[1] F. Neese, *WIREs Computational Molecular Science* **15**, e70019 (2025).

Efekt interakcije spin-tir na resonantni Augerjev razpad pri disociaciji HCl

Matjaž Žitnik[1], Klemen Bučar[1], Janez Turnšek[1], in Andrej Mihelič[1]

1. Odsek za za fiziko nizkih in srednjih energij, IJS, Ljubljana

Fotodisociacija molekule HCl preko resonančnega stanja $2p^{-1}\sigma^*$ poteče na časovni skali 10 fs, ki je primerljiva s časom, v katerem vrzel 2p razpada z emisijo Augerjevega elektrona. To pomeni, da se oblike valenčnih molekulskih orbital v in v', iz katerih poteče prehod, lahko znatno razlikujejo od oblik v osnovnem stanju HCl, ko sta jedri H in Cl v glavnem na ravnotežni razdalji 2.4. au. Spekter elektronov pri resonančnem Augerjevem razpadu L-vv' smo izračunali z metodo stacionarne Greenove funkcije [1]. Prejšnji nerelativistični izračun sicer dobro oceni relativne intenzitete treh glavnih spektralnih črt v območju elektronskih energij od 173 do 182 eV, vendar ne opiše dobro spektra, posnetega z visoko ločljivostjo. Pokažemo, da upoštevanje interakcije spin-tir v končnih stanjih $2\pi^{-2}\sigma^*$ in $5\sigma^{-1}2\pi^{-1}\sigma^*$ znatno izboljša ujemanje za spektralno črto, ki izvira iz stanj $^4\Pi$, $^2\Sigma$ in $^4\Sigma$, ki konvergirajo k disociativni limiti H + $Cl^+(^3P)$. Nekoliko presenetljivo ugotovimo, da se pri velikih razdaljah med H in Cl ta disociativna limita zaradi interakcije spin-tir razcepi na pet namesto na tri komponente $3p^{-2}(^3P_{0,1,2})$ v izoliranem fragmentu Cl^+. Podobnost z atomskim primerom je porušena zaradi drugačne narave molekulskega stanja $^2\Pi$, v katerega molekula preide pri šibkem participatorskem Augerjevem razpadu resonančnega stanja. To stanje konvergira k energijsko znatno višji disociativni limiti H^+ + $Cl(^2P)$ in ga interakcija spin-tir v limiti ne more zmešati s tremi, zgoraj navedenimi končnimi stanji. Naša analiza pokaže še, da so preostale razlike v primerjavi z eksperimentalnim spektrom prej posledica netočnosti nerelativističnih potencialov za končna molekulska stanja kot posledica uporabe enocentričnega približka pri računanju razpadnih časov za najbolj verjetne Augerjeve prehode tipa gledalec. Na splošno velja, da se razlike v strminah molekulskih potencialov začetnega in končnega stanja odražajo v resonančnem Augerjevem spektru z občutljivostjo in v obsegu, ki je odvisen od trajanja molekulske disociacije glede na življenjsko dobo začetne vrzeli v notranji lupini.



[1] M. Žitnik, K. Bučar, J. Turnšek, A. Mihelič, Physical Review A (accepted 4.10.2026),

Preučevanje pozicije devterija v poškodovanem volframu s pomočjo ionskih metod v načinu kanaliziranja

Jan Gobec[1,2], Sabina Markelj[1], Esther Punzon-Quijorna[1], Jan Predrag[1], Thomas Schwarz-Selinger[3], Frederic Granberg[4], Victor Lindblad[4], Andreas Bruncrona[4], Flyura Djurabekova[4], Rene Heller[5], Xin Jin[6]

[1]*Inštitut Jožefa Stefana, Ljubljana, Slovenija*
[2]*Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana, Slovenija*
[3]*Ištitut Maxa Plancka za fiziko plazme, Garching, Nemčija*
[4]*Univerza v Helsinkih, Helsinki, Finska*
[5]*Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Nemčija*
[6]*Shenzhen Key Laboratory of Nuclear and Radiation Safety, Univerza Shenzhen, Kitajska*

Volfram je zaradi visokega tališča in nizkega razprševanja eden izmed glavnih kandidatov za uporabo kot material v prihodnjih fuzijskih reaktorjih. Vendar obsevanje povzroča nastanek defektov v kristalni rešetki, ki pomembno vplivajo na zadrževanje in transport vodikovih izotopov (VI) ter posledično na količino zadržanih VI in življenjsko dobo materiala. Med te defekte spadajo vrzeli, samointersticijski atomi (SIA) in gruče vrzeli različnih velikosti. Čeprav sta nastanek in razvoj teh defektov že obsežno raziskana, je njihova interakcija z HI slabše razumljena, predvsem z vidika eksperimentalnega preverjanja napovedi atomističnih modelov.

V volframu brez poškodb vodik prednostno zaseda tetraedrska intersticijska mesta [1], medtem ko vrzeli in gruče vrzeli predstavljajo energijsko ugodna mesta za njegovo ujetje, pri čemer nastajajo drugačne lokalne konfiguracije vodika [2]. Razumevanje teh mehanizmov je ključno za napovedovanje zadrževanja in transporta vodika v materialih, namenjenih uporabi v fuzijskih reaktorjih.

V tem prispevku raziskujemo ujetje devterija v poškodovanem volframu s pomočjo jedrske reakcije v načinu kanaliziranja (C-NRA), Rutherfordove spektrometrije povratno sipanih ionov v načinu kanaliziranja (C-RBS) in atomističnih simulacij. Monokristale volframa obsevamo z visokoenergijskimi ioni, da ustvarimo nadzorovane populacije defektov, nato pa jih izpostavimo devteriju [2, 3]. Nastale poškodbe kristalne mreže in porazdelitve devterija preučujemo z ionskim žarkom v načinu kanaliziranja. S programom RBSADEC [4, 5] simuliramo kotno odvisnost signala NRA/RBS in dvodimenzionalne kotne porazdelitve za različne kristalografske orientacije. Pri tem uporabljamo atomske konfiguracije, pridobljene s simulacijami molekulske dinamike [6], ki predstavljajo z obsevanjem povzročene defekte in različne konfiguracije ujetega devterija.

[1] Heinola, K., & Ahlgren, T. (2010), Journal of Applied Physics, 107(11).
[2] S. Markelj et al., *Acta Materialia* 263, 119499 (2023).
[3] J. Zavašnik et al., *Materials Characterization* 224, 115050 (2025).
[4] S. Zhang et al., *Physical Review E* 94, 043319 (2016).
[5] X. Jin et al., *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 28, 075005 (2020).
[6] X. Jin et al., *Physical Review Materials* 8(4), 043604 (2024).

Implantacijska infrastruktura na IJS za potrebe kvantnih tehnologij

Mitja Kelemen[1], Žiga Brenčič[1,2], Matevž Skobe[1], Primož Pelicon[1], Ava Rajh[3] in Rok Podlipec[4]

1. Odsek za fiziko nizkih in srednjih energij, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, Francija
4. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

Defekte v kristalni rešetki, ki so sestavljeni iz vezanega stanja vrinjenega atoma in praznine v kristalni rešetki (ang. ion-vacancy, skrajšano I-V), je mogoče ustavariti z uporabo ionske implantacije. Tako ustvarjen vezan sistem je občutljiv na perturbacije zunanjega električnega ali magnetnega polja ali temperature. To spremen I-V barvni center v izjemno natančen in občutljiv senzor[1]. Taki kvantni bravni centri se lahko uporabijo tudi kot kubiti za potrebe vantnega računalništva. Saj izkazujejo kubintno naravo že pri sobni temperaturi [2].

Trenutno najbolj znan in raziskan tak barvni centr, je dušikov center v diamantni rešetki (ang. Nitrogen-vacancy, N-V). Za raziskovanje novih kvantnih centrov in njihovih lastnosti potrebujemo centre sestavljene iz poljubnih ionov in praznine (I-V). Glede na njihovo globino v kristalu, se loči njihova uporaba v namene senzorike.

Ena od uveljavljenih metod ustvarjanja centrov je ionska implantacija. S prilagajanjem energije ionskega žarka med eV do nekaj MeV vsadimo poljuben ion v kristalno rešetko v globine od nekaj nm do nekaj μm.

Na Mikroanalitskem centru, Inštituta Jožefa Stefana lahko ustvarjamo I-V centre v diamantih z uporabo ionskih žarkov, v energijskem območju od nekaj 100 eV do 20 MeV. V ta namen so postavili dve eksperimentalni postaji.

Nano žarek, kjer lahko fokusiramo MeV ionske žarke do sub mikrometerskih dimenzij. Kjer za pospeševanje ionov uporabljamo nov 3 MV tandemski pospeševalnik. Na nano žarku lahko ustavrjamo I-V barvne centre v globini izbrani substratov.

Za namene same podpovršinske implantacije smo zgradili nizko energijsko vejo-LEB, kjer lahko implantiramo ione nizkih energij, do nekej 100 eV.

V tem prispevku bomo predstavili razvoj eksperimentalne opreme, ki bo omogočala implantacijo diamantov s poljubnimi ioni, prežarevanje diamantov, celjenje poškodb kristalne rešetke med implantacijo in aktivacijo I-V centrov. Ter predstavili prve rezultate na različnih N-V centrih ustvarjenih z ionsko implantacijo.

[1] R. Schirhagl et al., Annu. Rev. Phys. Chem., VOL 65, 2014
[2] D. Awschalom et al., Nat. Photonics, VOL12, 2018

Nadzor dvofotonskega vzbujanja helijevih stanj s koherentno večbarvno svetlobo

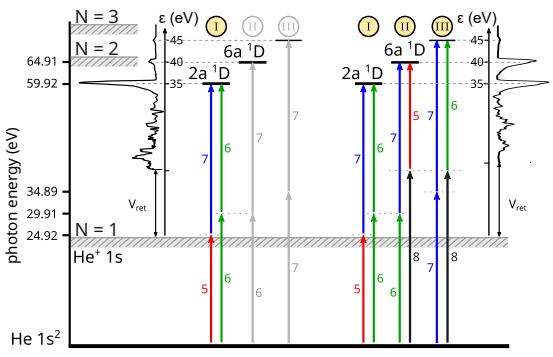
K. Bučar[1,2,3], I. Makos[4], O. G. Alexander[5], F. Egun[5], J. P. Marangos[5], M. Coreno[6], J. Mauritsson[7], D. Busto[7], P. K. Maroju[7], L. Poletto[8], G. Zeni[8], F. Frassetto[8], E. Allaria[9], G. Penco[9], A. Simoncig[9], M. Manfredda[9], O. Plekan[9], M. Di Fraia[10], G. Sansone[4], M. Žitnik[1,3], A. Mihelič[1], and C. Callegari[9].

1. IJS, Ljubljana; 2. MPŠ, Ljubljana; 3. FMF, Ljubljana; 4. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg; 5. Imperial College London, UK; 6. CNR-Istituto di Struttura della Materia, Basovizza, Italy; 7. Division of Atomic Physics, Department of Physics, Lund, Sweden; 8. CNR-Institute for Photonics and Nanotechnologies, Padova, Italy; 9. Elettra-Sincrotrone Trieste, Basovizza, Italy; 10. CNR-Istituto Officina dei Materiali, Basovizza, Italy

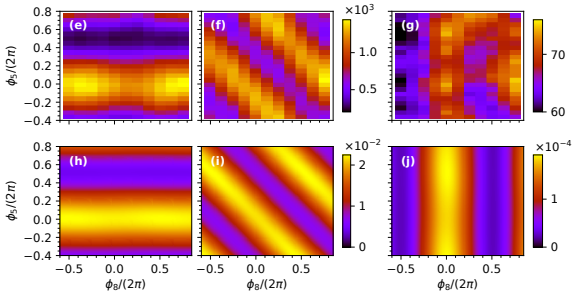
V prispevku predstavljamo eksperimentalne rezultate in teoretično obravnavo nelinearnega koherentnega nadzora populacije dvojno vzbujenih stanj (DES) v atomu helija. Uporabili smo femtosekundne sunke močne svetlobe iz laserja na proste elektrone (FERMI FEL-1), ki je generiral prostorsko prekrivajoče se višje večkratnike osnovne frekvence semenskega laserja (ω_n=$n\omega_{\mathrm{seed}}$, n=5,6,7,8). Z njimi smo prek interferenčnih dvofotonskih poti uspešno naselili avtoionizirajoča DES He $2a$ in $6a\ ^1D^e$, ki smo ju prepoznali po resonančnih ojačitvah v elektronskih pridelkih (slika 1).

FERMI ima možnost neodvisnega nastavljanja amplitud in relativnih faz zaporednih večkratnikov (skupaj s spremenljivo frekvenco semenskega laserja), s čimer smo učinkovito nadzirali pripravo koherentne superpozicije omenjenih stanj. S premikanjem relativnih faz petega (ϕ_5) in osmega večkratnika (ϕ_8) glede na preostale smo opazili pričakovano sinusno modulacijo elektronskega signala po dvofotonski vzbuditvi (slika 2 zgoraj). Kinetično energijo in pridelke elektronov smo izmerili z visoko učinkovitim elektronskim spektrometrom — magnetno steklenico (MBES), pri kateri smo lahko z zaporno napetostjo (V_{ret}) odstranili močan signal enofotonske ionizacije.

Teoretična obravnava, ki temelji na reševanju sistema kinetičnih enačb in metodi ECS (*Exterior Complex Scaling*), se odlično ujema z izmerjenimi spektri (slika 2 spodaj).



Slika 1: Energijska shema opazovanih dvofotonskih prehodov v atomu helija z uporabo treh (levo, n=5,6,7) in štirih večkratnikov (desno, n=5,6,7,8). Ob robovih sta prikazana vzorčna elektronska energijska spektra v obeh primerih.



Slika 2: Modulacija izmerjenih elektronskih spektrov v odvisnosti od faz ϕ_5 in ϕ_8; ϕ_6=ϕ_7=0. Prikazan je pridelek elektronov s kinetičnimi energijami ε_n=$\hbar\omega_n$ − $\mathrm{IP_{He}}$, za (e) $\varepsilon_{12} \approx 35$ eV ($2a^1D^e$), (f) $\varepsilon_{13} \approx 40$ eV ($6a^1D^e$) in (g) $\varepsilon_{14} \approx 45$ eV ($3a^1D^e$ pod ionizacijskim pragom N=3); vse pri energiji semenskega laserja $\hbar\omega_{\mathrm{seed}}$=4,996 eV. Pripadajoči izračuni so prikazani v spodnji vrsti (h-j).

[1] P. K. Maroju, et al., *Nature* **578**, 386–391 (2020).
[2] M. Žitnik, et al., *Optica* **9**, 692–699 (2022).
[3] K. Bučar, et al., Coherent Control of He Doubly Excited States by an Attosecond Pulse Train, v pripravi (2026).

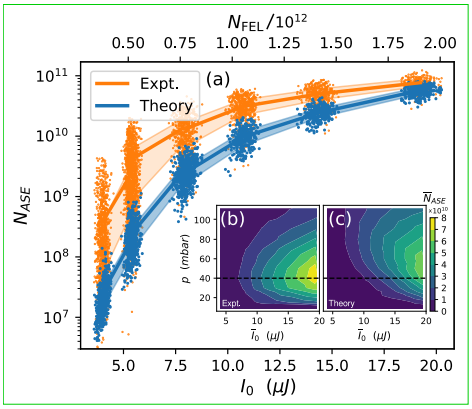
Proženje, nadzor in vidne sledi samoojačane emisije iz dvojno vzbujenih stanj helija

Janez Turnšek[1], Špela Krušič[1], Andrej Mihelič[1], Klemen Bučar[1], Emiliano Principi[3], Michele Di Fraia[3], Kevin Charles Prince[3], Marcello Coreno[3], Carlo Callegari[3], Okasan Plekan[3], Andrei Benediktovitch[4], Laurent Mercadier[5], Caterina Vozzi[6], Rebeca Martinez Vazquez[6] in Matjaž Žitnik[1,2]

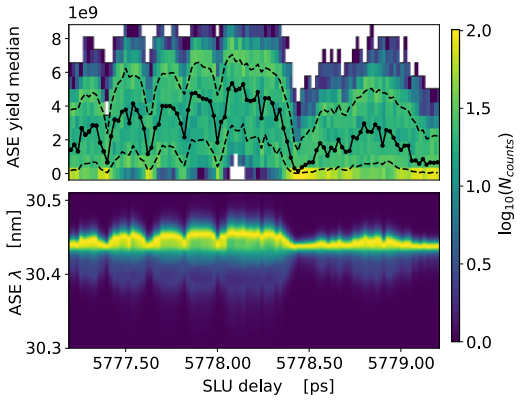
1. Odsek za fiziko nizkih in srednjih energij, IJS, Ljubljana, Slovenija
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana, Slovenija
3. Elettra-Sincrotrone Trieste SCpA, Bazovica, Italija
4. Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Nemčija
5. Eurepan XFEL GmbH, Schenefeld, Nemčija
6. CNR - Institute for Photonics and Nanotechnology, Rim, Italija

Z laserjem na proste elektrone Fermi (FEL Fermi) smo izvedli prvo meritev samoojačane spontane emisije (ASE) iz dvojno vzbujenih stanj helija. Plin smo resonančno vzbujali v stanje $3^+\ ^1P^o$ s 50 fs dolgimi svetlobnimi sunki valovne dolžine 19,47 nm. Kljub veliki verjetnosti za razpad z avtoionizacijo (99,94 % [1]), smo z močnim vzbujanjem gostega plina sprožili usmerjeni plaz spontane emisije, ki ga je predhodno napovedal naš teoretični model [2]. Preučili smo spektralno in prostorsko porazdelitev svetlobe ASE z valovno dolžino 30,43 nm, ki je nastala v stekleni mikrofluidni celici. Pri 40 mbar helija smo v povprečju izmerili (4,1 $\pm$ 1) % pretvorbe fotonov FEL v ASE [3]. Opazovali smo tudi fluorescenčni spekter v vidnem področju, ki nastane ob ohlajanju vroče helijeve plazme.

Nastanek ASE smo potrdili tudi pri vzbujanju drugih resonančnih stanj, kjer se je za najpomembnejšo lastnost izkazala velikost dipolnega momenta za vzbujanje v resonančno stanje. Najmočnejše ojačanje smo opazili pri vzbujanju kratkoživega stanja $2^+\ ^1P^o$ z razpadnim časom 18 fs. Ob dodajanju kolinearnega laserja z valovno dolžino 780 nm smo stanje 3^+ sklapljali z višjimi, dlje živečimi stanji pod pragom za ionizacijo v stanje $He^+\ 2p$. Ob tem smo opazili do 5-kratno povišanje intenzitete izsevane svetlobe ASE. Z modeliranjem razvoja vroče plazme v prvi nanosekundi po prehodu sunka FEL smo raziskali, kako se pojav ASE odraža v spektrih vidne svetlobe.



Slika 1: Vpliv intenzitete svetlobe FEL in tlaka na število izsevanih ASE fotonov



Slika 2: Vpliv časovnega zamika kolinearnega laserja na intenziteto ASE izseva

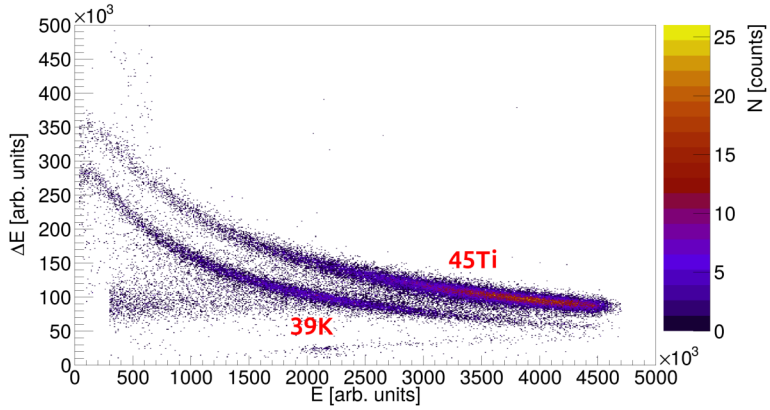
[1] A. Mihelič, PhD Thesis (2006)
[2] Š. Krušič et al., Physical Review A **107**, 013113 (2023)
[3] J. Turnšek et al., Physical Review Letters **135**, 093001 (2025)

Prvi prototip eksperimenta HISPEC-10

Gregor Košir[1], Jelena Vesić[1], Dennis Bittner[2], Klemen Žagar[1], in Matjaž Vencelj[1]

1. Odsek za fiziko nizkih in srednjih energij, IJS, Ljubljana
2. Univerza v Kölnu, Nemčija

Raziskave vzbujenih stanj nestabilnih jeder nam dajo edinstven vpogled v interakcijo med nukleoni, deformacijo jedra in izboljšajo naše razumevanje astrofizikalnih procesov. V Evropskem centru za raziskave z antiprotoni in ioni FAIR (angl. Facility for Antiproton and Ion Research) [1] se bo z uporabo pospeševalnika težkih ionov ustvarilo izredno nevtronsko bogata jedra preko katerih potekajo procesi odgovorni za nastanek trenutne številčnosti masivnih jeder.
Coulombsko vzbujanje pri nizkih energijah (nekaj MeV na nukleon) je uveljavljena metoda za študij energij vzbujenih stanj pri stabilnih izotopih, njena uporaba pri raziskavah kratkoživih jeder pa predstavlja zanimiv tehničen izziv. Močno nestabilna jedra se ustvarijo v pospeševalniku s fragmentacijo težkega ionskega žarka na lahki tarči, nastali radioizotopi nato nadaljujejo pot po žarkovni liniji z relativno visoko energijo (500 MeV na nukleon). Proces Coulombskega vzbujanje poteka optimalno pri nizko-energijskih ionskih žarkih, saj tam prevladujejo elektromagnetne interakcije. Upočasnjevanje nastalih fragmentov poveča prostorsko razpršitev, veča energijsko porazdelitev in spreminja sestavo žarka.
Rešitev teh izzivov je v novi eksperimentalni postavitvi, ki bo omogočala identifikacijo in sledenje posameznih jeder ter natančno meritev izsevanih žarkov gama. Testna različica postavitve je sestavljena iz natančnih (pikosekundnih) detektorjih časa preleta in hlajenih silicijevih detektorjev za identifikacijo preko metode ΔE-E. Prvi rezultati meritev v centru GSI/FAIR kažejo na dober potencial prototipa in nam omogočajo boljše usmeritve pri nadaljnjem razvoju detektorjev.



Slika 1: Primer meritev ločene porazdelitve ionov ^{39}K in ^{45}Ti pri metodi ΔE-E v meritvah s fragmenti, kot so bili proizvedeni v pospeševalniku centra GSI/FAIR.

[1] FAIR, Facility for Antiproton and Ion Research, https://fair-center.eu

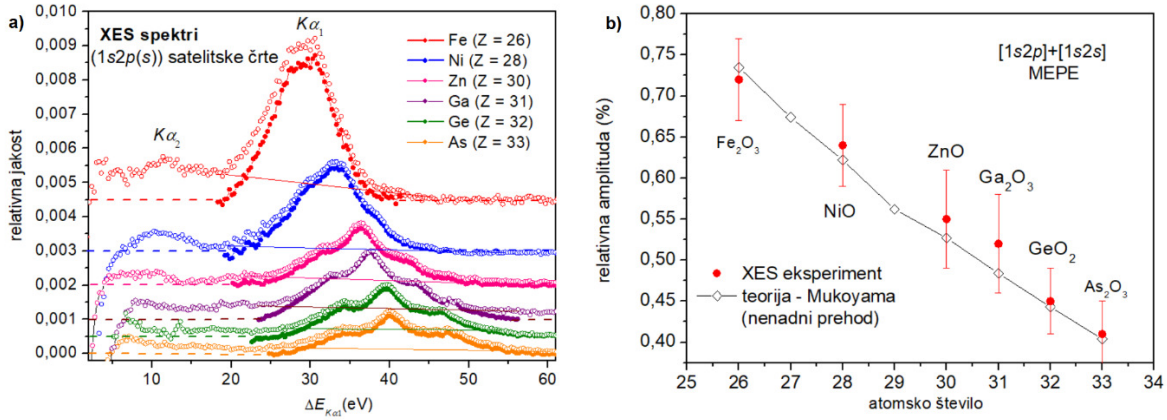
Rentgenski emisijski spektri elementov med Fe in As nad absorpcijskim robom *K*

Robert Hauko[1], Iztok Arčon[2,3], Klemen Bučar[3,4], Matjaž Kavčič[3,4], Alojz Kodre[4,3], Ksenija Maver[5], Jana Padežnik Gomilšek[1]

1. Fakulteta za strojništvo, UM, MB, 2. Univerza v Novi Gorici, NG , 3. Institut Jožef Stefan, LJ, 4. Fakulteta za matematiko in fiziko UL, LJ, 5. Univerza v Novi Gorici, Laboratorij za raziskave materialov, Ajdovščina

Sodobna energijsko visoko-ločljivostna rentgenska emisijska spektroskopija (HER-XES – High Energy Resolution X-ray Emission Spectroscopy) omogoča podrobno preučevanje procesov fotoabsorpcije in fotoemisije atoma, vključno z večelektronskimi fotovzbuditvami (MEPE – MultiElectron PhotoExcitations), tj. vzbuditvami dodatnih elektronov, ki spremljajo primarni fotoefekt. MEPE so posledica elektronskih korelacij in omogočajo test različnih teoretičnih modelov atoma. Doslej so bile eksperimentalne raziskave MEPE z rentgensko absorpcijsko spektroskopijo večinoma omejene na vzorce prostih atomov ali preprostih molekul [1-2]; v spektrih vezanih atomov je namreč prisoten dominantni strukturni signal (EXAFS), ki zakrije drobne MEPE strukture. V emisijskih spektrih pa se MEPE manifestirajo v obliki šibkih satelitskih črt, ki spremljajo glavne diagramske črte, kar omogoča lažje in zanesljivejše določanje njihovih presekov [3]. Intenzivnost posamezne satelitske črte približno odslikava verjetnost pripadajočega procesa MEPE pri izbrani energiji vzbujanja. Na relativno energijo in obliko satelitov vpliva interakcija globoke vrzeli z drugimi elektroni. Ta interakcija je še posebej močna v primerih, ko se dodatna (sovzbuditvena) vrzel in elektron nahajata na isti podlupini, kar se kaže v bogatih multipletih znotraj posameznega satelita.

Na sinhrotronski liniji P64 Petra III (DESY, Hamburg) smo z metodo HER-XES v energijskem območju $K\alpha_{1,2}$ raziskali MEPE (projekt I-20250333-EC) na elementih skupin 3*d* (Fe, Ni, Zn) in 4*p* (Ga, Ge, As). Meritve smo opravili na trdnih vzorcih iz razredčenih praškastih oksidov. S spreminjanjem vzbujevalnih energij prek energijskih pragov posameznih kanalov MEPE smo razločili satelitske črte različnih gruč vse do relativne intenzivnosti 10^{-4}. Dobro razločeni sateliti $K\alpha_{1,2}$ (1*s*2*p*,*s*) imajo še posebej bogato strukturo (slika 1a). Za to globoko MEPE gručo smo potrdili dobro ujemanje izmerjenih amplitud s teoretičnimi atomskimi izračuni, ki temeljijo na približku nenadnega prehoda (slika 1b). Rezultati raziskave so v pripravi za objavo.



Slika 1. Zaporedje satelitov (1*s*2*p*,*s*) v spektrih $K\alpha_{1,2}$ elementov 3*d* in 4*p* z bogatim multipletom zaradi interakcij dodatne vrzeli z elektroni (a) in pripadajoče MEPE amplitude otresanja (shake-off) (b).

[1] A. Kodre in drugi, Gases, Int. Tables Crystallogr, I., ch.3.23., 404 (2024).
[2] R. Hauko in drugi, Radiat. Phys. Chem. **229**, 112509 (2025).
[3] M. Kavčič in M. Žitnik, Shake-up and shake-off processes, Int. Tables Crystallogr, I., ch.5.5, 653 (2024).

Sipanje dveh pionov in resonanca ρ v kvantni kromodinamiki na mreži

Luka Jevšenak, mentor Luka Leskovec

Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Resonanca ρ se pojavi kot pol v sipalni amplitudi dveh pionov, s kvantnimi števili $J^{PC} = 1^{--}$. Naš namen je določiti lastnosti resonance ρ iz osnovnih načel kvantne kromodinamike, z metodologijo kvantne kromodinamike na mreži. Na štirih mrežah z mrežnimi razdaljami med $a = 0.114$ fm in $a = 0.068$ fm in pionsko maso od $m_\pi = 317$ MeV do $m_\pi = 175$ MeV, smo simulirali umeritvena polja in propagacijo kvarkov. Iz kvarkovskih propagatorjev smo sestavili dvo-točkovne korelacijske funkcije, ki opisujejo sipanje dveh pionov na mreži. Te smo projicirali na nerazcepne upodobitve simetrije kubične mreže Λ in nato iz njih določili energijski spekter za vse 4 mrežne konfiguracije. Na ta energijski spekter smo nato prilagajali sipalno amplitudo preko kvantizacijskega pogoja $c_{\Lambda,lm}\left[T^{-1}_{lm,lm}(E) + F_{lm,lm}(E)\right] c^\dagger_{lm,\Lambda} = 0$. Pri tem projiciramo sipalno amplitudo T iz prostora sfernih harmonikov l, m na prostor nerazcepnih upodobitev simetrije kubične mreže Λ.

Pri prilagajanju sipalne amplitude smo parametrizirali odvisnost energijskih spektrov od mrežne razdalje $E(a)$, ter odvisnost sipalne amplitude od kvarkovske mase $T(m_\pi, m_{\eta_s})$, kjer dobimo odvisnost od mase lahkih kvarkov u, d, s posredno preko mase π in η_s mezonov. To nam omogoča, da ekstrapoliramo T do kontinuumske limite pri $a = 0$ in do fizikalnih kvarkovskih mas. Iz ekstrapolirane sipalne amplitude smo izračunali fazni zamik $\delta(E)$ pri sipanju dveh pionov in določili pol v amplitudi, ki pripada resonanci ρ.

Iskanje razpada $B \to K^0_S \tau^+ \tau^-$

Ihor Prudiiev[1,2]

v imenu kolaboracije Belle II

1. Odsek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana

Prehodi $b \to s\tau^+\tau^-$ potekajo prek nevtralnih tokov s spremembo okusa, ki so v Standardnem modelu močno potlačeni in zato občutljivi na morebitne prispevke novih težkih posrednikov z močnejšimi sklopitvami z leptoni tretje generacije. [1].

Predstavljeno je iskanje redkih razpadov $B \to K^0_S \tau^+ \tau^-$ z uporabo podatkov, zbranih pri resonanci $\Upsilon(4S)$ z detektorjema Belle in Belle II na asimetričnih trkalnikih elektronov in pozitronov KEKB in SuperKEKB. Uporabljeni podatkovni vzorci ustrezajo integriranima luminoznostma $711\ \mathrm{fb}^{-1}$ za Belle in $365\ \mathrm{fb}^{-1}$ za Belle II.

V dogodkih $\Upsilon(4S) \to B\bar{B}$ je asociirani mezon $\bar{B}$ v celoti rekonstruiran v ekskluzivnih hadronskih razpadnih kanalih, kar omogoča določitev kinematike in okusa signalnega mezona B. Signalni razpad rekonstruiramo z izbiro razpadov leptona τ z enim nabitim delcem v končnem stanju. Za izboljšanje ločljivosti med signalom in ozadjem uporabimo multivariatni klasifikator ter izvedemo metodo maksimalne zanesljivosti za prilaganje diskretnih porazdelitev dogodkov njegovega izhoda v petih ortogonalnih kategorijah, določenih glede na razpadne načine $\tau^+\tau^-$.

Predstavljen je rezultat prvega iskanja redkega razpada $B^0 \to K^0_S \tau^+ \tau^-$. Ker statistično značilnega signala ne opazimo, določimo zgornjo mejo razvejitvenega razmerja $\mathcal{B}(B^0 \to K^0_S \tau^+ \tau^-) < 8.3 \times 10^{-4}$ pri 90-odstotni stopnji zaupanja. S kombinacijo tega rezultata z nedavno meritvijo razpada $B^+ \to K^+ \tau^+ \tau^-$ dobimo zgornjo mejo $\mathcal{B}(B \to K \tau^+ \tau^-) < 5.4 \times 10^{-4}$ pri 90-odstotni stopnji zaupanja. [2]. S tem postavimo doslej najstrožjo omejitev za prehode $b \to s\tau^+\tau^-$ s psevdoskalarnim kaonom v končnem stanju.

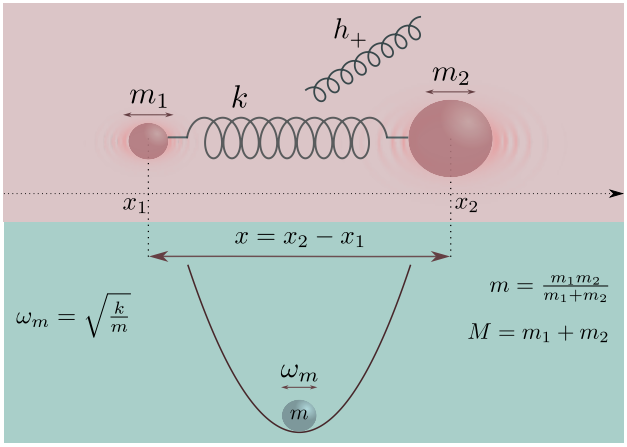
[1] B. Capdevila et al. Phys. Rev. Lett. **120**, 181802 (2018).
[2] Belle II, Belle collaborations, Phys. Rev. Lett. **137** (2026) 051805.

Šibki dekoherenčni učinki gravitonov

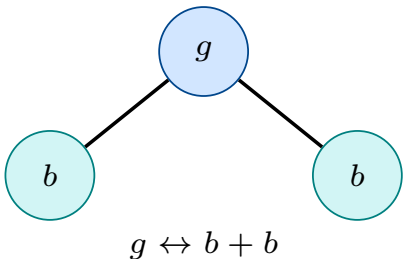
Guri K. Buza[1] in Marko Toroš[1]

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Jadranska 19, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

Razumevanje interakcije gravitacijskih valov z optomehanskimi sistemi je bilo ključno za njihovo detekcijo. Poglobljeno razumevanje interakcije med gravitacijskim sevanjem in nerelativističnimi sistemi v kvantnem režimu odpira nove možnosti za raziskovanje temeljnih fizikalnih vprašanj. V prispevku preučujemo vpliv kvantiziranih gravitacijskih valov na dekoherenco nerelativističnega kvantnega mehanskega sistema [1]. Za razliko od linearne elektromagnetne dipolne sklopitve je obravnavana gravitacijska sklopitev kvadratno odvisna od mehanskega odmika, kar omogoča dvofononske procese. Z metodami teorije odprtih kvantnih sistemov izpeljemo enačbe časovnega razvoja mehanskega sistema za različna stanja gravitonskega okolja, vključno z vakuumskimi, koherentnimi, Fockovimi, termičnimi in stisnjenimi stanji. Ugotovimo, da se v gravitonskem vakuumu določene kvantne koherence ohranijo, medtem ko vzbujena Fockova in termična stanja povečajo dekoherenco. Stisnjena stanja gravitonov omogočajo ohranitev dodatnih koherenc, koherentna stanja pa reproducirajo značilni plimski učinek klasičnih gravitacijskih valov. Kljub tem razlikam ostaja dekoherenca v realističnih fizikalnih razmerah majhna.



Slika 1: Shematski prikaz dveh sklopljenih mas v interakciji z gravitacijskim sevanjem. Njuno relativno gibanje opišemo s harmonskim oscilatorjem z reducirano maso m in frekvenco ω_m. Gravitacijski valovi se prek kvadratne plimske interakcije sklapljajo z relativno koordinato $x = x_2 - x_1$, gibanje masnega središča pa je v obravnavanem približku od relativnega gibanja neodvisno.



Slika 2: Shematski prikaz osnovnega interakcijskega vozlišča med gravitoni in mehanskimi fononi. Kvadratna plimska sklopitev omogoča pretvorbo enega gravitona (g) v dva mehanska fonona (b) in obratno. Ta kvadrupolna sklopitev omogoča dvofononske prehode med mehanskimi stanji, ki se razlikujejo za dva kvanta vzbuditve.

[1] G. K. Buza and M. Toroš, *The small effect of graviton-induced decoherence*, arXiv:2608.07257 (2026).

Dolgoživi nevtralni skalarji v gugalničnem mehanizmu tipa II

Lara Srdojević[1]

1. University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, Jadranska 19, SI-1000 Ljubljana, Slovenia

Gugalnični mehanizem tipa II je minimalna razširitev standardnega modela, v kateri elektrošibki skalarni triplet prek svoje vakuumske pričakovane vrednosti generira Majoranove mase nevtrinov. Model vodi do bogate trkalniške fenomenologije, ki vključuje nabita in nevtralna skalarna stanja. V tem delu preučujemo masne spektre, pri katerih so nevtralni skalarji lažji od svojih nabitih partnerjev. Sistematično preučimo razpadne načine in življenjske čase nevtralnih skalarjev, določimo območja z dolgoživimi delci ter raziščemo, kako skalarne sklopitve vplivajo na razmerje med vidnimi in nevidnimi razpadi. Izračunamo tudi produkcijske sipalne preseke in v napovedano število nevtralnih skalarjev vključimo kaskadne razpade nabitih skalarjev. Ti rezultati spodbujajo iskanje signalov, ki jih običajne analize takojšnjih razpadov lahko slabo pokrivajo. Naš širši cilj je sistematično obravnavati te vrzeli in izkoristiti potencial HL-LHC za preverjanje izvora nevtrinskih mas. Tako razvite strategije iskanja bi lahko omogočile tudi raziskovanje sorodnih skalarnih sektorjev v bolj razširjenih teorijah.

Vpliv kvantnih fluktuacij na razpadno širino lažnega vakuuma v limiti tanke stene

Nikiša Plešec[1,2], Miha Nemevšek[1,2] in Lorenzo Ubaldi[1]

1. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Razpad lažnega vakuuma je prehod iz metastabilnega stanja v stanje z nižjo energijo, ki se začne z nastankom mehurčka pravega vakuuma. Pojav je pomemben v fiziki osnovnih delcev, kozmologiji in fiziki kondenzirane snovi. Za izračun razpadne širine v semiklasičnem približku potrebujemo odskočno rešitev in prispevek kvantnih fluktuacij okoli nje.

Obravnavamo skalarno polje s kvartičnim potencialom in linearnim členom v limiti tanke stene, kjer sta lažni in pravi vakuum skoraj degenerirana. Izhajamo iz dosedanjih analitičnih in numeričnih rezultatov v treh in štirih dimenzijah [1,2]. Analitično obravnavo razširimo na dve dimenziji, prispevke fluktuacij k funkcionalni determinanti pa izračunamo do višjega reda razvoja po parametru tanke stene. Njihovo vsoto izvrednotimo s pomočjo Mellinove transformacije; dosledno obravnavamo renormalizacijo in odstranitev ničelnih lastnih vrednosti, ki se pojavijo zaradi translacijske simetrije.

Z izračunom do višjega reda dobimo znano potenčno odvisnost predfaktorja iz predhodnih del [3–5] in pojasnimo njegovo obliko s prispevki nizkih multipolov. Ti v razvoju v limiti tanke stene predstavljajo popravke višjega reda, medtem ko vodilni del prispevka fluktuacij tudi po renormalizaciji izhaja iz višjih multipolov.

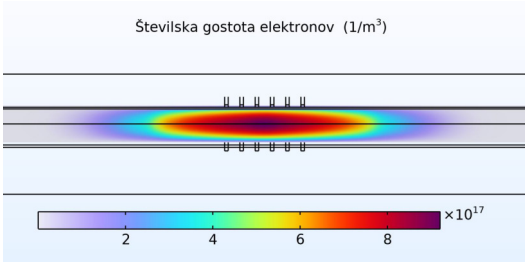
[1] A. Ivanov, M. Matteini, M. Nemevšek in L. Ubaldi, Journal of High Energy Physics **03**, 209 (2022)
[2] M. Matteini, M. Nemevšek, Y. Shoji in L. Ubaldi, Journal of High Energy Physics **04**, 120 (2025)
[3] N. J. Gunther, D. A. Nicole in D. J. Wallace, Journal of Physics A: Mathematical and General **13**, 1755 (1980)
[4] M. B. Voloshin, Yadernaya Fizika **42**, 1017 (1985)
[5] M. B. Voloshin, Physics Letters B **599**, 129 (2004)

Simulacija nizkotlačne induktivno sklopljene plazme

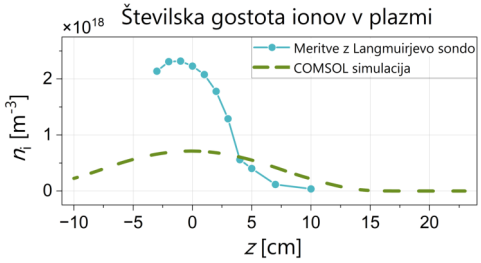
Filip Kos Maligoj[1,2], **Rok Zaplotnik**[1]

1. Odsek za tehnologijo površin, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Za napovedovanje obnašanja plazme se na področju fizike plazme pogosto uporablja simulacijsko programsko okolje COMSOL Multiphysics. V tem delu primerjamo rezultate simulacije aksialnega profila številske gostote pozitivnih ionov v nizkotlačni radiofrekvenčni argonovi plazmi z eksperimentalnimi rezultati, pridobljenimi z Langmuirjevo sondo. Med simuliranimi in izmerjenimi vrednostmi je opazno odstopanje, čeprav sta oblika profila in velikostni red številske gostote ionov primerljiva. V nadaljnjem delu bo treba prilagoditi parametre simulacijskega modela, da bi dosegli boljše ujemanje z eksperimentalnimi rezultati ter s tem izboljšali natančnost in zanesljivost simulacije pri obravnavi prihodnjih primerov.



Slika 1: Številska gostota elektronov v simuliranem plazemskem reaktorju



Slika 2: Primerjava rezultatov meritve številske gostote ionov v odvisnosti od aksialne razdalje do tuljave med fizičnimi meritvami Langmuirjeve sonde (modro) in simuliranimi rezultati (zeleno)

[1]: COMSOL Multiphysics® v. 6.4. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

Vpliv Cu in Al na fizikalne lastnosti srednje- in visokoentropijskih zlitin na osnovi CoFeNi

Jože Luzar[1,*], Stanislav Vrtnik[1,2], Andreja Jelen[1], Primož Koželj[1,2], Julia Petrović[1], Peter Mihor[1], Janez Dolinšek[1,2]

1. Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Slovenija

**joze.luzar@ijs.si*

Predstavljamo magnetne, magnetostrikcijske in električne lastnosti feromagnetnih (FM) dvofaznih srednjeentropijskih zlitin (Medium-Entropy Alloy - MEA) na osnovi $CoFeNiCu_x$ (x = 0–2,0) [1] ter jih primerjamo z literaturo, natančneje s FM trifaznimi visokoentropijskimi zlitinami (High-Entropy Alloy - HEA) na osnovi $AlCoFeNiCu_x$ (x = 0,6–3,0) [2]. Obe seriji zlitin spadata v razred supertihih FM materialov pri uporabi v izmeničnih magnetnih poljih v območju slišnih frekvenc, saj izkazujeta odlično magnetno mehkost in zanemarljivo magnetostrikcijo. Raziskali smo vlogo Al in Cu ter prepoznali fazne in mikrostrukturne značilnosti, ki so odgovorne za tako kombinacijo lastnosti. Preverili smo, ali je za optimalno supertiho delovanje nujno pravo HEA stanje – spojine s pet ali več elementi v približno ekvimolarnem razmerju. Izkazalo se je, da ima odločilno vlogo Cu, medtem ko Al na supertihost dejansko ne vpliva. Ugotovili smo, da pravo HEA stanje predstavlja prednost za doseganje odličnih supertihih lastnosti, ni pa bistveno.

[1] J. Luzar, et al. (2026), V recenziji

[2] J. Luzar, et al., Adv. Mater. Interfaces **9** (2022) 2201535.

Plazemska predobdelava preje PA6 za barvanje pri nižjih temperaturah

Juš Polanšek[1,2], Laura Martinčič[1,2], Petra Kovačič[3], Martina Modic[1], Nataša Hojnik[1], Janez Zavašnik[1], Neelakandan M. Santhosh[1,2], Vasyl Shvalya[1] in Uroš Cvelbar[1,2]

1. Odsek za plinsko elektroniko, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana
2. Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana
3. Beti d.o.o., Metlika

S plazemsko predobdelavo smo izboljšali barvanje preje iz poliamida 6 (PA6) pri 40 °C. Preizkusili smo dva sistema za neprekinjeno obdelavo preje: ravninskega s površinsko razelektritvijo in cevnega, v katerem preja potuje skozi plazmo. V obeh sistemih plazma nastaja v zraku pri atmosferskem tlaku, zato za obdelavo ne potrebujemo vakuuma ali dovajanja plinov. Preučili smo, kako hitrost pomikanja preje in električna moč vplivata na učinek obdelave.

Po obdelavi smo prejo tri minute barvali s kislim barvilom Bemacid Blue ETL pri temperaturi barvne kopeli 40 °C. Navzem barvila smo ocenili iz zmanjšanja njegove koncentracije v barvni kopeli in ga primerjali z rezultati za neobdelano prejo, barvano pri enakih pogojih. Pri primerjavah različnih pogojev plazemske obdelave je bil ocenjeni navzem pri neobdelani preji v obeh sistemih približno 14 % začetne količine barvila. Spremembe na površini vlaken smo spremljali z metodama FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy) in XPS (X-ray photoelectron spectroscopy).

V ravninskem sistemu je bil učinek največji pri hitrosti 75 m/min, kar ustreza približno 30 sekundam obdelave. V ločenih meritvah časovnega poteka barvanja je bil po treh minutah ocenjeni navzem barvila pri tako obdelani preji približno 8-krat večji kot pri neobdelani preji. Daljša obdelava je učinek zmanjšala. V cevnem sistemu je po približno 0,75-sekundni obdelavi pri hitrosti 40 m/min in električni moči 100 W v kopeli po treh minutah barvanja ostala približno 4-krat nižja koncentracija barvila kot pri neobdelani preji. Pri večji hitrosti je bil učinek manjši, prevelika moč pa je povzročila delno taljenje preje. Spektroskopske meritve kažejo na oksidacijo površine in delno odstranjevanje apreturnega sloja.

Rezultati kažejo, da lahko s plazemsko predobdelavo izboljšamo barvanje poliamidne preje pri nizki temperaturi. Pri tem je treba ustrezno izbrati moč in čas obdelave, saj daljša ali močnejša obdelava ne pomeni nujno boljšega barvanja.

Plazmonska laserska litografija brez maske neposredno na podlagah

Shafayet Yaseen[1,2], Damjan Vengust[1], Vasyl Shvalya[1,2], Uroš Cvelbar[1,2]

[1]Institut »Jožef Stefan«, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

[2]Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

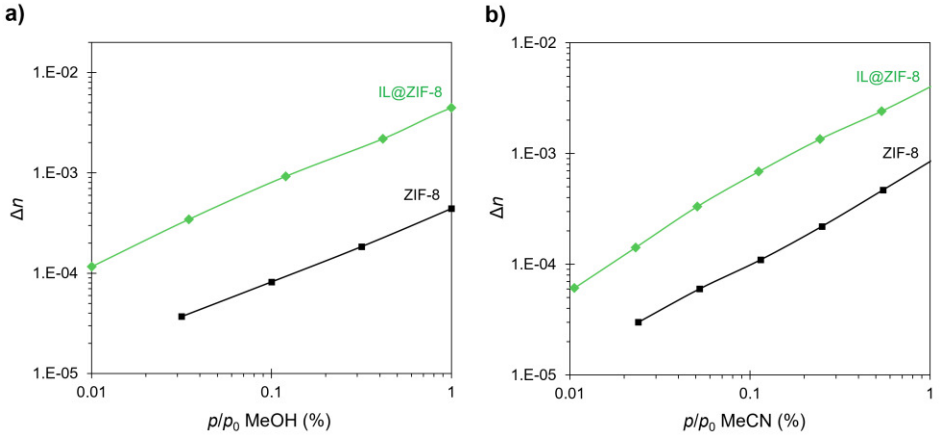
Neposredno lasersko zapisovanje vzorcev na polprevodnikih v velikem obsegu je v osnovi omejeno zaradi hitrega odvajanja toplote v podlago in zahteva laserske izvore velike moči ali pulzne laserske sisteme. V tej raziskavi predstavljamo nov postopek fototermičnega vzorčenja brez maske z majhno močjo laserja, ki omogoča zmanjšanje vpliva toplotnih izgub v podlago ob ohranjanju optične absorpcije s kombinacijo lokalizirane površinske plazmonske resonance (LSPR) in omejenega prenosa toplote na nanometrski ravni. Tanke plasti srebra (debeline od 10 do 40 nm), napršene na ravne podlage iz silicija in silicijevega dioksida ter na navpične nanostene iz aluminijevega oksida in grafena, smo žarili v peči, da so s procesom razmočenja v trdnem stanju nastali samourejeni nanodelci. Nadaljnje obsevanje z zveznim laserjem valovne dolžine 488 nm (dovedena moč 5 mW, premer laserske pege ~1 μm) je povzročilo morfološke spremembe, odvisne od vrste podlage. Medtem, ko je silicij absorbirano energijo odvajal brez vidnih strukturnih sprememb, so nanostene iz aluminijevega oksida in grafena omogočile lokalizirano zlivanje delcev, domnevno zaradi prestrukturiranja ob prisotnosti tekoče faze, ter nastanek z laserjem zapisanih utorov s širino manj kot en mikrometer. Sklopljene tridimenzionalne termooptične simulacije v programu COMSOL, ki so vključevale Bruggemanovo simetrično aproksimacijo efektivnega medija in popravke za balistični prenos toplote po Knudsenu, so pokazale, da je izrazita lokalizacija toplote posledica zmanjšane efektivne toplotne prevodnosti (približno 1,05 W/(m·K) za nanostene iz aluminijevega oksida). Časovno odvisne izpostavitve laserskemu obsevanju (1–9 s) nakazujejo, da sta lokalno širjenje utorov in razpad robov delcev lahko posledica površinskih nestabilnosti tipa Rayleigh–Plateau ter dodatnega odvajanja toplote vzdolž sintranih prevodnih poti. Ta fizikalna opažanja nakazujejo kvantitativna merila za načrtovanje energijsko učinkovitega in hitrega fototermičnega procesa na nanostrukturiranih podlagah.

Izboljšanje odziva senzorjev na osnovi nanoporoznih tankih plasti z vključevanjem ionskih tekočin

Urška Gazdag[1,2] in Aleksander Matavž[1]

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, UL, Ljubljana

Zaznavanje hlapnih organskih spojin je pomembno tako v delovnih kot v domačih okoljih, vendar komercialni senzorji ne dosegajo zadostne občutljivosti in selektivnosti za zaznavanje kompleksnih vzorcev z veliko interferenčnimi spojinami [1]. Senzorji na osnovi kovinsko-organskih ogrodij (MOF-ov) kažejo zelo dobre odzive na že zelo nizke koncentracije plinastih zvrsti, njihovo občutljivost in selektivnost pa lahko dodatno izboljšamo z vključitvijo gostujočih spojin, kot so ionske tekočine (IL). Te s svojo ionsko naravo in visoko električno prevodnostjo izboljšajo interakcije kompozitne IL@MOF plasti s polarnimi zvrstmi, kar vpliva na adsorpcijske lastnosti materiala [2]. Z uporabo sinteze v parni fazi je mogoče IL pripraviti neposredno iz prekurzorjev znotraj ogrodja. Delež zapolnitve por z IL, ki je odvisen od parametrov sinteze, pa določa adsorpcijske in električne lastnosti kompozitne plasti. V tem delu smo pripravili tanke plasti zeolitno-imidazolatnega ogrodja ZIF-8 z različnimi vsebnostmi IL 1-butil-3-metilimidazolijevega bromida ([bmim]Br) in pomerili njihov odziv na izbrane plinaste zvrsti z meritvami elipsometrične porozimetrije in dielektrične spektroskopije. Rezultati kažejo, da vključevanje IL v ZIF-8 ugodno vpliva na adsorpcijo polarnih plinastih zvrsti v območju razredčenja v primerjavi z nemodificiranim ogrodjem.



Slika 1: Primerjava adsorpcijskih izoterm metanola (a) in acetonitrila (b).

[1] A. Matavž, *et al.*, Nat. Commun., **16**, 8347 (2025)
[2] M. Obst, *et al.*, Inorg. Chem., **61**(43), 17137-17143 (2022)

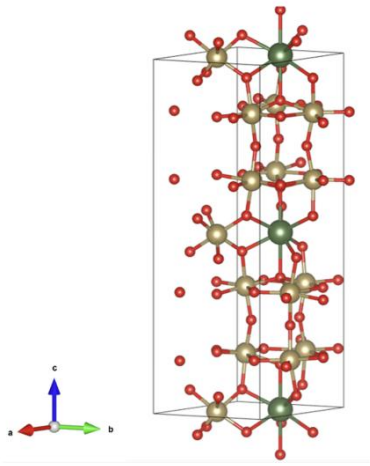
Mionska mesta in vpliv mionov na kristalna električna polja v kvantnem magnetu $ErTa_7O_{19}$

Marcel Malovrh[1, 2] in Matjaž Gomilšek[1, 2]

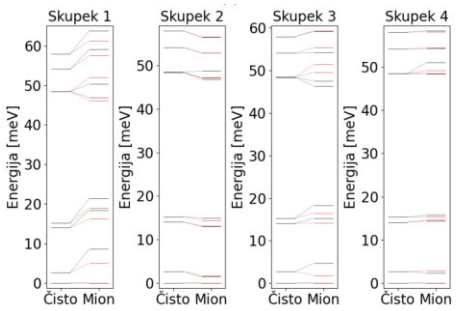
1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Mionska spektroskopija je močno orodje za preučevanje magnetnih materialov [1], vendar se pri njeni uporabi postavlja vprašanje, ali mion kot nabit delec morda svoje lokalne okolice ne preoblikuje tako močno, da rezultati meritev ne odražajo več stanja čistega kristala [2]. V sistemu $ErTa_7O_{19}$ (ETO, glej sliko 1) elastično nevtronsko sipanje pri nizkih temperaturah zazna eksotičen magnetni red (ki pa pri še nižjih temperaturah nepričakovano izgine), mionska spektroskopija pa reda ne zazna pri nobeni temperaturi [3, 4]. Z računskimi simulacijami smo preverili, ali bi lahko bilo to neskladje posledica preoblikovanja kristalne okolice zaradi miona. Rezultati so del članka [3] in magistrskega dela [4].

S teorijo gostotnih funkcionalov (DFT) smo določili mesta ustavljanja mionov v ETO in deformacijo kristala v njihovi okolici. Nato smo s formalizmom Stevensovih operatorjev izračunali spremembe kristalnega polja na magnetnih ionih Er^{3+}, in sicer v modelu točkastega naboja (ves naboj zbran na mestih ionov) ter v modelu porazdeljenega naboja, ki upošteva prostorsko porazdelitev elektronske gostote. Uvedli smo tudi nov postopek, s katerim iz rezultatov DFT izračunamo popravke Stevensovih koeficientov zaradi miona in jih prištejemo eksperimentalnim vrednostim za čisti kristal. Za ione Er^{3+} v bližini miona napovemo znatne spremembe kristalnih nivojev (slika 2) in lokalnih g tenzorjev. To nakazuje, da mion ETO kristal preoblikuje dovolj močno, da bi to lahko pojasnilo neskladje med meritvami z nevtroni in mioni.



Slika 1: Osnovna celica kristala ETO.



Slika 2: Energijski nivoji kristalnega električnega polja ionov Er^{3+} v ETO brez (levo) in z (desno) prisotnostjo miona za 4 različna mesta ustavljanja miona. Črna črta je za najbližji ion Er^{3+}, rdeča za pa drugega najbližjega.

[1] S. Blundell *et al.*, »Muon Spectroscopy: An Introduction«, Oxford University Press (2021).
[2] T. Lancaster *et al.*, »Playing quantum hide-and-seek with the muon: localizing muon stopping sites«, *Phys. Scr.* **88**, 068510 (2013).
[3] K. Jaksetič *et al.*, »Melting upon cooling in a quantum magnet«, arXiv:2605.04611 (2026).
[4] M. Malovrh, »Mionska mesta in vpliv mionov na kristalna električna polja v kvantnem magnetu $ErTa_7O_{19}$«, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko (2026).

Nekonvencionalni magnetizem v srednjeentropijskih zlitinah iz lahkih redkih zemelj $Ce_xPrNdSm$

Julia Petrović[1], Stanislav Vrtnik[1,2], Andreja Jelen[1], Primož Koželj[1,2], Jože Luzar[1], Peter Mihor[1], Janez Dolinšek[1,2]

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Srednjeentropijske zlitine na osnovi lahkih redkozemeljskih elementov predstavljajo še razmeroma neraziskano skupino materialov, pri katerih lahko konkurenca med izmenjalnimi interakcijami, kristalnim poljem in kemijsko neurejenostjo vodi do kompleksnih magnetnih stanj. Pri lahkih redkih zemljah ima kristalno polje posebej pomembno vlogo, saj lahko pri nizkih temperaturah močno zmanjša ali celo odpravi lokalne magnetne momente.

V tem delu predstavljamo raziskavo srednjeentropijskih zlitin $Ce_xPrNdSm$ z nominalnimi koncentracijami Ce x = 0,01, 0,1, 0,2, 1,0 in 1,5 [1]. Vse sestave tvorijo enofazno trdno raztopino z dvojno heksagonalno gosto zloženo (dhcp) strukturo. Magnetne lastnosti smo raziskali z meritvami enosmerne in izmenične magnetne susceptibilnosti ter magnetizacije v odvisnosti od magnetnega polja, dopolnjenimi z meritvami magnetoupornosti. Pri nizkih temperaturah se vzpostavi magnetno nehomogeno stanje, sestavljeno iz paramagnetnih območij in magnetno frustriranih spinskih skupkov z značilnostmi spinskega stekla. Pri nizkih koncentracijah Ce skupki spominjajo na kanonična spinska stekla, medtem ko se pri x = 1,0 in 1,5 dodatno pojavijo ferrimagnetno urejeni skupki z neničelno spontano magnetizacijo. Z naraščajočo vsebnostjo Ce se temperatura zamrznitve spinov znižuje, spinska dinamika pa se pospešuje, kar kaže na postopno oslabitev povprečne izmenjalne sklopitve.

[1] J. Petrović et al., Materials Today Communications **51**, 114898 (2026)

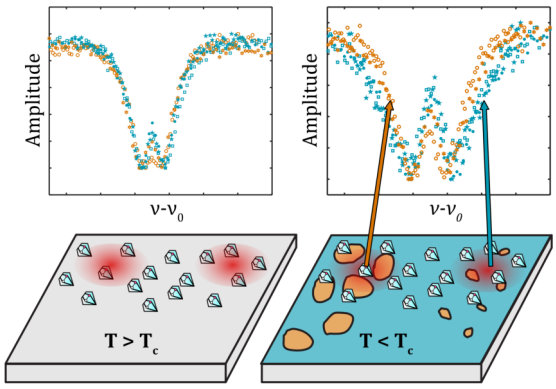
Spremljanje fazne separacije z meritviami šibkega magnetizma v $CaFe_3O_5$

Izidor Benedičič[1], J. Paul Attfield[1,2] in Denis Arčon[3]

1. Odsek za kompleksno snov, IJS, Ljubljana
2. School of Chemistry, University of Edinburgh, Edinburgh
3. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Razumevanje interakcij med različnimi prostostnimi stopnjami v snoveh z močnim elektronskimi korelacijami je že zelo star problem v fiziki kondenzirane snovi, in dopiranje oksidov prehodnih kovin je široko uporabljena metoda za nadzorovano spreminjanje osnovnega stanja. Sklopitev spinskih in mrežnih prostostnih stanj ima še posebej dramatične posledice v $CaFe_3O_5$, ki že pri zelo majhnem dopiranju spremeni magnetno osnovno stanje, kar zaradi močne spinsko-mrežne sklopitve spremlja fazna separacija na domene z različno ureditvijo oksidacijskih stanj železovih ionov [1,2]. Za razumevanje mehanizmov fazne separacije so nepogrešljive lokalne spektroskopske metode, ki pa imajo svoje omejitve, še posebej kadar ni mogoče sintetizirati kakovostnih kristalov.

V pričujočem delu uporabljamo kvantno magnetometrijo na osnove centrov dušik-praznina v nanodiamantih, vtisnjenih v tableto iz praškastega $CaMn_{0.01}Fe_{2.99}O_5$, za meritve statičnega in dinamičnega magnetnega polja na površini. Iz razcepa in razširitev absorpcijskih črt v spektru optično zaznane magnetne resonance smo potrdili prisotnost šibke feromagnetne komponente, ki spremlja eno od elektronskih faz v dopiranem $CaFe_3O_5$. Magnetni izvor prehoda smo potrdili z meritvijo spinsko-mrežnega relaksacijskega časa T_1, ki se na prehodu skrajša za faktor 5, kar kaže na ojačanje spinskih fluktuacij. S pomočjo modeliranja absorpcije v ansamblu naključno orientiranih nanodiamantov smo rekonstruirali povprečno magnetno polje na mestu meritve in ocenili relativni delež šibko feromagnetne elektronske faze na več mestih na vzorcu. Uspešna detekcija magnetnega prehoda in fazne separacije dokazuje uporabnost dostopne magnetometrije z nanodiamanti v raziskavah močno heterogenih koreliranih snovi.



Slika 1: Detekcija fazne separacije preko širitve absorpcijskega spektra.

[1] K. H. Hong *et al*, Nature Communications **9**, 2975 (2018)
[2] M. J. Milton *et al*, Phys. Rev. Mater. **8**, 124408 (2024)

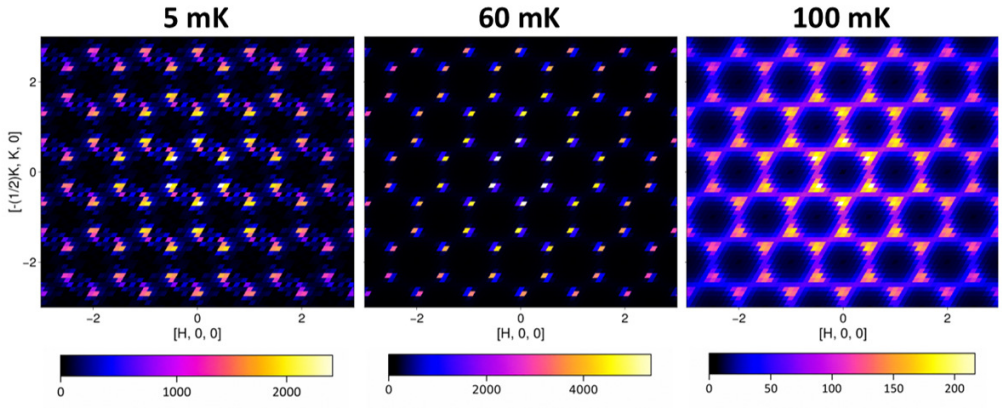
Simulacije kvantnega magneta $ErTa_7O_{19}$ s klasičnimi spinskimi pristopi

Aljaž Krivograd[1,2], Matjaž Gomilšek[1,2] in Matej Pregelj[1,2]

1. Odsek za fiziko trdne snovi F5, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Popoln kvantnomehanski opis kvantnega magneta je pogosto računsko zelo zahteven, saj kompleksnost problema hitro narašča z velikostjo sistema. Alternativa je klasični pristop, pri katerem magnetne momente obravnavamo kot klasične spinske vektorje. Takšen opis omogoča simulacije bistveno večjih sistemov in učinkovito proučevanje temperaturne odvisnosti, magnetnega urejanja in termodinamskih lastnosti. Cena za to je sicer izguba kvantnih pojavov, kot so kvantne fluktuacije, superpozicija in kvantna prepletenost, a so kljub temu rezultati pogosto vsaj kvalitativno pravilni. V tem delu smo s programsko knjižnico Sunny [1] uporabili klasični pristop za numerično simulacijo magnetnih lastnosti frustriranega kvantnega magneta $ErTa_7O_{19}$ (ETO) [2, 3] in preverili, v kolikšni meri je mogoče njegove eksperimentalno opažene lastnosti (eksotično izgubo magnetnega reda pri $T \approx 25\,\mathrm{mK}$ [2]) opisati s klasičnim modelom.

Sistem kristala ETO smo termalizirali z Langevinovo dinamiko. Iz podatkov termalizacije smo določili povprečno magnetizacijo na magnetni moment pri različnih temperaturah in vrednostih zunanjega magnetnega polja ter na tej osnovi izdelali fazni diagram ETO. Rezultati simulacij kažejo presenetljivo dobro ujemanje z eksperimentalnimi meritvami [2]. To nakazuje, da je mogoče magnetni odziv sistema v veliki meri opisati že s klasičnim spinskim modelom. Dobro ujemanje med simulacijo in eksperimentom smo opazili tudi pri temperaturni odvisnosti specifične toplote. Poleg termodinamskih lastnosti pa smo s programom uspešno simulirali tudi elastično nevtronsko sipanje v različnih magnetnih fazah (Slika 1), s čimer smo preverili, ali klasični model pravilno reproducira magnetni red pri vmesnih temperaturah in njegovo izgubo pri najnižjih, kot ga napovedujejo druge simulacije in potrjujejo eksperimentalne meritve [2, 3].



Slika 1: Simulacija elastičnega sipanja nevtronov na ETO. Pri $100\,\mathrm{mK}$ (desno) je sistem v paramagnetnem stanju, okoli $60\,\mathrm{mK}$ (sredina) opazimo prehod v magnetno urejeno stanje, ki nato nepričakovano preide v stanje magnetnega nereda pri še nižjih temperaturah (levo, pri $5\,\mathrm{mK}$).

[1] `https://github.com/SunnySuite/Sunny.jl` (DOSTOPANO 7. 10. 2026)
[2] K. Jaksetič *et al.*, "Melting upon cooling in a quantum magnet," arXiv:2605.04611 (2026).
[3] M. Malovrh, "Mionska mesta in vpliv mionov na kristalna električna polja v kvantnem magnetu $ErTa_7O_{19}$," magistrsko delo, UL FMF (2026).

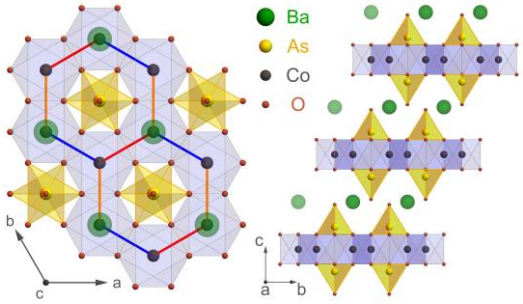
Frakcionalizacija v frustriranem kvantnem magnetu $BaCo_2(AsO_4)_2$

Maj Mejak[1] in Martin Klanjšek[1]

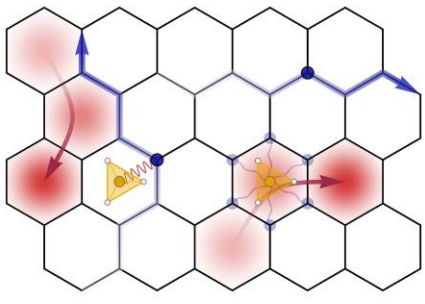
1. Odsek za fiziko trdne snovi F5, IJS, Ljubljana

Kljub svoji enostavnosti lahko lokalizirane spinske prostostne stopnje v magnetnih izolatorjih gostijo številna nenavadna stanja. Še posebej so zanimivi frustrirani spinski sistemi, kjer si izmenjalne interakcije med pari spinov med seboj nasprotujejo, kar zavira nastanek običajne magnetne ureditve in pod vplivom kvantnih fluktuacij lahko vodi do nastanka kvantne spinske tekočine [1]. Eksperimentalne raziskave frustriranih magnetov na mreži satovja so še posebej motivirane s strani spinskega modela Kitaeva [2], ki je eden redkih analitično rešljivih modelov kvantne spinske tekočine s perspektivnimi možnostmi realizacije v materialih. Za stanje kvantne spinske tekočine je značilna eksotična narava njenih vzbuditev, ki nosijo le del originalnih spinskih prostostnih stopenj. Temu pojavu pravimo frakcionalizacija in ravno tovrstne vzbuditve predstavljajo ključni eksperimentalni znak fizike spinskih tekočin v kvantnih magnetih [1].

V eksperimentalni raziskavi kvantnega magneta $BaCo_2(AsO_4)_2$ (slika 1), ki je obetaven kandidat za realizacijo anizotropne izmenjalne interakcije v modelu Kitaeva, z jedrsko magnetno resonanco (NMR) analiziramo vpliv temperature in magnetnega polja na lastnosti spinskih vzbuditev kobaltovih ionov na mreži satovja. Merjenje temperaturne odvisnosti spinsko-mrežne relaksacijske hitrosti $1/T_1$ nam omogoča vpogled v dinamiko in energijsko skalo osnovnih vzbuditev magnetnega sistema. Čeprav $BaCo_2(AsO_4)_2$ zaradi ostalih izmenjalnih interakcij ne realizira spinske tekočine Kitaeva, se v polarizirani fazi poleg kontinuuma vzbuditev opazi pri nizkih temperaturah tudi nenavadne počasne kolektivne magnetne vzbuditve z zelo majhno energijo. Lastnosti teh eksotičnih nizkoenergijskih ekscitacij, ki jih druge eksperimentalne metode niso opazile, se skladajo s fiziko vizonskih polaronov. To so hibridne vzbuditve sestavljene iz heksagonalnih topoloških Z_2 fluksov in spinonskega oblaka (slika 2), ki jih v modelu Kitaeva z dodatnimi interakciji napovedujejo teoretični izračuni [3].



Slika 1: Kristalna struktura $BaCo_2(AsO_4)_2$, kjer kobaltovi Co^{2+} ioni tvorijo mrežo satovja.



Slika 2: Shematski prikaz frakcionaliziranih vzbuditev v $BaCo_2(AsO_4)_2$.

[1] L. Balents, Nature **464**, 199 (2010)
[2] A. Kitaev, Annals of Physics **321**, 2 (2006)
[3] A. P. Joy and A. Rosch, Phys. Rev. X **12**, 041004 (2022)

Eksotični magnetizem in vztrajna spinska dinamika v frustriranem antiferomagnetu trikotne mreže z $J_{\text{eff}} = \frac{1}{2}$

Kevin Jaksetič[1,2], Madan Barman[3], Matej Pregelj[1,2], Manh Duc Le[4], Peter J. Baker[4], Andrej Zorko[1,2] in Panchanan Khuntia[3,5]

1. Odsek za fiziko trdne snovi F5, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. Department of Physics, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, 600036, India
4. ISIS facility, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, OX11 0QX, Oxfordshire, UK
5. Quantum Centre of Excellence for Diamond and Emergent Materials, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, 600036, India

Kombinacija anizotropije in močnih kvantnih fluktuacij zaradi frustracije v antiferomagnetih redkih zemelj s trikotno mrežo in efektivnim spinom $J_{\text{eff}} = 1/2$ ponuja obetavno izhodišče za eksperimentalno raziskovanje eksotičnih kvantnih stanj z netrivialnimi nizkoenergijskimi vzbuditvami.

Predstavljamo rezultate termodinamskih meritev, neelastičnega nevtronskega sipanja (INS) in mionske spinske spektroskopije (μSR) frustriranega magneta $K_3NdTe_2O_9$, v katerem ioni Nd^{3+} tvorijo idealno trikotno mrežo. Meritve razkrivajo, da so osnovno stanje Kramerjevi dubleti z efektivnimi magnetnimi momenti $J_{\text{eff}} = 1/2$, ki so dobro ločeni od prvega vzbujenega stanja, in so med sabo antiferomagnetno sklopljeni z izmenjalno interakcijo 600 mK med momenti Nd^{3+} v trikotni ravnini. Odsotnost oscilacij in t. i. "1/3-platoja" v signalu μSR vse do 50 mK (brez dodanega zunanjega magnetnega polja), izključuje tako magnetni red dolgega dosega, kot tudi zamrznitev spinov na časovni skali μSR. Izmerjeno temperaturno odvisnost hitrosti depolarizacije spinov pri μSR v odsotnosti zunanjega magnetnega polja dobro opiše Orbachov mehanizem depolarizacije, kar kaže na obstoj fluktuirajočih magnetnih momentov v osnovnem stanju tega frustriranega magneta. Naši rezultati kažejo na obstoj eksotičnega magnetizma s spinskimi korelacijami kratkega dosega, ter spinsko dinamiko, ki vztraja vse do najnižje dosežene temperature 50 mK. Te ugotovitve uveljavljajo to novo družino frustriranih antiferomagnetov redkih zemelj s trikotno mrežo kot obetavno področje za eksperimentalno realizacijo netrivialnih kvantnih stanj z eksotičnimi nizkoenergijskimi vzbuditvami.

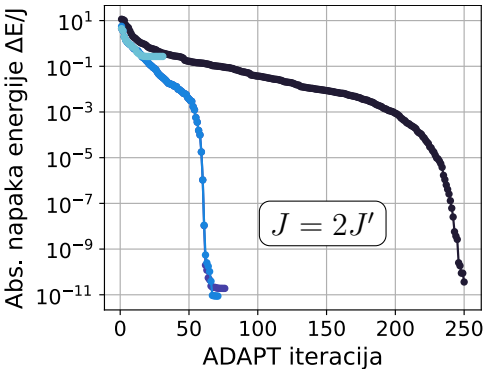
Simulacija spinskih sistemov z variacijskimi kvantnimi algoritmi

Matija Marolt[1] in Matjaž Gomilšek[1,2]

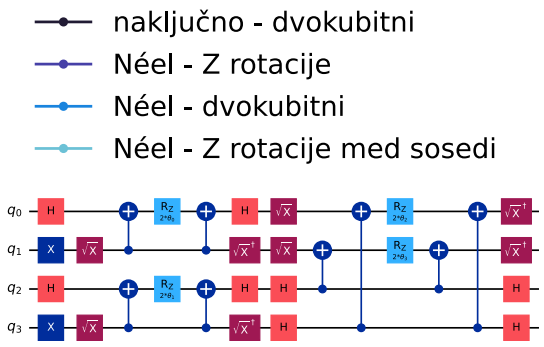
1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Simulacija kvantnih sistemov je ena najbolj obetavnih uporab kvantnih računalnikov v dobi šumnih kvantnih računalnikov srednjih velikosti (angl. Noisy Intermediate-Scale Quantum, NISQ). Stanje N spinov $1/2$ lahko na primer zapišemo z N kubiti, medtem ko bi za klasični opis potrebovali 2^N kompleksnih amplitud, poleg tega lahko s kubiti ohranimo poln kvantnomehanski opis sistema brez numeričnih aproksimacij.

Ker trenutno obstoječi kvantni računalniki omogočajo le omejeno število kubitov in kvantnih vrat, preden postanejo rezultati že preveč zašumljeni, v praksi uporabljamo hibridne algoritme, ki združujejo klasične in kvantne računalnike. Eden takih je variacijski kvantni reševalnik lastnih problemov (VQE) [1]. Kvantni računalnik iz izbranega začetnega stanja in parametriziranega nastavka (Slika 2) pripravi preizkusno stanje ter izmeri ciljne opazljivke (na primer energijo), klasični računalnik pa z minimizacijskim algoritmom poišče parametre, ki tako izmerjeno energijo minimizirajo. S tem VQE poišče osnovno stanje sistema. Pri adaptivni različici, ADAPT-VQE [2], nastavek gradimo postopoma. V vsaki iteraciji mu dodamo operator iz vnaprej izbranega nabora, ki ima največji gradient energije. Z ADAPT-VQE smo v simulacijah brez šuma na klasičnem računalniku iskali osnovno stanje Heisenbergove verige spinov 1/2 s sklopitvama J med najbližjimi in J' med drugimi najbližjimi sosedi za različne dolžine verige. Slika 1 prikazuje konvergenco za verigo sedmih spinov z razmerjem sklopitev $J = 2J'$. Z Néelovim začetnim stanjem in naborom dvokubitnih operatorjev ali naborom Z rotacij dosežemo napako energije $\approx 10^{-11}$ v približno 70 iteracijah, z naključnim začetnim stanjem pa jih potrebujemo okoli 250. Če uporabimo Néelovo začetno stanje in nabor zgolj Z rotacij med sosedi, se algoritem ustali pri visoki napaki.



Slika 1: Konvergenca algoritma ADAPT-VQE za verigo 7 spinov pri različnih naborih operatorjev in začetnih stanjih.



Slika 2: Primer parametriziranega kvantnega vezja za 4 spine z Néelovim začetnim stanjem.

[1] J. Tilly, H. Chen, S. Cao, D. Picozzi, K. Setia, Y. Li *et al.*, The Variational Quantum Eigensolver: A review of methods and best practices, Physics Reports **986**, 1–128 (2022)
[2] H. R. Grimsley, S. E. Economou *et al.*, An adaptive variational algorithm for exact molecular simulations on a quantum computer, Nature Communications **10**, 3007 (2019)

Odtis skritega vala gostote naboja v ultrahitri fotovzbujeni reflektivnost v $Pb(TaSe_2)_2$

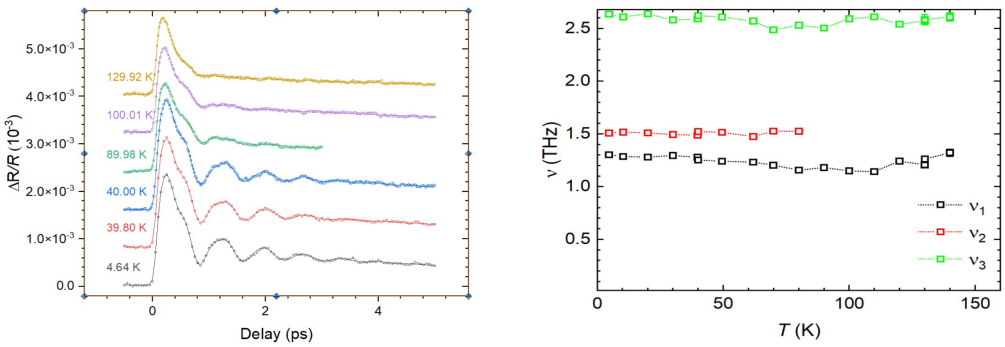
Jaka Strohsack[1], X. Yang[2], C. Jiang[2], Z. A. Xu[2], Tomaž Mertelj[1,3]

1. Odsek za kompleksno snov, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenija
2. Zhejiang Province Key Laboratory of Quantum Technology and Device, Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P. R. China
3. Center odličnosti nanoznanosti in nanotehnologije, Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

Plastoviti dihalkogenidi prehodnih kovin so zanimivi zaradi raznolikih elektronskih in optičnih lastnosti, ki so posledica znižane dimenzionalnosti v kombinaciji z elektronskimi korelacijami in elektronsko-fononsko sklopitvijo. Na njihove elektronske lastnosti lahko vplivamo tudi z interkalacijo različnih atomov med plasti.

Med bolj zanimive sisteme sodi tudi tantalov diselenid ($TaSe_2$) interkaliran s svincem (Pb). V $PbTaSe_2$, kjer interkalacija močno vpliva na elektronske lastnosti [1]. Val gostote naboja (VGN) izgine, superprevodna kritična temperatura pa se glede na neinterkalirani 2*H*-$TaSe_2$, kjer je prehod pri $T_c \sim 0.15$ K, dvigne na $T_c \sim 3.7$ K. Poleg tega elektronska struktura kaže topološke lastnosti [2] saj inetrkalirane plasti Pb tvorijo mrežo podobno grafenu.

Nedavno so naši sodelavci uspeli sintetizirati monokristale $Pb_{0.5}Ta_{1+x}Se_2$ [3], kjer je Pb interkaliran med pare ravnin TaS_2. Spojina kaže dva strukturna prehoda prvega reda med $T \sim 200$-250 K in superprevodnost pod $T_c \sim 2$ K. Podobno kot v $PbTaSe_2$ transportne meritve ne kažejo prisotnosti VGN. Potencialno prisotnost VGN smo zato raziskali z ultrahitro časovno-ločljivo optično spektroskopijo. Z meritvami temperaturne in fluenčne odvisnosti fotoinducirane ultrahitre prehodne optične reflektivnosti, smo odkrili dinamični odtis stanja VGN pod $T \sim 140$ K, ki še ni bilo opaženo z drugimi merilnimi tehnikami. V našem primeru lahko izključimo kontaminacijo vzorcev s čistimi fazami 2*H*-$TaSe_2$ in 1*T*-$TaSe_2$, kjer so stanja VGN dobro raziskana, saj temperaturna in fluenčna odvisnost ultrahitre dinamike ni enaka. Izkaže pa se, da so frekvence koherentnih nihanj v stanju VGN podobne frekvencam v dvoplastnih nano-luskah 2*H*-$TaSe_2$.



Slika 1: Prehodna optična odbojnost po optičnem vzbujanju pri nekaj izbranih temperaturah (levo). Temperaturna odvisnost frekvence koherentnih nihanj (desno).

[1] M. N. Ali *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 020505 (2014).
[2] G. Bian *et al.*, Nat Commun **7**, 10556 (2016).
[3] X. Yang *et al.*, Advanced Materials **34**, 2108550 (2022).

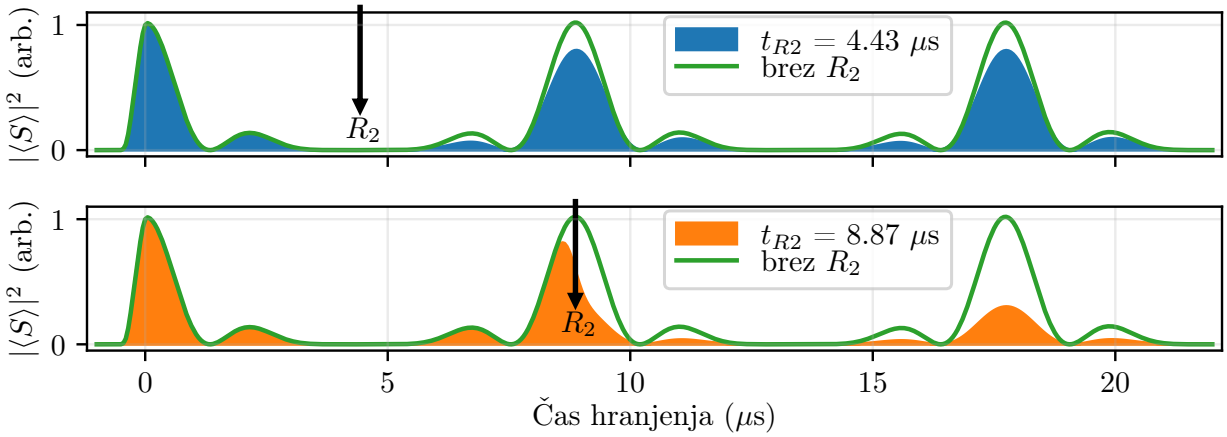
Simulacija kvantnega pomnilnika v alkalijskih atomih

Bor Luka Urlep[1,2], Gaja Šalamun[1,2], Matevž Vaupotič[1,2], Katja Gosar[1,2], Jure Pirman[1,2], Erik Zupanič[1,3], Peter Jeglič[1]

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. AtomQL, Ljubljana

Tri enoelektronska lastna stanja alkalijskega atoma, kjer je prepovedan prehod med njegovima energijsko nižjima stanjema, spominskim $|s\rangle$ in osnovnim $|g\rangle$, sklopimo z dvema laserskima žarkoma v shemo oblike Λ – vzbujeno lastno stanje $|e\rangle$ močno sklaplja kontrolni žarek s $|s\rangle$, signalni žarek pa šibko z $|g\rangle$. Plin takšnih atomov najprej obsevamo s kontrolnim žarkom, nato pa ga še s pulzom signalnega žarka. Zaradi elektromagnetno vzbujene prosojnosti (EIT) se signalni žarek več ne absorbira v plinu, temveč potuje skozenj z zmanjšano skupinsko hitrostjo. Medtem adiabatsko izklopimo kontrolni žarek in signalni pulz se prepiše v koherenco med $|g\rangle$ in $|s\rangle$. Takšna superpozicija elektromagnetnega in atomskega dela signala, razmerje med katerima določimo z močjo kontrolnega žarka, se imenuje polariton temnega stanja (DSP). Spominsko stanje se tako popolnoma razklopi od preostanka sistema, zato mu pravimo temno stanje; s svetlim stanjem sestavljata bazo v svetlobo oblečenih stanj. Po določenem času atome ponovno obsevamo z adiabatskim kontrolnim pulzom, ob čemer se koherentno izseva hranjeni signal, ki ga tako preberemo.

V homogenem magnetnem polju se lastna stanja atoma zeemansko razcepijo v energiji in iz ene sheme Λ nastane več različnih shem. Pripadajoče koherence med $|g\rangle$ in $|s\rangle$ imajo različne frekvence in med seboj interferirajo [1]. Njihov z žarki neobsevan časovni razvoj je atomski del DSP, spinski val amplitude S. Njegova intenziteta je sorazmerna s količino signala, ki jo atom ob branju koherentno izseva. Ob vsakem času hranjenja jo lahko interpretiramo kot signal, prebran s kontrolnim žarkom R_1 (slika, polna črta). Periodični maksimumi intenzitete, ki jih imenujemo ponovne oživitve, se pojavijo, ko se superpozicija koherenc vrne v začetno temno koherenco. Povsod drugod se ob vklopu kontrolnega žarka koherence sklapljajo z vzbujenim stanjem, prek katerega se nekoherentno izsevajo – to imenujemo kolaps. Na sliki vidimo, da uvedba še drugega bralnega pulza R_2 med kolapsom (zgoraj) manj vpliva na intenziteto spinskega vala kot med ponovno oživitvijo (spodaj). Če pa na atome zapišemo drugi signal, lahko v primeru, da smo ga zapisali na kolaps, pozneje izbiramo, kateri signal beremo. Če smo ga zapisali na ponovno oživitev, oba signala preberemo sinhrono. Takšne eksperimente modeliramo z Maxwell-Blochovimi enačbami na zeemansko razcepljeni hiperfini strukturi alkalijskih atomov, jih numerično simuliramo in primerjamo z laboratorijskimi meritvami.



Simulacija intenzitete spinskega vala na prehodu D_2 v ^{87}Rb z drugim bralnim pulzom R_2 (zapolnjeno) ob času t_{R2} (puščici) med kolapsom (zgoraj) in med ponovno oživitvijo (spodaj) ter brez R_2 (nezapolnjeno).

[1] Katja Gosar, Vesna Pirc Jevšenak, Tadej Mežnaršič, Samo Beguš, Tomasz Krehlik, Dušan Ponikvar, Erik Zupanič in Peter Jeglič, Suppression of dark-state polariton collapses in cold-atom quantum memory, Physical Review A **108**, 032618 (2023).

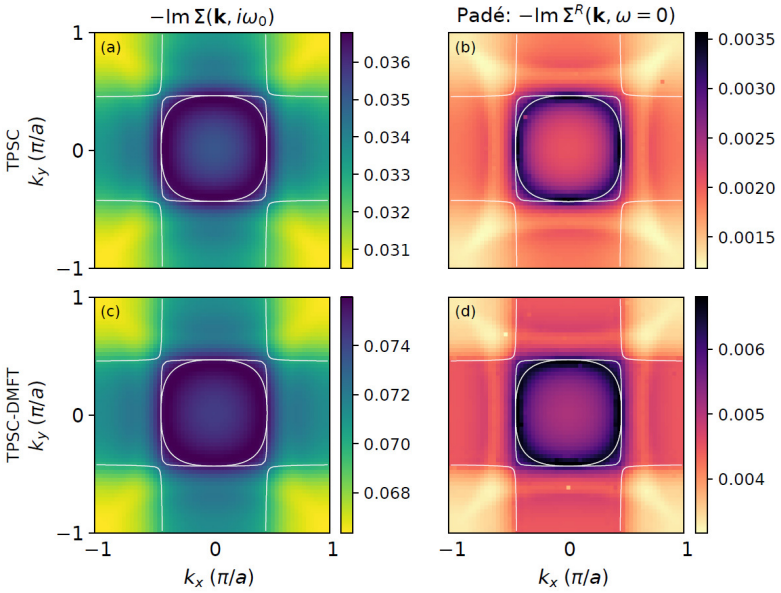
Momentna odvisnost lastne energije v šibko koreliranih d^1 perovskitnih oksidih $SrVO_3$, $SrNbO_3$ in $SrTaO_3$

Mario Pezer[1,2], Niklas Notter[3], Xaver Landerl[3], Markus Aichhorn[3], Jernej Mravlje[1,2]

1. Odsek za teoretično fiziko F1, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. Institut für Theoretische Physik, Technische Universität Graz, Petersgasse 16, 8010 Graz, Austria

Družina d^1 perovskitnih oksidov ABO_3 (A = Sr, Ca; B = V, Nb, Ta, ...) je nedavno znova pritegnila zanimanje, saj gre za skupino koreliranih kovin s tehnološko zanimivimi lastnostmi, kot sta prosojnost v vidnem in ultravijoličnem območju skupaj z električno prevodnostjo. Zlasti za $SrVO_3$ je bilo ugotovljeno, da lahko teoretični izračuni pri nizkih temperaturah podcenijo upornost v primerjavi z eksperimentalno izmerjeno vrednostjo [1].

Preiskujemo možnost, da to odstopanje izvira iz momentne odvisnosti lastne energije (ang. self-energy). Ta je običajno izračunana v okviru enomestne (ang. single-site) dinamične teorije povprečnega polja (DMFT), ki sicer dobro pojasni druge lastnosti snovi, vendar lastno energijo obravnava kot momentno neodvisno. Ker glavnina prispevkov k upornosti izvira iz okolice Fermijeve površine, je lahko vpliv momentne odvisnosti nezanemarljiv. Momentno odvisnost v režimu šibke sklopitve obravnavamo s perturbacijskim razvojem drugega reda in z dvodelčno samokonsistentno metodo (TPSC).



Slika 1: Momentno odvisna lastna energija za $SrVO_3$, izračunana z metodo TPSC in z metodo TPSC na osnovi DMFT. Na (a) in (c) sta prikazani lastni energiji na sredinskem preseku tridimenzionalne Brillouinove cone pri najnižji pozitivni Matsubarini frekvenci, na (b) in (d) pa njena analitično nadaljevana vrednost pri realni frekvenci $\omega = 0$. Bele črte označujejo Fermijevo površino.

[1] D. J. Abramovitch, J. Mravlje, J.-J. Zhou, A. Georges in M. Bernardi, Respective roles of electron-phonon and electron-electron interactions in the transport and quasi-particle properties of srvo3, Phys. Rev. Lett. 133, 186501 (2024)

Kvantna prepletenost in kvantno slikanje v strukturah tekočih kristalov

Sara Klopčič[1, 2], Aljaž Kavčič[1,2], Nerea Sebastian[3] in Matjaž Humar[1, 2, 4]

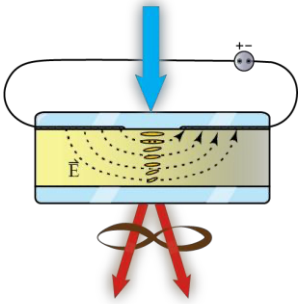
1. *Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana*
2. *Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana*
3. *Odsek za fiziko kompleksne snovi, IJS Ljubljana*
4. *CENN Nanocenter*

Nelinearni optični pojavi drugega reda nastopajo v materialih, v katerih je porušena inverzna simetrija. Mednje spada tudi spontana parametrična pretvorba navzdol (SPDC), pri kateri se črpalni foton pretvori v par fotonov, ki sta lahko med sabo kvantno prepletena. Nedavno odkrita feroelektrična nematska faza tekočih kristalov (FNLC) je omogočila opazovanje SPDC v mehki snovi [1]. Za razliko od običajnih trdnih nelinearnih kristalov s togo strukturo je orientacijo molekul v tekočih kristalih mogoče nadzorovati preprosto in neposredno.

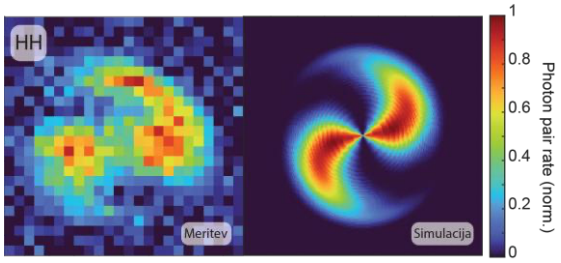
Z električnim poljem v ravnini celice lahko zvezno spreminjamo orientacijo direktorja v tekočekristalni celici in tako neposredno nadzorujemo polarizacijsko stanje ter stopnjo polarizacijske kvantne prepletenosti ustvarjenih fotonskih parov [2]. Pokazali smo, da je na tak način stopnjo prepletenosti mogoče reverzibilno uravnavati po celotnem območju, od skoraj separabilnih do skoraj maksimalno prepletenih stanj.

Nadalje smo preučevali SPDC v geometrijsko omejenih strukturah FNLC, in sicer v mikroskopskih kapljicah FNLC na steklenem substratu. S skeniranjem črpalnega žarka čez kapljico in beleženjem hitrosti nastajanja fotonskih parov treh kombinacij polarizacij (oba fotona horizontalno polarizirana, oba vertikalno polarizirana in pravokotno polarizirana fotona) smo dobili prostorsko strukturirano polarizacijsko sliko, ki odraža zapleteno notranjo konfiguracijo direktorja.

Rezultati so pokazali, da FNLC ponujajo izjemno prilagodljivo platformo za generiranje kvantne svetlobe, na kateri je mogoče prepletenost uravnavati tako z geometrijo materiala kot z zunanjim električnim krmiljenjem. V prihodnosti bi to lahko prispevalo k razvoju tako imenovanih kvantnih zaslonov, kjer bi vsak slikovni element predstavljal svoj kvantni vir svetlobe.



Slika 1: Generacija parov fotonov v tekočekristalni celici v prisotnosti zunanjega električnega polja.



Slika 2: Meritve in simulacija horizontalno polariziranih fotonov iz polkapljice FNLC s polmerom 36 µm.

[1] V. Sultanov, A. Kavčič, et al, Nature, 631, 294-299 (2024)
[2] S. Klopčič, A. Kavčič, N. Sebastian Ugarteche in M. Humar, Advanced Science **13**, 3 (2026)

When Decoherence Creates Interference: An Optical Simulation of Matter Waves

Hadis Torbatiyan[1], Bedir Halcı[1], Adrian Udovičić[1], Lara Ulčakar[1,2] and Rainer Kaltenbaek[1]

1. Faculty of Mathematics and Physics, University of Ljubljana, Ljubljana
2. Jožef Stefan Institute, Ljubljana

Decoherence is conventionally regarded as a detrimental process that suppresses quantum coherence. For spatially extended quantum systems, however, environmental interactions are generally inhomogeneous, so that different regions of the wavefunction decohere differently. We show that one can take advantage of such inhomogeneous decoherence. In particular, spatially localized decoherence can be exploited as an interferometric tool for preparing spatial superpositions of massive particles [1]. To demonstrate this, we use the correspondence between the free evolution of a matter wave and the paraxial propagation of an optical beam, which allows matter-wave decoherence to be simulated optically.

In our optical simulation, decoherence is modelled as local dephasing of a wavefront: a collimated laser beam ($\lambda = 519\,\mathrm{nm}$) is reflected from a phase-only spatial light modulator (SLM), on which pixels within selected domains are assigned independent random phases uniformly distributed over $[0, 2\pi)$ (Fig. 1). The resulting near-field intensity distribution is recorded with a camera translated along the beam axis.

We investigate three decoherence geometries, each representing a different way in which the scattering of light can decohere the quantum state of a massive particle: (a) an intense, tightly focused beam, in which every photon causes full decoherence within a sharply defined region; (b) a weaker beam, for which decoherence occurs probabilistically following the beam profile; and (c) periodically localized decoherence due to the interference of two intersecting laser beams. For the radially symmetric cases (a) and (b), interference fringes emerge whose position and visibility depend strongly on the sharpness of the boundary between the decohered and the coherent domains; for a hard boundary, an Arago spot forms at the centre of the geometric shadow. A periodic modulation of decoherence produces a Talbot carpet (Fig. 2); here, the optical parameters are chosen to correspond to a matter-wave experiment with 500 kDa particles and a Talbot time of 120 ms. These results establish localized decoherence as a resource for quantum-state engineering.

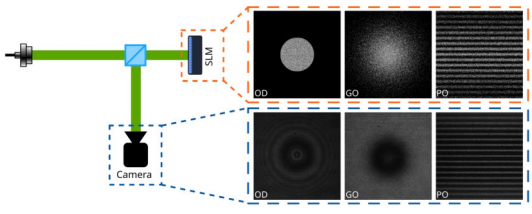


Figure 1: Experimental setup with SLM phase patterns (top) and corresponding camera frames (bottom).

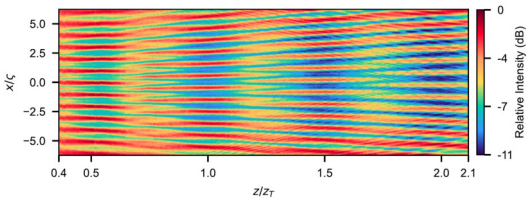


Figure 2: Measured Talbot carpet for periodically localized decoherence.

[1] H. Torbatiyan, B. Halcı, A. Udovičić, L. Ulčakar and R. Kaltenbaek, arXiv:2609.25227 (2026)

Porazdelitev kvantnega ključa s prepletenimi fotoni po 110 km položenega optičnega vlakna

Adrian Udovičić[1], Lara Ulčakar[1,2], Izidor Benedičič[2], Jure Pirman[1,2], Roman Novak[2], Rok Pirnat[3], Žiga Pušavec[1], Shreya Gupta[1], Bedir Halcı[1], Marko Serafimovič[1], Guri Buza[1], Erik Gajić[1], Barbara Dorić[1], Gregor Cerar[2], Mihael Mohorčič[2], Samed Bajrič[2], Dušan Gabrijelčič[2], Tomaž Klobučar[2], Rok Žitko[2], Janez Srakar[2], Jon Jona Javoršek[2], Erik Zupanič[2], Tilen Knaflič[2], Gaja Šalamun[1,2], Katja Gosar[1,2], Peter Lekše[1,2], Bor Luka Urlep[1,2], Alenka Pipuš[1,2], Matevž Vaupotič[1,2], Aleksandar Lukić[3], Egon Milanić[4], Daniel Herakovič[5], Darko Bulat[6], Radovan Pajntar[6], Denis Arčon[2], Marion van Midden Marič[1,2], Marjan Kavčič[7], Matjaž Breskvar[3], Mojca Mikac Srakar[4], Peter Jeglič[2], Rainer Kaltenbaek[1], Anton Ramšak[1]

1. University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, Jadranska 19, SI-1000 Ljubljana, Slovenia
2. Jožef Stefan Institute, Jamova 39, SI-1000 Ljubljana, Slovenia
3. Beyond Semiconductor d.o.o., Brnčičeva ul. 41g, 1231 Ljubljana, Slovenia
4. Government Office for the Protection of Classified Information, Ulica gledališča BTC 2, 1000 Ljubljana, Slovenia
5. Ministry of Foreign and European Affairs, Prešernova cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenia
6. Ministry of Digital Transformation, Davčna Ulica 1, 1000 Ljubljana, Slovenia
7. Government Information Security Office, Ulica gledališča BTC 2, 1000 Ljubljana, Slovenia

Predstavljamo porazdelitev kvantnega ključa s prepletenimi fotoni (protokol BBM92 [1]) po 110 km položenih optičnih vlaken med Ljubljano in Drnovim, ki sta del slovenske infrastrukture za kvantno komunikacijo. Izvor polarizacijsko prepletenih fotonskih parov v Novem mestu je od sprejemnikov oddaljen 78 km oziroma 32 km vlakna, izgube pa so do 27,4 dB oziroma 21,7 dB, vključno s sprejemnikoma. Sprejemnik v Ljubljani uporablja superprevodne detektorje posameznih fotonov, sprejemnik v Drnovem pa plazovne fotodiode. Polarizacijski drift vlaken smo sproti popravljali z avtomatsko povratno zanko. Meritve so potekale med vročinskim valom, ko se je temperatura zraka v Ljubljani in Drnovem gibala med 14 in 34 °C.

V 83,9 urah meritev z okni koincidenc 240, 320, 640 in 950 ps smo dosegli najnižji delež napačnih bitov $(6{,}4 \pm 1{,}2)\,\%$ in vrednost CHSH $S = 2{,}58 \pm 0{,}13$, ki presega mejo lokalnega realizma $S = 2$. Končna analiza z varnostnim parametrom 10^{-10} da hitrost tajnega ključa 3,1 bita/s pri oknu 800 ps, asimptotska hitrost pa je 11,4 bita/s. To je prva povezava s prepletenimi fotoni te dolžine v Sloveniji.

[1] C. H. Bennett, G. Brassard in N. D. Mermin, Physical Review Letters **68**, 557 (1992)

Narrowband Heralded Photons from Cavity-Enhanced Spontaneous Parametric Down-Conversion: Extraction and Receiver Acceptance

Shreya Gupta[1] and Rainer Kaltenbaek[1]

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana

We analyze the conditions for narrowband emission, efficient photon extraction, and receiver acceptance in cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion, motivated by sources with linewidths significantly below $100\ \mathrm{kHZ}$. We consider a single nonlinear crystal inside a Fabry-Perot cavity resonant for the signal and idler fields. For fixed internal loss and round-trip delay, we derive the output-coupler transmission interval that simultaneously satisfies a prescribed cavity linewidth and a minimum escape probability. This gives an explicit feasibility condition and determines where impedance matching lies relative to the allowed interval. For one collected signal-idler resonance pair, we then calculate the signal spectrum conditioned on idler detection, retaining the effects of both cavity resonances and the pump linewidth. For Lorentzian cavity lines, pump spectrum, and receiver response, we obtain analytical expressions for the heralded photon linewidth and spectral acceptance. Combining acceptance with extraction yields the probability of successful photon delivery per true herald. In the high-finesse limit, with the receiver centered on the signal resonance, the competition between extraction and spectral acceptance produces either a finite optimal transmission or monotonic improvement up to the permitted upper bound. Whenever the finite unconstrained optimum exists, it lies in the overcoupled regime. These results connect cavity design constraints with the spectral requirements of a receiver and identify operating conditions that maximize accepted-photon probability.

Optimizing the design for a compact cavity-enhanced source of polarization entangled photon pairs

Fatemeh Pourkhavari[1], Rainer Kaltenbaek[1]

1. Faculty of Mathematics and Physics, University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia

We investigate polarization entanglement in a compact cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion source based on two orthogonally nonlinear crystals. The source is designed to generate highly non-degenerate photon pairs at 780.24 nm and 1550 nm with a cavity linewidth in the MHz range. This allows the efficient coupling to Rb-based quantum memories as well as the low-loss transmission in existing telecommunication fiber networks. Here, we analyze the use of moderate spectral filtering to allow a compact realization of our source using a simple Fabry-Perót cavity without the need for dispersion-compensating optics to achieve high-quality polarization entanglement. The filter allows to suppress unwanted spectral contributions from neighboring double resonances. By optimizing the filter bandwidth in comparison to the spacing of double resonances and the SPDC bandwidth, we aim to maximize the entanglement without significantly reducing the brightness of the source. Our results will form the basis for the realization of a prototype realization of a compact, narrow-band source of entanglement - a central building block for future quantum repeaters and large-scale quantum networks.

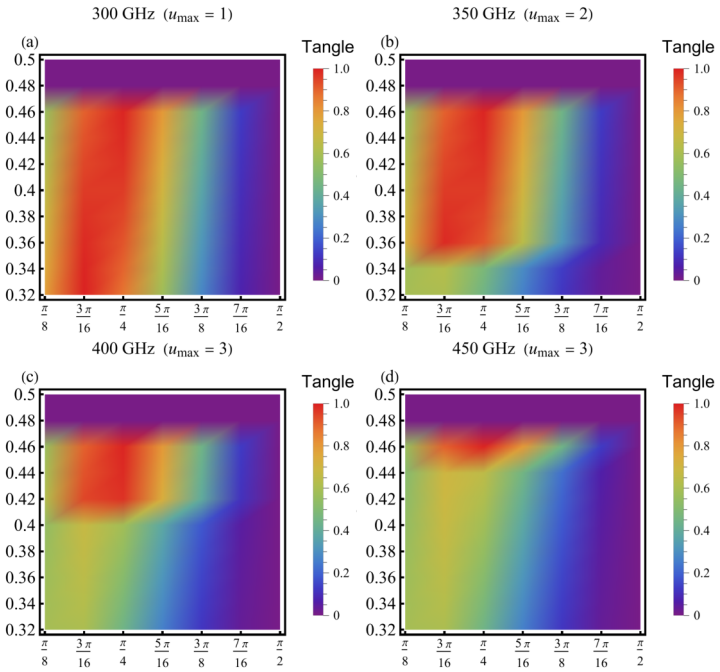


Figure 1: Polarization tangle versus θ and η for different filter bandwidths

[1] Z. Pušavec, J. Ulčakar, and R. Kaltenbaek, Physical Review A **111**, 043707 (2025).
[2]W. K. Wootters, Physical Review Letters **80**, 2245 (1998).

Večpulzni eksperimenti na kvantnem pomnilniku s cezijevimi atomi

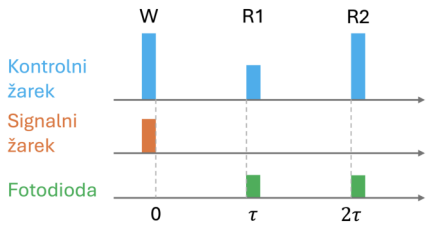
Gaja Šalamun[1,2], Matevž Vaupotič[1,2], Alenka Pipuš[1,2], Bor Luka Urlep[1,2], Katja Gosar[1,2], Jure Pirman[1,2], Erik Zupanič[1,3] in Peter Jeglič[1]

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. AtomQL, Ljubljana

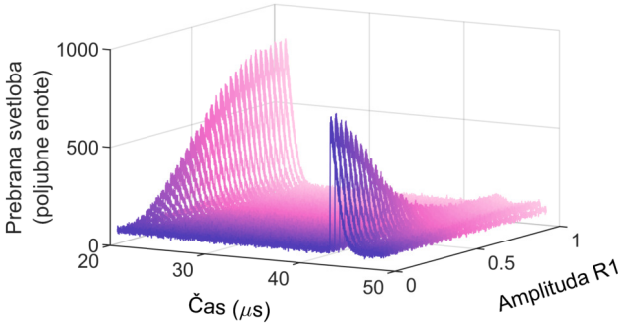
Kvantni pomnilnik omogoča shranjevanje svetlobnih sunkov ali posameznih fotonov, ki jih ob poljubnem kasnejšem času prikličemo nazaj. Eden od mehanizmov delovanja kvantnega pomnilnika je elektromagnetno vzbujena prosojnost (EIT). Ta mehanizem omogoča, da se ob izklopu kontrolnega žarka signalni žarek prepiše v koherenco atomov. Ob ponovnem vklopu kontrolnega žarka (bralni pulz) shranjeno svetlobo zaznamo kot svetlobni sunek na fotodiodi [1].

V homogenem magnetnem polju se Zeemanovi podnivoji razcepijo, zato v sistemu nastane več spinskih valov z različnimi frekvencami, ki so večkratniki Larmorjeve frekvence. Spinski valovi med seboj interferirajo, zato v odvisnosti od časa shranjevanja opazimo zaporedne kolapse in ponovne oživitve izsevane svetlobe [2]. To lastnost lahko izkoriščamo v večpulznih eksperimentih. Z enim zapisovalnim in dvema bralnima pulzoma, postavljenima na zaporednih ponovnih oživitvah, shranjeno svetlobo preberemo le delno (slika 1). Razmerje med dvema dobljenima svetlobnima sunkoma nastavimo z močjo prvega bralnega pulza (slika 2). Ker med kolapsi ni mogoče prebrati shranjene svetlobe, lahko dodamo na to mesto še en zapisovalni pulz in v isti sistem shranimo dva signala ter ju nato preberemo ločeno. Z dvema zapisoma, kjer je drugi postavljen na prvi ponovni oživitvi, in enim branjem oba signala združimo v en sam svetlobni sunek.

Izvajanje eksperimenta je v celoti avtomatizirano, kar omogoča hitro zbiranje eksperimentalnih podatkov in hitro iteracijo skozi različne nastavitve eksperimenta. Avtomatizacijo bomo uporabili za samodejno optimizacijo eksperimentalnih parametrov s strojnim učenjem.



Slika 1: Shema večpulznega eksperimenta. W je zapisovalni pulz, R1/R2 bralni pulz.



Slika 2: Prikaz prebranega signala za različne amplitude prvega branja R1.

[1] L. Ma, O. Slattery in X. Tang. Optical quantum memory based on electromagnetically induced transparency. Journal of Optics **19**, 043001 (2017).
[2] Katja Gosar, Vesna Pirc Jevšenak, Tadej Mežnaršič, Samo Beguš, Tomasz Krehlik, Dušan Ponikvar, Erik Zupanič in Peter Jeglič. Suppression of dark-state polariton collapses in cold-atom quantum memory. Phys. Rev. A **108**, 032618 (2023).

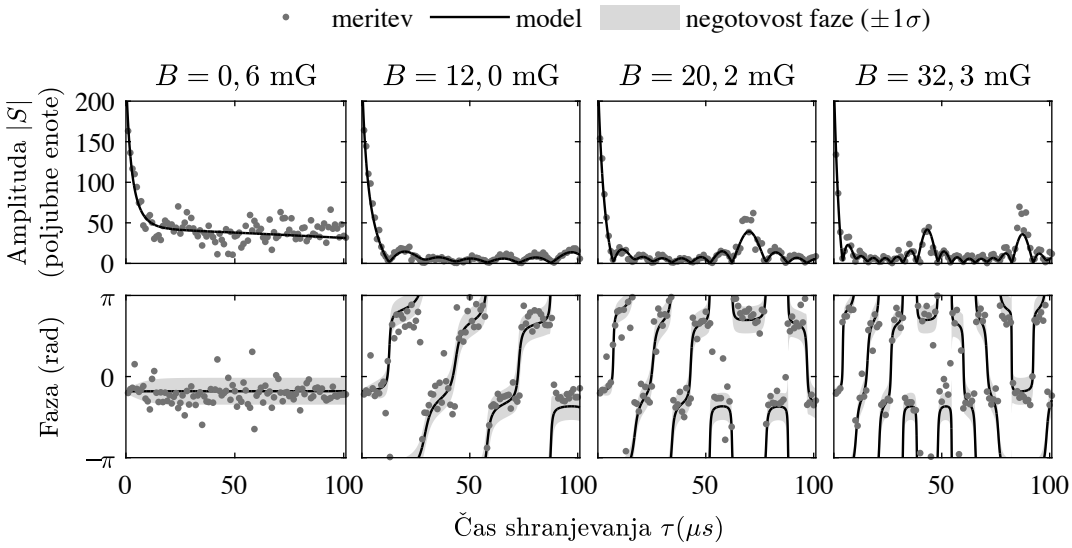
Holografija svetlobe shranjene v cezijevih atomih

Jure Pirman[1,2], Katja Gosar[1,2], Bor Luka Urlep[1,2], Gaja Šalamun[1,2], Alenka Pipuš[1,2], Matevž Vaupotič[1,2], Erik Zupanič[1,3] in Peter Jeglič[1]

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. AtomQL, Ljubljana

Kvantni pomnilniki na osnovi elektromagnetno inducirane prosojnosti (EIT) v toplih atomskih parah shranijo svetlobni sunek v koherenco med hiperfinima nivojema osnovnega stanja. Običajno merimo le intenziteto ponovno izsevane svetlobe, s čimer izgubimo informacijo o njeni fazi. Predstavljamo preprosto heterodinsko shemo, pri kateri med branjem uporabimo signalni žarek, ki je frekvenčno razglašen daleč izven okna EIT. Razglašeni žarek ne vpliva na shranjeno koherenco, služi pa kot lokalni oscilator, ki omogoča heterodinsko detekcijo ponovno izsevane svetlobe. Rezultat zaznamo na fotodiodi kot utripanje, ki poda tako amplitudo kot fazo shranjene svetlobe.

Metodo smo preizkusili v celici s cezijevimi parami v zunanjem magnetnem polju. V odvisnosti od časa shranjevanja in jakosti polja opazimo zaporedne kolapse in ponovne oživitve izsevane svetlobe [1], ki jih spremljajo fazni skoki in zasuki. Meritev intenzitete faznih skokov in zasukov ne zazna, ti pa nosijo informacijo o precesiji shranjenih Zeemanovih koherenc. Heterodinsko branje lahko posledično služi kot orodje za študij spinske dinamike kvantnega pomnilnika.



Slika 1: Amplituda $|S|$ (zgoraj) in faza (spodaj) heterodinskega signala ponovno izsevane svetlobe v odvisnosti od časa shranjevanja τ pri štirih vrednostih magnetnega polja B. Od faze je odšteta skupna linearna odvisnost zaradi dvofotonske razglasitve. Sivo območje prikazuje pričakovano negotovost faze

[1] K. Gosar, V. P. Jevšenak, T. Mežnaršič, S. Beguš, T. Krehlik, D. Ponikvar, E. Zupanič in P. Jeglič. Suppression of dark-state polariton collapses in cold-atom quantum memory. Phys. Rev. A **108**, 032618 (2023).

Avtomatizirana hiperspektralna analiza optičnih mikroresonanc v primarnih človeških maščobnih celicah

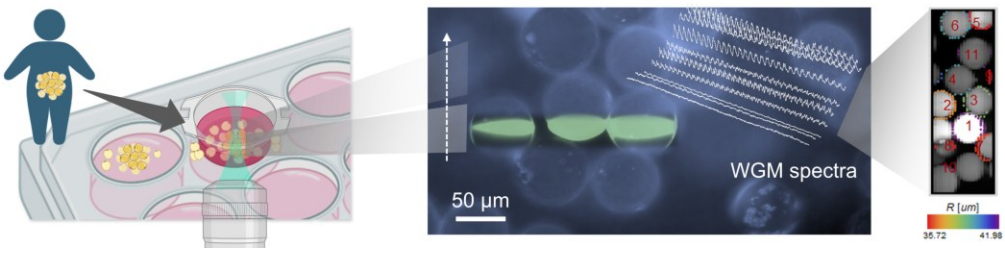
Rok Podlipec[1], Ana Krišelj[1], Gregor Pirnat[1], Polona Pečlin[2], Matjaž Humar[1,3,4]

1. *Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana, Slovenija*
2. *Klinični oddelek za perinatologijo, Univerzitetni klinični center Ljubljana, Slovenija*
3. *Fakuleta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Slovenija*
4. *CENN Nanocenter, Ljubljana, Slovenija*

Lipidne kapljice (LK) so osrednji organeli za shranjevanje maščob v maščobnih celicah (adipocitih). Določanje nanometrskih sprememb njihove velikosti, ki izražajo zgodnje presnovne odzive, je nedostopno s konvencionalnimi mikroskopijami. V predhodni študiji smo pokazali, da LK delujejo kot naravni optični mikroresonatorji s tako imenovanimi WGM resonancami, ki omogočajo nanometrsko natančno sledenje njihove velikosti [1]. Zajem je bil v študiji ročen in omejen na 10–20 celic na eksperiment.

Tu predstavljamo avtomatiziran sistem, ki združuje linijsko konfokalno hiperspektralno skeniranje z napredno analizo spektrov. Ta obsega sledenje in segmentacijo LK, prepoznavo posameznih skeniranih področij z WGM spektri in njihovo razvrščanje v gruče posameznih LK. Vsako LK vzorčimo v več točkah po obodu, kar daje povprečno velikost in zanesljivo sledenje tudi ob rotaciji ali premikih celic. Z navzkrižno korelacijo seštetih spektrov med pari meritev, ki jih povežemo v korelacijsko mrežo in s preverjanjem kakovosti posameznih parov zmanjšamo vpliv spektrov z večjim šumom. V eni meritvi tako lahko spremljamo 100–380 celic, približno red velikosti več kot doslej, kar omogoča statistično analizo dinamike na ravni populacije in subpopulacij.

Metodo smo prvič uporabili na človeških primarnih adipocitih več darovalk. Razločili smo spremembe velikosti reda deset nanometrov v nekaj urah in izrazito heterogenost med celicami. Po dodatku učinkovine, ki spodbuja razgradnjo shranjenih maščob, smo pri delu vzorcev zaznali pospešeno krčenje LK. Ugotovili smo, da je dinamika človeških adipocitov 5- do 10-krat manjša kot pri mišjih kar je pomembno za prenos rezultatov testiranja zdravil z mišjih modelov na človeka.



Slika 1: Avtomatiziran postopek WGM skeniranja in analize za razločevanje nanometrskih sprememb velikosti LK v človeških adipocitih (adaptirano iz Podlipec idr., *v pripravi*).

[1] R. Podlipec, A. Krišelj, M. Zorc, P. Matjan Štefin, S. Ussar in M. Humar, *ACS Sens*. 11, 511 (2026)

Optični mikroresonatorji kot senzorji lomnega količnika tekočega medija pod ekstremnimi tlaki

Lucijan De Reggi[1,2], Klemen Motaln[3], Gregor Pirnat[1], Matic Lozinšek[3] in Matjaž Humar[1,2,4]

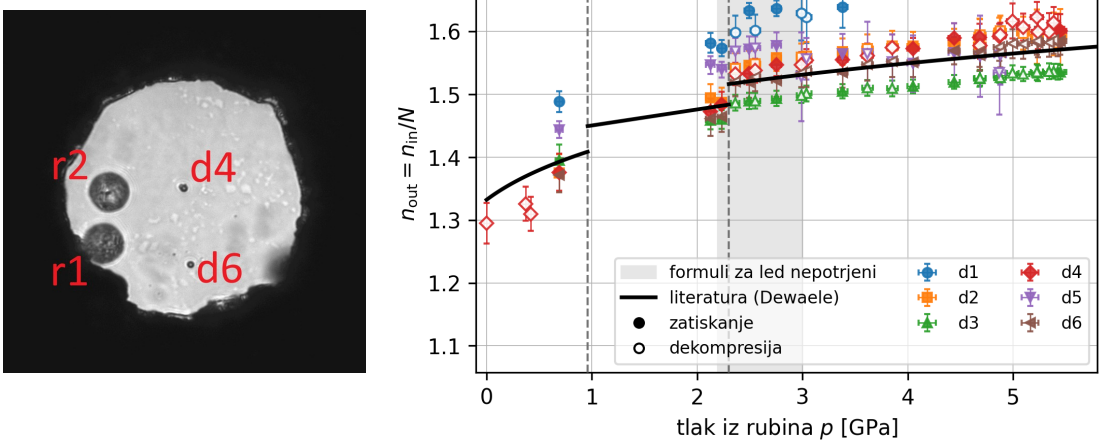
1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. Laboratorij za kemijo pod ekstremnimi pogoji, IJS, Ljubljana
4. CENN Nanocenter, Ljubljana

V sferičnih optičnih mikroresonatorjih, prozornih kroglicah z lomnim količnikom n_{in}, večjim od lomnega količnika okolice n_{out}, svetloba zaradi totalnega odboja kroži ob notranji površini. Ojačajo se le valovne dolžine, pri katerih se na obseg prilega celo število valov, $l\lambda \approx 2\pi R\, n_{\mathrm{in}}$ (resonance WGM, angl. *whispering gallery modes*). Lege resonanc so odvisne od polmera R in od razmerja $N = n_{\mathrm{in}}/n_{\mathrm{out}}$, zato je spekter WGM občutljiv na lomni količnik okolice.

Celica z diamantnim nakovalom (DAC) omogoča preučevanje snovi pri tlakih do nekaj sto GPa, tlak v njej pa običajno merimo s fluorescenco rubina [1]. Obstoječe metode za merjenje lomnega količnika tekočine, ki prenaša tlak, so zapletene in drage [2, 3].

Razvili smo senzor lomnega količnika medija pri visokih tlakih, ki temelji na meritvah spektra WGM mikroresonatorjev iz stekla $BaTiO_3$, dopiranega z evropijem. Zadošča ista oprema kot za merjenje tlaka z rubini (laser, mikroskop in spektrometer).

Metodo smo preizkusili s šestimi mikroresonatorji v vodi do 5,5 GPa, v tekoči fazi ter v ledu VI in VII (slika 1). Izmerjeni n_{out} se z literaturo [2] ujema z RMS odmikom 2,3 % (95 meritev). Posamezni mikroresonatorji sistematično odstopajo za nekaj odstotkov, potek s tlakom pa sledi literaturi. Metoda omogoča merjenje lomnega količnika *in situ* in s tem spremljanje faznih prehodov.



Slika 1: Levo: vzorec v DAC z mikroresonatorjema (d4, d6) in rubinoma (r1, r2). Desno: n_{out} vode iz spektrov WGM (polne oznake: zatiskanje, prazne: dekompresija) in literatura [2].

[1] C.-S. Zha idr., Proceedings of the National Academy of Sciences **97**, 13494 (2000)
[2] A. Dewaele idr., Physical Review B **67**, 094112 (2003)
[3] C. Sanchez-Valle idr., Journal of Chemical Physics **138**, 054505 (2013)

Neposredne meritve odvoda spektra optično detektirane magnetne resonance

Tilen Knaflič[1], Mario Grüneberg[1], Enrique Sánchez-Ibáñez[1], Matthijs Ignacy Olivier Vanrooij[1], Matthäus Hirsch[1], Jan Gospodarič[1], Claudius Mullen[1], Jaka Pribošek[1]

1. Silicon Austria Labs, Beljak, Avstria

V zadnjem desetletju se je raziskovanje NV centrov v diamantu močno okrepilo, tako na področju temeljnih kot tudi aplikativnih raziskav. Njihove edinstvene spinsko odvisne optične lastnosti omogočajo optično detektirano magnetno resonanco (ODMR), ki je postala osrednja tehnika za raziskovanje spinskih stanj NV centrov in temelj visoko občutljive magnetometrije. Magnetometri na osnovi NV centrov so v zadnjem času dosegli občutljivost na ravni pikotesla, zaradi česar sodijo med najobetavnejše platforme za kvantno zaznavanje [1,2]. Za doseganje takšne zmogljivosti številni protokoli za magnetometrijo uporabljajo frekvenčno modulacijo (FM) v kombinaciji s fazno občutljivim ojačevalnikom (FOO), pri čemer izmerimo prvi odvod spetra. Čeprav (zaradi odvoda) povečan naklon spektralne krivulje in učinkovito filtriranje šuma z FOO skupaj izboljšujeta občutljivost, se hkrati poveča kompleksnost merilnega sistema. Zato je zelo zaželeno ohraniti prednosti FM-zaznavanja glede občutljivosti, brez dodatnega povečanja kompleksnosti.

Naše delo predstavlja rešitev za prvi del problema - predlagamo generiranje psevdo odvoda ODMR spektra NV centrov v diamantu z neposrednim mikrovalovnim vzbujanjem. Namesto ene same vzbujevalne frekvence, obsevamo vzorec z več ustrezno uteženimi frekvenčnimi toni. Uteži izberemo na podlagi konvolucijskega filtra, zasnovanega na prvem odvodu absorpcijske črte. Metoda vključuje dve zaporedni meritvi z nasprotnima fazama filtra, ki jih nato preprosto odštejemo da dobimo psevdo odvod spektra. V našem delu analiziramo teoretične omejitve in optimizacije te metode za zvezne in diskretne načine vzbujanja ter eksperimentalno izvedemo diskretne različice z do 15 toni na komercialnem diamantnem vzorcu s koncentracijo NV centrov 4,5 ppm. Eksperimentalni rezultati na našem preprostem laboratorijskem merilnem sistemu se zelo dobro ujemajo s teoretičnimi napovedmi in že sedaj dosegajo občutljivosti, ki so nižje od 1 $\mu T/Hz^{1/2}$. Z dodatnimi izboljšavami pri zajemanju fotonov in implementacijo uravnovešene fotodetekcije ocenjujemo, da se bo ta vrednost še znižala za dva do tri velikostne rede.

[1] Z. Wang, F. Kong, P. Zhao, Z. Huang, P. Yu, Y. Wang, F. Shi, J. Du, Science Advances, **2022**, *8*, 1-8

[2] S. T. Alsid, J. M. Schloss, M. H. Steinecker, J. F. Barry, A. C. Maccabe, G. Wang, P. Cappellaro, D. A. Braje, Physical Review Applied, **2023**, *19*, 054095-054102

Odstranjevanje repnih artefaktov v OCT angiografiji

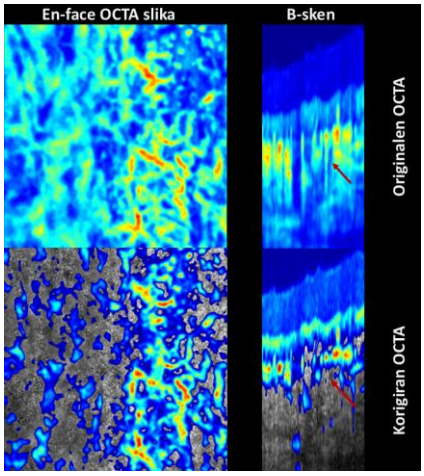
Urban Simončič[1,2] in Matija Milanič[1,2]

1. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Ljubljana
2. Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana

Optična koherenčna tomografska angiografija (OCTA) prikaže žilje na osnovi časovnih fluktuacij signala med zaporednimi posnetki istega mesta, ki jih povzročajo premikajoče se krvne celice [1]. Svetloba, ki prispeva k signalu iz globljih plasti, pa na poti tja in nazaj preide tudi plitvejše žile, kjer ji sipanje na krvnih celicah naključno spremeni intenziteto. Zato časovno fluktuira tudi signal statičnega tkiva pod žilami, kar se kaže kot navpični repni artefakt. Algoritem TAR-TES [2] te prispevke odšteva rekurzivno od površine navzdol, a z ročno nastavljeno utežjo in brez upoštevanja slabljenja svetlobe z globino.

V tem delu pokažemo, da je utež algoritma TAR-TES mogoče določiti s predpostavko, da je vpadna svetloba na največji globini slike že v celoti atenuirana in je OCT signal tam zgolj šum. Na isti predpostavki temelji Vermeerjeva globinsko razločljiva rekonstrukcija atenuacijskega koeficienta [3]. Le-ta privzame, da je signal določene plasti sorazmeren svetlobi, ki do nje prispe, in deležu, ki ga siplje nazaj. Iz tega sledi, da je delež svetlobe, ki doseže dano globino, enak deležu signala A-skena, ki izvira iz te globine in globlje. Utež algoritma TAR-TES je torej normalizacija, ki jo skupaj s slabljenjem lahko določimo iz izmerjenega strukturnega signala. Rep signala opišemo s prenosom fluktuacij intenzitete: delež svetlobe, ki se siplje v plasti s pretokom krvi in zato fluktuira, je sorazmeren lokalnemu atenuacijskemu koeficientu. Vsaka plast zato k repu pod seboj prispeva sorazmerno svojemu atenuacijskemu koeficientu in jakosti fluktuacij v njej.

Na posnetku kožnega hemangioma (SS-OCT, 1300 nm) nova korekcija skoraj povsem odstrani repne artefakte pod površinskimi žilami in ohrani signal površinskega žilja (Slika 1). Ker vse količine izhajajo iz meritve, algoritem nima prostih parametrov in omogoča ponovljivo kvantitativno analizo žilja.



Slika 1: OCTA posnetek hemangioma pred korekcijo (zgoraj) in po njej (spodaj): en-face slika (levo) in B-sken (desno). Puščica označuje enega od repnih artefaktov pod površinskimi žilami, ki jih korekcija odstrani. Kjer je korigiran OCTA signal pod žilami enak nič, je v sivinah vidna strukturna OCT slika.

[1] A. Mariampillai in ostali, Optics Letters 33, 1530–1532 (2008).
[2] U. Simončič in M. Milanič, Sensors 23, 9312 (2023).
[3] K. A. Vermeer in ostali, Biomedical Optics Express 5, 322–337 (2014).

Korekcija geometrijskih popačenj pri optični koherenčni tomografiji

Aljaž Robek[1], Jošt Stergar[1,2], Urban Simončič[1,2], Matija Milanič[1,2,3]

1. Odsek za reaktorsko fiziko, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana
3. Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana

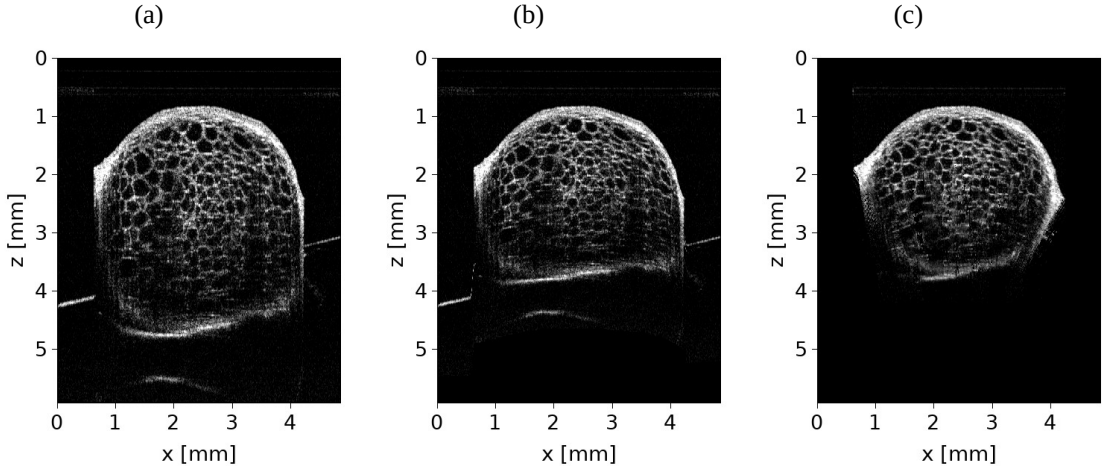
aljaz.robek@ijs.si

Optična koherenčna tomografija (OCT) omogoča nedestruktivno tridimenzionalno slikanje notranje zgradbe bioloških vzorcev. Pri vzorcih z ukrivljeno ali nepravilno površino razlika med optično in geometrijsko dolžino poti ter lom svetlobe na meji med zrakom in vzorcem povzročata geometrijska popačenja. Ta otežujejo določanje oblike, dimenzij in položaja notranjih struktur.

Predstavljamo postopek tridimenzionalne korekcije slik OCT v približku geometrijske optike ob predpostavki homogenega lomnega količnika vzorca. Iz volumenskega posnetka določimo površino in njene lokalne normale. S Snellovim zakonom izračunamo smer lomljenega žarka ter ob upoštevanju optične dolžine poti vsak voksel preslikamo v popravljene prostorske koordinate.

Postopek smo uporabili na kapljici sipajočega medija nad kvadratno mrežo in na mešičku citrusnega plodu. Posnetke smo zajeli s sistemom Thorlabs Vega OCT z osrednjo valovno dolžino 1300 nm. Korekcija zmanjša vidna popačenja mreže in izboljša skladnost rekonstruirane geometrije s pričakovano obliko. Primerjava prerezov mešička pokaže vpliv loma na obliko in prečne položaje struktur, ki ga korekcija optične dolžine poti sama ne zajame (slika 1).

Dodatno smo z analitično občutljivostjo preslikave ocenili položajno negotovost zaradi negotovosti lomnega količnika, pri čemer smo površino obravnavali kot točno znano. Lokalno lateralno ločljivost smo ocenili iz premera Gaussovega žarka ob upoštevanju premika gorišča zaradi loma. Položajna negotovost narašča z globino, lateralna ločljivost pa se slabša z oddaljenostjo od gorišča. Rezultati omogočajo ločeno obravnavo geometrijskih popačenj, položajne negotovosti in omejene ločljivosti pri analizi slik OCT.



Slika 1: Prečni prerez mešička citrusnega plodu: (a) izvorna slika OCT, (b) po korekciji optične dolžine poti in (c) po korekciji optične dolžine poti in loma svetlobe. Osi so v milimetrih.

Preučevanje prenosa plina skozi dolge mikrokapilare

Milica Pena[1,2], Ardita Kurtishaj Hamzaj[1,2], Marko Žumer[1], Oleg Baranov[1], Vincenc Nemanič[1], Uroš Cvelbar[1,2]

[1] *Institut Jožef Stefan, Odsek za plinsko elektroniko F6, Ljubljana, Slovenija*
[2] *Podiplomska šola Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija*

Napovedovanje pretoka plina skozi dolge mikrokapilare je pomembno za nadzorovano dovajanje izjemno majhnih količin plina v merilne sisteme, ki jih je nemogoče kontrolirati s klasičnimi krmilniki plinskega pretoka. [1] Kakšne so meje tega pretoka in kaj vpliva nanj, preučujemo v tem delu. V izotermičnih pogojih zmanjšanje tlaka vzdolž kapilare poveča molekularno povprečno prosto pot in s tem lokalno Knudsenovo število, ki je definirano kot razmerje med povprečno prosto potjo in premerom kapilare. Posledično se lahko v isti cevi pojavijo različni režimi pretoka, kar otežuje primerjave z modeli, ovrednotenimi pri enem samem povprečnem tlaku.

Ta študija preučuje transport plina skozi mikrokapilare iz taljenega silicijevega dioksida s premerom od približno 2 do 200 µm in dolžino približno enega metra z uporabo argona, helija, dušika, kisika in vodika pri različnih vhodnih tlakih. Eksperimentalni pretok je določen iz dviga tlaka v komori z znano prostornino za plinom. Izmerjene vrednosti so primerjane z napovedmi stisljive Hagen-Poiseuilleove relacije, Maxwellove korekcije zdrsa, izraza za prosti molekularni tok in Beskok-Karniadakisovega modela. [2-4]

Da bi upoštevali spremembe tlaka in lokalnega Knudsenovega števila vzdolž kapilare, izračuni upoštevajo tudi cev kot niz kratkih segmentov. S tem preverjamo, ali upoštevanje teh sprememb izboljša ujemanje z meritvami v primerjavi z uporabo ene same reprezentativne vrednosti Knudsenovega števila.[5] Na podlagi Knudsenovega števila, izračunanega pri povprečnem tlaku, večina meritev spada v režim zdrsa in prehoda. Primerjave z eksperimentom kažejo, da noben posamezen model ne reproducira vseh izmerjenih vrednosti pretoka, ujemanje pa je odvisno od premera kapilare in eksperimentalnih pogojev. Cilj je določiti območja tlaka in Knudsenovega števila, v katerih se modeli najbolj ujemajo z meritvami za vsak plin in premer kapilare. To bi pomagalo pri izbiri primernega modela za nadzorovano kvantificirano dovajanje plina pri izjemno nizkih plinskih pretokih in njegovo napovedovanje pri uporabi mikrokapilar v merilnih sistemih.

[1] F. Sharipov in I. Graur, Vacuum **240**, 114585 (2025)
[2] R. Groll, S. Kunze in B. Besser, Physics of Fluids **32**, 092008 (2020)
[3] S. Kunze, R. Groll, B. Besser in J. Thöming, Scientific Reports **12**, 2057 (2022)
[4] A. Beskok in G. E. Karniadakis, Microscale Thermophysical Engineering **3**, 43–77 (1999)
[5] Z. Yang in S. V. Garimella, Physics of Fluids **21**, 052005 (2009)

MAS NMR vpogled v vključevanje in hidracijo litijevih soli v MOF-808

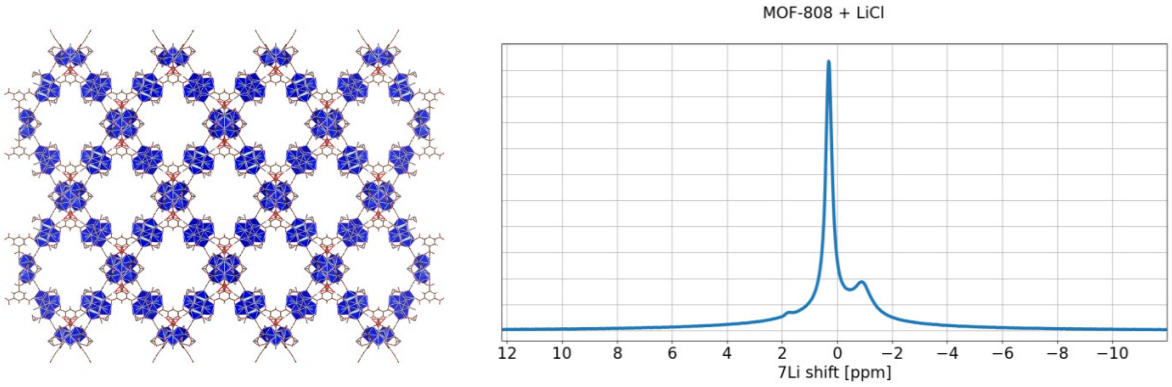
Matej Gabrijelčič[1], Ciara Byrne[1,2], Aljaž Škrjanc[1,2] in Nataša Zabukovec Logar[1,2]

1. Kemijski inštitut, Hajdrihova 19, 1000 Ljubljana, Slovenija
2. Univerza v Novi Gorici, Vipavska 13, 5000 Nova Gorica, Slovenija

Dostop do varne pitne vode je globalni izziv. Adsorpcijsko pridobivanje atmosferske vode je obetavna rešitev v sušnih regijah. Kovinsko-organski porozni materiali (MOF-i), za razvoj katerih je bila leta 2025 podeljena Nobelova nagrada za kemijo, so zaradi modularne strukture privlačni adsorbenti. MOF-808 ima velike pore (~18 Å), nizko adsorpcijsko entalpijo in možnost zelene sinteze, vendar je za praktično uporabo treba izboljšati njegovo higroskopnost. Vključitev litijevih soli lahko poveča zajem vodnih hlapov pri nizkih relativnih vlažnostih. V prispevku proučujemo posintezno vključevanje litijevih soli v MOF-808 in njihov vpliv na adsorpcijo in desorpcijo vode. Namen študije je razumevanje porazdelitve soli v poroznem materialu in spremembe porazdelitve med vezavo vode za nadaljnjo optimizacijo materialov.

Za vpogled v lokalno strukturo in dinamiko smo uporabili jedrsko magnetno resonanco z vrtenjem pod magičnim kotom v trdnem (MAS NMR), in sicer ^{1}H, ^{7}Li in ^{13}C MAS NMR. Z ^{7}Li MAS NMR smo spremljali koordinacijsko okolje Li^{+} ter njegovo interakcijo z vodo in ogrodjem. ^{1}H MAS NMR nam je razkril okolico in mobilnost vode, ^{13}C MAS NMR pa spremembe v organskem ogrodju. Rezultate NMR meritev smo povezali z adsorpcijskimi rezultati. Študija podaja smernice za boljše načrtovanje sol-MOF kompozitov za učinkovito pridobivanje atmosferske vode.

Raziskava je prejela finančno podporo CERIC-ERIC in Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v okviru raziskovalnega programa P1-0021.



Slika 1: Topologija MOF-808 (levo) in ^{7}Li MAS NMR spekter suhega MOF-808 + LiCl kompozita (desno).

Strojno učenje za segmentacijo zrn na mikrografih visokoentropijskih zlitin

Matija Budja[1,3], Anton Gradišek[1,2,3] in Andreja Jelen[1]

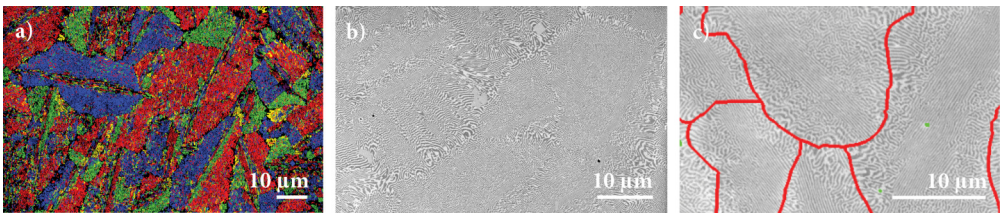
1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Odsek za inteligentne sisteme, IJS, Ljubljana
3. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Mikrostruktura materiala je izredno pomembna pri določanju in razumevanju njegovih fizikalnih lastnosti ter zmogljivosti končnih izdelkov. Analizirali smo t.i. visokoentropijske zlitine (angl. High Entropy Alloys - HEAs), ki lahko, glede na njihovo strukturo in obdelavo, posedujejo določene lastnosti, kot na primer povečana toplotna odpornost, mehanska trdnost in kompleksen magnetizem [1].

Med številnimi parametri, ki določajo mikrostrukturo, imajo velik pomen posamezne kristalne domene, oziroma zrna. Za samo detekcijo teh zrn obstaja veliko različnih metod, vsaka od katerih zahteva drugačno pripravo vzorca. Pri vrstični elektronski mikroskopiji (angl. Scanning Electron Microscope - SEM), je najbolj natančna tehnika EBSD (angl. Electron Backscatter Diffraction), kjer dobimo celostno informacijo o kristalni strukturi. Primer je prikazan na sliki 1a). Alternativno lahko uporabimo slikanje s povratno sipanimi elektroni (angl. Backscatter Electron Imaging - BSE), vendar tukaj potrebujemo dodatno obdelavo podatkov. Kljub temu prepoznavanje zrn na posnetkih SEM-BSE (Slika 1b), posebej pri tako kompleksnih materialih, kot so visokoentropijske zlitine, ni trivialna naloga in ostaja velik izziv.

V tej študiji smo prilagodili in ovrednotili tri različne prednaučene modele iz panoge strojnega učenja - UResNet, MiT-UNet in DINOv2 s preprosto linearno segmentacijsko glavo. Vsakega od modelov smo prenosno učili z uporabo treh različnih funkcij izgube - Dice, Dice + Focal in Dice + Weighted Cross Entropy. Za nadaljno izboljšavo zaznavanja pa smo rezultate modelov dodatno obdelali še s tradicionalno metodo watershed.

Najboljše rezultate je dosegel model MiT-UNet, učen s kombinirano funkcijo izgube Dice + Focal, ki je dosegel 51% (Slika 1c) v povprečnem preseku nad unijo (angl. Intersection over Union - IoU) in 21% v preseku nad unijo za izključno predvidene meje med zrni. Doseženi rezultati so uporabni kot izhodišče za nadaljne raziskave, vendar pa je za izboljšanje natančnosti modelov potreben dodaten razvoj.



Slika 1: Mikrostruktura CoCrFeNiZr visokoentropijske zlitine, posneta z vrstičnim elektronskim mikroskopom. Slike prikazujejo: a) barvno kodirana zrna s tehniko EBSD, b) SEM-BSE mikrograf, c) zrna, kot jih je predvidel MiT-UNet, prenosno učen na funkciji izgube Focal + Dice

[1] S Vrtnik et al. Intermetallics **93**, 122–133 (2018)

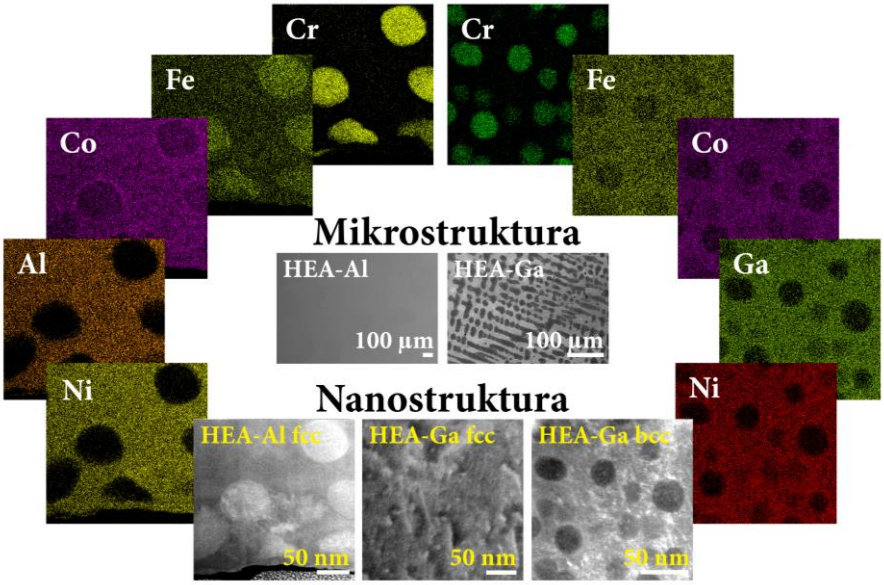
Spinodalna dekompozicija v feromagnetnih visokoentropijskih zlitinah

Andreja Jelen[1] in Janez Dolinšek[1,2]

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Predstavljen je mehanizem spinodalne dekompozicije v nanostrukturiranih visokoentropijskih zlitinah (angl. *high-entropy alloys* – HEA), ki temeljijo na feromagnetnih (FM) 3d-elementov Co, Fe in Ni. Te zlitine izkazujejo zanemarljivo majhno histerezno zanko in izjemno magnetno mehkost. Medtem ko spinodalno dekompozicijo v nemagnetnih HEA-jih običajno poganjata lokalno neujemanje prostornin in deformacija kristalne mreže zaradi različnih atomskih polmerov, ta raziskava za feromagnetne sisteme, predlaga bistveno drugačen izvor [1].

Z natančno analizo nanostrukturirane zlitine GaCoCrFeNi – v kateri imajo vsi elementi zelo podobne atomske polmere – dokazujemo, da strukturne nestabilnosti ne povzroča deformacijska energija kristalne mreže. Namesto tega je dekompozicija vodena magnetno, in sicer prek feromagnetnega reda kratkega dosega znotraj klastrov, bogatih s Co, Fe in Ni. To urejanje se pojavi pri temperaturah, ki so precej nad prehodom v feromagnetni red dolgega dosega, kar posledično dovolj zniža magnetno Gibbsovo prosto energijo (G_{mag}), da se stabilizira nanostrukturirano stanje. V tem stanju se nanodomene, obogatene s feromagnetnimi elementi, izmenjujejo z nemagnetnimi ali antiferomagnetnimi fazami. To ustvarja za zlitino specifične nanovzorce, ki jih je mogoče vizualizirati na podlagi kemijskega kontrasta (slika 1). Enako obnašanje je opaženo v sorodni zlitini AlCoCrFeNi, kar dodatno potrjuje magnetni izvor spinodalne dekompozicije v teh materialih.



Slika 1: Mikrostruktura dveh FM HEA zlitin: AlCoCrFeNi (HEA-Al) in GaCoCrFeNi (HEA-Ga), posneta s povratno sipanimi elektroni v vrstičnem elektronskem mikroskopu, ter nanostruktura, posneta v temnem polju pod visokim kotom s presevnim elektronskim mikroskopom. Ob straneh so mape prisotnosti posameznih elementov, posnete s tehniko energijsko disperzivne spektroskopije.

[1] A. Jelen et al. *ChemPhysChem* (2026) **27**:e202500653

Plazemsko podprta površinska modifikacija Ti_2C MXenov za visokozmogljive superkondezatorje

Laura Martinčič[1,2], Anjana Baby[1] in Neelakandan M. Santhosh[1,2] in Uroš Cvelbar[1,2]

1. Odsek za plinsko elektroniko (F6) IJS, Ljubljana
2. Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana

Naraščajoče potrebe po trajnostnih in obnovljivih virih energije, povezane s hitro industrializacijo in vse večjim izčrpavanjem fosilnih goriv, spodbujajo razvoj učinkovitih sistemov za shranjevanje energije. Med obetavnimi tehnologijami se uveljavljajo superkondenzatorji, ki jih odlikujejo visoka gostota moči, hitro polnjenje in praznjenje, nizko samopraznjenje ter dobra dolgoročna stabilnost. Njihovo širšo uporabo pa še vedno omejuje razmeroma nizka energijska gostota, ki je v veliki meri odvisna od lastnosti elektrodnih materialov. Med potencialnimi elektrodnimi materiali so se posebej uveljavili MXeni-dvodimenzionalni karbidi in nitridi prehodnih kovin. Zaradi svoje visoke električne prevodnosti, možnosti prilagajanja površinske kemije materiala in visoke mehanske stabilnosti so še posebej obetavni pri sintezi elektrod za superkondenzatorje [1]. V okviru te raziskave smo preučevali elektrokemijske lastnosti MXena Ti_2C, sintetiziranega z nadzorovanim jedkanjem MAX faze Ti_2AlC z amonijevim bifluoridom. Takšen pristop predstavlja varnejšo in okolju prijaznejšo alternativo konvencionalnemu jedkanju s fluorovodikovo kislino (HF), saj zmanjšuje nastajanje strupenih stranskih produktov ter omogoča lažjo površinsko funkcionalizacijo Ti_2C MXenov. Za nadaljnje izboljšanje elektrokemijskih lastnosti smo plastovite MXene z značilno »harmonikasto« strukturo podvrgli blagi plazemski obdelavi, s katero smo povečali število elektrokemijsko aktivnih mest na njegovi površini. Površino Ti_2C smo nato funkcionalizirali z žveplovo plazmo, pri čemer smo površinske funkcionalne skupine –F učinkovito nadomestili s skupinami, ki vsebujejo žveplo. Vgradnja žvepla poveča število redoks-aktivnih mest v MXenu, s čimer izboljša njegovo psevdokapacitivnost, okrepi interakcije med elektrodo in elektrolitom ter zmanjša upor pri prenosu naboja [2]. Tako pripravljene elektrode S-Ti_2C so dosegle specifično kapacitivnost 733 F g^{-1} pri tokovni gostoti 1 A g^{-1} ter ohranile visoko elektrokemijsko stabilnost tudi po 10.000 ciklih. Na podlagi teh rezultatov smo izdelali tudi asimetrično superkondenzatorsko celico, ki je pokazala stabilno elektrokemijsko delovanje in potencial za dolgotrajno uporabo. Rezultati potrjujejo, da plazemska obdelava predstavlja učinkovit in okolju prijazen pristop za hitro površinsko funkcionalizacijo MXenov. Z nadzorovanim spreminjanjem njihove površinske kemije in povečanjem števila elektrokemijsko aktivnih mest je mogoče pomembno izboljšati njihove lastnosti shranjevanja energije. Plazemsko površinsko inženirstvo tako predstavlja obetavno strategijo za razvoj naprednih elektrodnih materialov za visokozmogljive superkondenzatorje [1].

[1] L. Martinčič, A. Baby, J. Zavašnik, D. Vengust, N. M. Santhosh, and U. Cvelbar, Plasma-driven interlayer engineering of MXenes for high-performing supercapacitor electrodes, J. Energy Storage **180**, (2026).

[2] W. S. V. Lee, M. Leng, M. Li, X. L. Huang, and J. M. Xue, Sulphur-functionalized graphene towards high performance supercapacitor, Nano Energy **12**, 250 (2015).

Razvoj fototermalne tomografije za uporabo v biomedicini

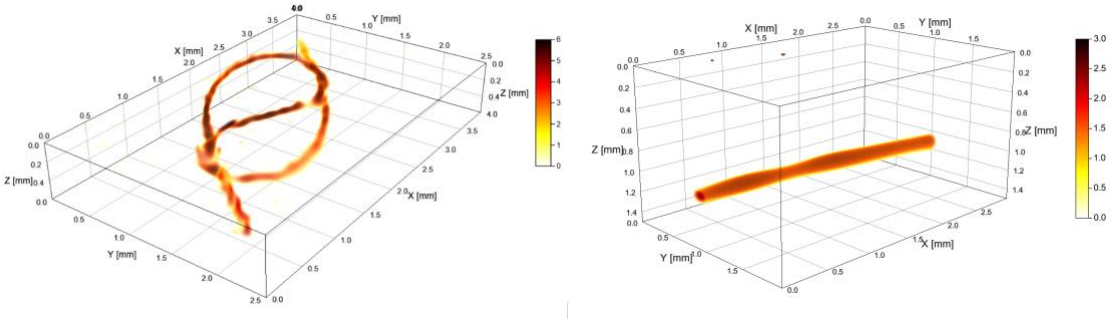
Peter Andolšek[1], Katja Arh[1] in Boris Majaron[1,2]

1. *Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana*
2. *Odsek za kompleksno snov, IJS, Ljubljana*

Prikazali bomo stanje razvoja metode za tri-dimenzionalno slikanje podpovršinskih struktur v močno sipajočih bioloških tkivih na osnovi fototermalne radiometrije - t.i. fototermalna tomografija (FTT). FTT sistem, razvit v naši skupini, zajema medicinski laser, ki oddaja milisekundne sunke vidne svetlobe, in hitro srednje-infrardečo (IR) kamero z mikroskopskim objektivom. Iz radiometričnega posnetka obsevane površine vzorca rekonstruiramo lasersko inducirani dvig temperature v njegovi notranjosti, kar omogoči vizualizacijo podpovršinskih struktur v močno sipajočih bioloških tkivih [1].

Reševanje inverznega problema toplotne difuzije in Planckovega sevanja vzorca je zahtevno predvsem zaradi njegove zelo slabe pogojenosti in nizkega razmerja signal-šum v radiometričnih posnetkih. Minimizacijo razlike med eksperimentalnim in teoretično napovedanim radiometričnim zapisom izvajamo z lastnim programjem v Pythonu. Pri tem smo uvedli več korakov predprocesiranja merskih podatkov namenjenih obvladovanju neenakomerne emisivnosti površine vzorcev, izdatnih aberacij optičnega sistema in nizko-frekvenčnega šuma srednje-IR kamere [1,2].

Razviti FTT sistem proizvaja visoko-kontrastne in dokaj ostre slike podpovršinskih struktur, kot so človeški lasje (premer 70–80 μm) vgrajeni v kolagenski gel z dodatkom močno sipajočih mikrodelcev, brez motečih artefaktov ali šuma [1–4]. Z uporabo nelinearne kompresije radiometričnih zapisov in vzporednega procesiranja rekonstruiramo volumen velikosti 4.0 x 2.5 x 0.6 mm^3 z nazivno ločljivostjo 10 μm (Slika 1, levo) v približno eni minuti.



Slika 1: Rekonstruirani sliki človeškega lasu zvitega v vozel (levo) in sintetične niti na globini 1.1 mm (desno) v močno sipajočem gelu. Barvna skala prikazuje lasersko inducirani dvig temperature v K.

[1] K. Arh, magistrsko delo, FMF, Univerza v Ljubljani (2023)
[2] K. Arh, T. Cvetko in B. Majaron, Proceedings SPIE **12629**, 126290I (2023)
[3] B. Majaron, K. Arh, T. Cvetko in P. Andolšek, AITA 2025, Kobe, Abstract Book, 84 (2025)
[4] B. Majaron, P. Andolšek, K. Arh in T. Cvetko, ICPPP 23, Bonito, Abstract Book, 107-8 (2026)

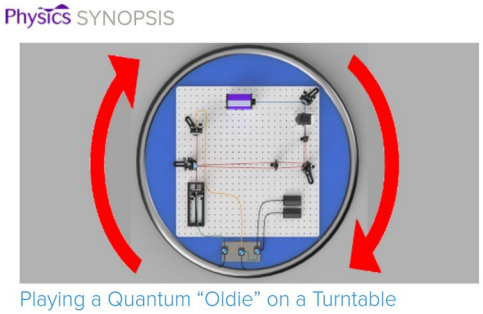
Kvantna optika in mehanske rotacije

Marko Toroš[1]

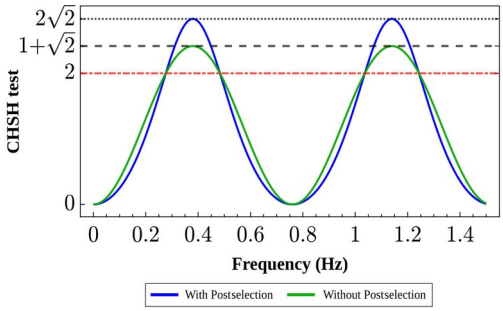
1. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Jadranska 19, SI-1000 Ljubljana

Pregledali bomo nedavne eksperimentalne in teoretične rezultate kvantne optike na vrtečih se platformah, ki odpirajo nove možnosti za temeljne raziskave in kvantne tehnologije. Ti sistemi omogočajo preverjanje teoretičnih napovedi kvantne mehanike v neinercialnih opazovalnih sistemih, kjer lahko raziskujemo vpliv relativističnih učinkov na kvantne pojave. Nadzorovanje kvantnih pojavov z nizkofrekvenčnimi mehanskimi rotacijami odpira tudi možnosti za razvoj novih metod zaznavanja rotacijskega gibanja ter ustvarjanje in nadzor kvantnih stanj svetlobe.

Eksperimenti so pokazali, da nizkofrekvenčne mehanske rotacije vplivajo na statistiko fotonskih parov [1] ter omogočajo nadzorovan prehod med združevanjem fotonov (bozonskim obnašanjem) in njihovim razdruževanjem (fermionskim obnašanjem) v kontekstu Hong–Ou–Mandelove interference [2,3]. Teoretično je bilo napovedano tudi ustvarjanje kvantne prepletenosti z mehanskimi rotacijami [4] ter ustvarjanje nelokalnih kvantnih korelacij, ki v eksperimentalno dostopnem režimu omogočajo maksimalno kršitev Clauser–Horne–Shimony–Holtove (CHSH) neenakosti [5].



Slika 1: Kvantna optika in mehanske rotacije (*Physics* 12, s103).



Slika 2: Odvisnost CHSH vrednosti od frekvence vrtenja.

[1] S Restuccia, M Toroš, GM Gibson, H Ulbricht, D Faccio, MJ Padgett, Photon bunching in a rotating reference frame Phys. Rev. Lett. **123**, 110401 (2019)
[2] M Toroš, S Restuccia, GM Gibson, M Cromb, H Ulbricht, MJ Padgett, D Faccio. Revealing and concealing entanglement with noninertial motion Phys. Rev. A **101**, 043837 (2020)
[3] M Cromb, S Restuccia, GM Gibson, M Toroš, MJ Padgett, D Faccio, Mechanical rotation modifies the manifestation of photon entanglement Phys. Rev. Research **5**, L022005 (2023)
[4] M Toroš, M Cromb, M Paternostro, D Faccio, Generation of Entanglement from Mechanical Rotation Phys. Rev. Lett. **129**, 260401 (2022)
[5] M Toroš, MC Braidotti, S Ashutosh, M Paternostro, MJ Padgett, D Faccio, Generating quantum non-local entanglement with mechanical rotations Phys. Rev. Research **7**, 033197 (2025)

Primerjava izračunov zakasnele toplote izgorelega jedrskega goriva z meritvami

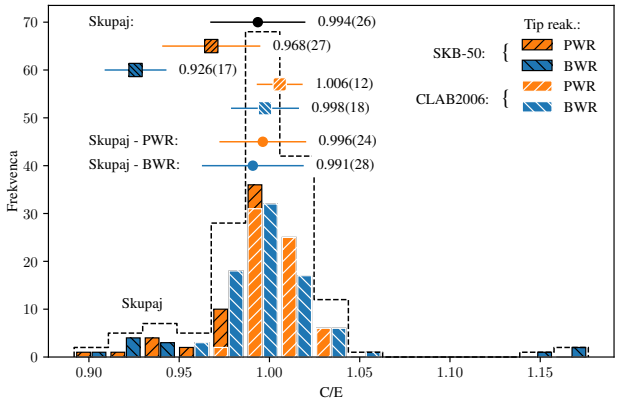
Gašper Letnar[1,2] in Luka Snoj[1,2]

1. Odsek za reaktorsko fiziko, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

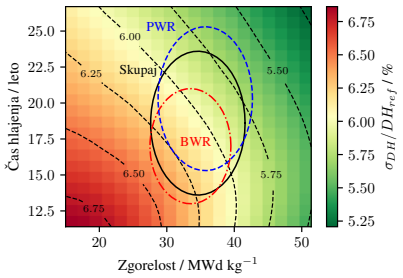
V jedrski industriji se za izračun parametrov izgorelega goriva pogosto uporablja Monte Carlo transport nevtronov. Eden izmed pomembnih parametrov je zakasnela toplota, ki ima ključno vlogo pri načrtovanju odlagališč in sistemov za hlajenje izgorelega jedrskega goriva. V praksi se za karakterizacijo zakasnele toplote še vedno zanašamo na numerične izračune, zato je poznavanje natančnosti računskih pristopov ključnega pomena.

V plakatu predstavimo primerjavo izračunov zakasnele toplote izgorelega jedrskega goriva z Monte Carlo programom Serpent z meritvami, izvedenimi v švedskem prehodnem skladišču za izgorelo jedrsko gorivo (CLAB) [1]. Meritve so zbrane v največjima zbirkama meritev zakasnele toplote CLAB2006 [1] in EPRI2024 [2], slednji vključuje ponovno evaluirane meritve iz CLAB2006 in še neobjavljene izmerke (SKB-50). Z izračunom 173 modelov gorivnih elementov s knjižnico jedrskih podatkov ENDF/B-VIII.1 smo določili povprečno razmerje med izračunano in izmerjeno zakasnelo toploto (C/E): 0.994(24) za tlačnovodne reaktorje (PWR) in 0.991(28) za vrelovodne reaktorje (BWR) kar kaže na dobro ujemanje med izračuni in meritvami (slika 1).

Analiziramo tudi prispevek pobega fotonov iz merilne naprave (sklopljen transport nevtronov in fotonov), ki minimalno vpliva na razmerja C/E. S poenostavljenim modelom in metodo kovarianc ocenimo še vpliv nedoločenosti jedrskih podatkov na izračun zakasnele toplote (slika 2).



Slika 1: Porazdelitev razmerij C/E glede na tip reaktorja in zbirko meritev.



Slika 2: Relativna nedoločenost zakasnele toplote (DH) zaradi nedoločenosti v jedrskih podatkih glede na zgorelost in čas hlajenja.

[1] SKB, Measurements of Decay Heat in Spent Nuclear Fuel at the Swedish Interim Storage Facility, Clab, Tech. Rep. R-05-62 (2006)
[2] EPRI, Spent Fuel Decay Heat Measurements at Clab: Description of Decay Heat Measurements from 2003–2021 Under EPRI-SKB Collaboration, Tech. Rep. 3002026549 (2024)

Karakterizacija toka v zunanje hlajeni slepi cevi s predpisanim robnim pogojem na ustju

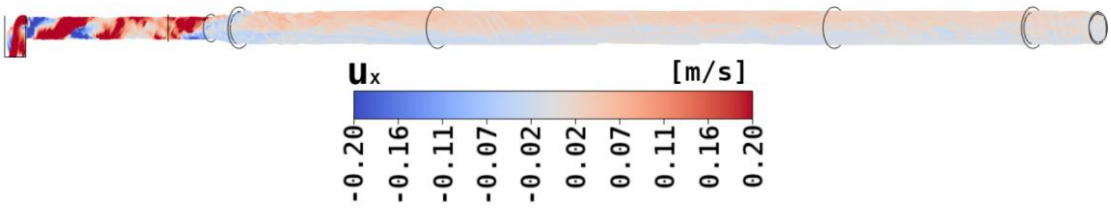
Jan Kaufman[1], Martin Draksler[1] in Boštjan Končar[1]

1. Odsek za reaktorsko tehniko, IJS, Ljubljana

Za toplotno neizolirane slepe cevi, ki so termohidravlično povezane z glavnim tokom vroče tekočine, je značilen izrazito kompleksen in fizikalno zanimiv tokovni sistem. V območju priključka se v mnogih konfiguracijah vzpostavi turbulentni vrtinčni tok v obliki vijačnice, ki prodira v slepo cev, medtem ko se v hlajenem delu cevi vzpostavita temperaturna razslojenost in naravna konvekcija. Takšne konfiguracije najdemo na primer v primarnih sistemih nekaterih jedrskih elektrarn, med drugim tudi v Nuklearni elektrarni Krško (NEK), kjer je slepa cev del sistema za varnostno vbrizgavanje. Zaradi prehodne, tridimenzionalne in anizotropne narave toka je numerično napovedovanje termohidravličnih pojavov v slepih ceveh zelo zahtevno. Dosedanje analize kažejo, da so rezultati CFD-simulacij močno odvisni od nastavitev numeričnega modela, predvsem od izbire turbulentnega modela, robnih pogojev, ločljivosti računske mreže in uporabljenih numeričnih metod [1].

Z uporabo metod računske dinamike tekočin (CFD) je bila izvedena numerična analiza dinamike toka in prenosa toplote v slepi cevi sistema za varnostno vbrizgavanje v NEK. Cilj analize je bil raziskati, ali je mogoče ključne značilnosti toka ustrezno napovedati tudi z geometrijsko reduciranim simulacijskim modelom, pri katerem tok v povratnem kanalu reaktorske posode ni eksplicitno simuliran, temveč je njegov vpliv predstavljen z robnim pogojem na ustju slepe cevi. S takšno poenostavitvijo se zmanjša velikost računske domene in posledično računska zahtevnost simulacij.

Analiza je pokazala, da je med obravnavanimi načini predpisovanja robnih pogojev najprimernejši predpis tlačnega polja na ustju slepe cevi, saj omogoča časovno odvisen odziv toka na trenutno stanje v računski domeni. Z reduciranim simulacijskim modelom je bilo mogoče kvalitativno reproducirati glavne značilnosti obravnavanega tokovnega režima. Hkrati je bila ugotovljena izrazita občutljivost rezultatov na gostoto računske mreže, predvsem pri napovedi globine vdora turbulentnega vrtinca in temperaturnega odziva cevi. Rezultati kažejo, da geometrijsko reducirani model predstavlja obetaven pristop za računsko manj zahtevno analizo glavnih termohidravličnih značilnosti slepih cevi, pri čemer je treba upoštevati precejšnjo negotovost numeričnih rezultatov.



Slika 1: Prikaz tokovnic v tipičnem tokovnem režimu v slepi cevi, ki se je vzpostavil v simulacijah s predpisanim tlačnim poljem na ustju slepe cevi.

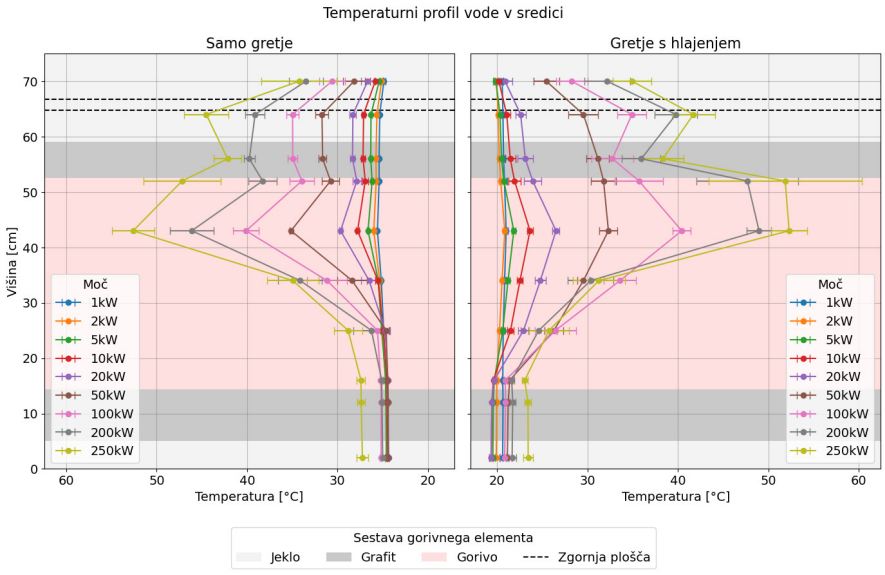
[1] M. Draksler in I. Tiselj, Challenges in Simulating Swirl Flow in Externally Cooled Safety Injection Dead-End Pipe Connected to RPV, 21st International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-21) (American Nuclear Society, Inc., 2025).

Vpliv moči reaktorja in hlajenja bazena na temperaturno porazdelitev v sredici reaktorja TRIGA

Simon Lončarič[1,2],Abhishek Singh[2,3], Blaž Mikuž[3], Klemen Ambrožič[1,2]

1. Odsek za reaktorsko fiziko, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. Odsek za Reaktorsko tehnikoIJS, Ljubljana

V okviru eksperimentalne kampanje na raziskovalnem reaktorju TRIGA Mark II IJS smo s sistemom Thermal Hydraulics Observation in a Reactor (THOR) merili temperaturno porazdelitev vode v sredici pri različnih močeh reaktorja, brez hlajenja in z vključenim hladilnim sistemom. Kampanja je potekala 24. in 25. 9. 2026 v okviru projekta EVEREST (GA №101163288) z namenom nadgraditi predhodne raziskave temperaturnega kartiranja in pridobiti podatke za validacijo večfizikalnih simulacij. Meritve smo izvedli na poziciji MP21 z desetimi termočleni, nameščenimi na višinah od 2 do 70 cm in usmerjenimi proti gorivnemu elementu na poziciji D3. Za vsak termočlen smo izračunali povprečno temperaturo in standardni odklon v 500-sekundnem časovnem oknu. Brez hlajenja je voda pri močeh 1–10 kW približno izotermna, pri 20 kW in več pa se pojavi temperaturni maksimum v zgornjem delu goriva, ki doseže približno 52 °C pri 250 kW. Nad gorivom temperatura pada nemonotono, pri čemer ponovni porast na 64 cm nakazuje zastajanje tople vode pod zgornjo ploščo. Z vključenim hlajenjem je profil pri nizkih močeh enakomeren. Pri visokih močeh maksimalna temperatura ostane okoli 52 °C, spremeni se pa oblika temperaturnega profila, vroče območje se razširi, temperatura na 52 cm pa je pri 250 kW višja kot brez hlajenja (52 proti 47 °C), medtem ko je na 64 cm nižja (41,7 proti 44,5 °C). Standardni odkloni pri visokih močeh dosežejo do 8 °C, vendar lahko deloma odražajo časovne trende. Rezultati kažejo, da hlajenje ne zmanjša maksimalne temperature pri visokih močeh, temveč prerazporedi temperaturo po višini sredice in spremeni obliko temperaturnega profila.



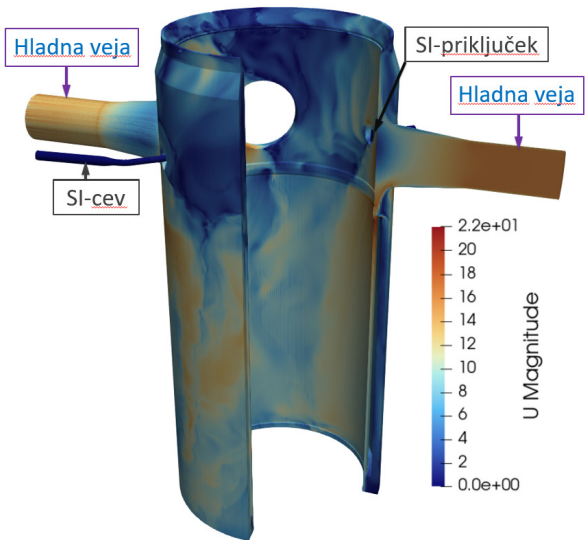
Slika 1: Temperaturni profil vode v sredici na merilni poziciji MP21

Simulacija turbulentnega toka hladila v povratnem kanalu jedrske elektrarne Krško

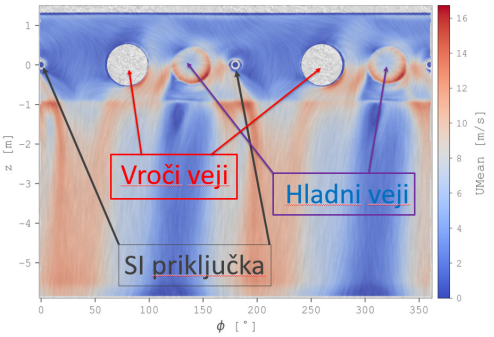
Žan Butala[1,2], Martin Draksler[1], Blaž Mikuž[1] in Iztok Tiselj[1,2]

1. Odsek za reaktorsko tehniko, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

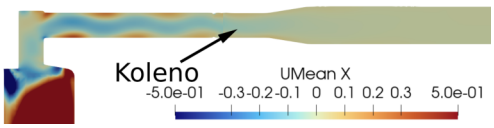
Puščanje na sistemu varnostnega vbrizgavanja v Nuklearni elektrarni Krško (NEK) oktobra 2023 je sprožilo obsežno preiskavo, v kateri je bilo kot glavni vzrok poškodbe ugotovljeno toplotno utrujanje [1]. K njegovemu nastanku prispevajo tokovne razmere v horizontalni slepi cevi varnostnega vbrizgavanja (SI-53), kamor iz povratnega kanala vdira vroča tekočina, medtem ko ohlajanje cevovoda iz okolice omogoča nastanek temperaturne razslojenosti. V tej raziskavi smo se osredotočili na razvoj časovno odvisnih tokovnih struktur v celotnem povratnem kanalu in njihov vpliv na vstop tekočine v cev SI-53. Z numeričnimi simulacijami v programskem okolju OpenFOAM v10 smo analizirali nestacionarni, nestisljivi in izotermni turbulentni tok v povratnem kanalu reaktorske posode z začetnim delom cevi varnostnega vbrizgavanja. Uporabili smo hibridni turbulentni model k–ω SST-DES [2] na računski mreži z 8.40 milijona računskih celic. Rezultati kažejo izrazito nehomogeno in nestacionarno tokovno polje v povratnem kanalu. Na priključku cevi varnostnega vbrizgavanja nastane vijačni tok, pri katerem hladilo vstopa predvsem ob obodu cevi, v osrednjem delu pa se vrača proti reaktorski tlačni posodi. Analiza časovnih signalov hitrosti pokaže širokopasovne fluktuacije brez izrazite dominantne frekvence. Rezultati se v okviru negotovosti ujemajo z rezultati predhodnih simulacij, ki so obravnavale ožje računsko območje, omejeno na cev SI-53, in so vključevale tudi temperaturno polje ter prenos toplote skozi stene [3].



Slika 1: Trenutna magnituda hitrosti v povratnem kanalu v tričetrtinskem prerezu.



Slika 2: Magnituda časovno povprečene hitrosti na razprti cilindrični ploskvi.



Slika 3: Vzdolžna komponenta povprečne hitrosti v SI-53 cevi.

[1] S. Manojlovič, SI-53 direct cause analysis report, Proceedings of the 33rd International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE 2024) (2024)
[2] P. R. Spalart, Detached-Eddy Simulation, Annu. Rev. Fluid Mech. **41**, 181–202 (2009)
[3] M. Draksler, I. Tiselj, B. Mikuž, J. Kren, L. Cizelj, D. Grgić, S. Šadek in P. Družijanić, Proceedings of the 34th International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE 2025), str. 36–45 (2025)

Modeliranje disipativne dinamike z nevronskimi mrežami

Gianluca Lagnese[1], Laurin Brunner[2], Lorenzo Rossi[3], Darrick Chang[3,4], Markus Schmitt[5,6] in Zala Lenarčič[1]

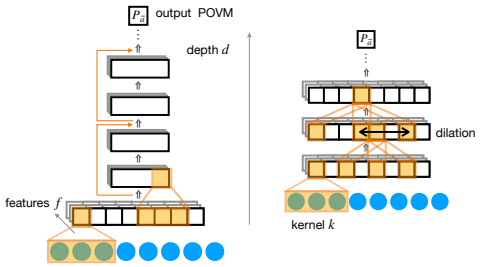
1. Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija
2. Inštitut za fiziko, Teoretična fizika III, Center za elektronske korelacije in magnetizem, Univerza v Augsburgu, Augsburg, Nemčija
3. ICFO – Inštitut za fotonske znanosti, BIST, Castelldefels, Španija
4. ICREA – Katalonska ustanova za raziskave in napredne študije, Barcelona, Španija
5. Raziskovalni center Jülich, Inštitut Peter Grünberg 8 (Kvantno krmiljenje), Jülich, Nemčija
6. Inštitut za teoretično fiziko, Univerza v Regensburgu, Regensburg, Nemčija

Umetna inteligenca postaja vse pomembnejše orodje v znanosti, pri čemer imajo nevronske mreže osrednjo vlogo. Kako dobro lahko te mreže opišejo valovno funkcijo ali gostotno matriko kompleksnih kvantnih stanj ter simulirajo dinamiko kvantnih sistemov?

V prispevku predstavimo uporabo nevronskih mrež za opis disipativne dinamike kvantnih sistemov s sklopitvijo med svetlobo in snovjo. Ti sistemi zaradi prepleta interakcij z dolgim dosegom in korelirane disipacije predstavljajo zahteven preizkus numeričnih metod. Gostotno matriko predstavimo z verjetnostmi merilnih izidov, ki jih parametriziramo z nevronsko mrežo, njihov razvoj pa določimo s časovno odvisnim variacijskim načelom [1].

Metodo uporabimo za simulacijo kolektivnega sevanja približno 40 atomov v gostih enodimenzionalnih in dvodimenzionalnih mrežah. Zajamemo prehod od hitrega superradiantnega sevanja do počasne subradiantne dinamike, pri kateri postanejo semiklasični približki [2] manj zanesljivi. Natančnost preverimo s primerjavo z eksaktnimi rezultati za manjše sisteme in s povečevanjem nevronskih mrež.

Rezultati [3] pokažejo, da lahko nevronske mreže opišejo večdelčno dinamiko in korelacije pri velikostih, ki presegajo zmogljivosti eksaktnih metod in metod tenzorskih mrež, ter odpirajo nove možnosti za preučevanje atomskih kvantnih simulatorjev.



Slika 1: Arhitekturi za opis nevronskih kvantnih stanj: rezidualna mreža (ResNet, levo) in dilatirana konvolucijska mreža (dCNN, desno).

[1] M. Reh, M. Schmitt in M. Gärtner, Physical Review Letters **127**, 230501 (2021)
[2] O. Rubies-Bigorda, S. Ostermann in S. F. Yelin, Physical Review Research **5**, 013091 (2023)
[3] G. Lagnese, L. Brunner, L. Rossi, D. Chang, M. Schmitt in Z. Lenarčič, arXiv:2605.04640 (2026)

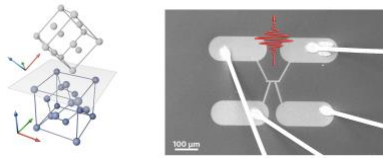
Programirljiv superprevodnik, ustvarjen s svetlobo

Viktoria Yursa[3,2], Igor Vaskivskyi[1,3], Anže Mraz[1], Damjan Svetin[1,3], Sergej Ražnjević[1], Vinko Sršan[1], Sašo Šturm[1], Tomaž Mertelj[1,3], Mikhail Feigel'man[1,3] in Dragan Mihailovic[1,2,3]

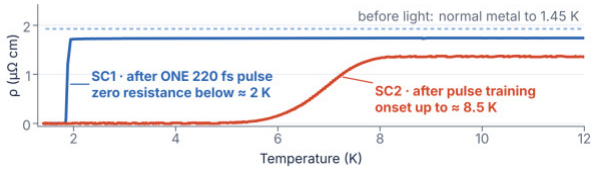
1. Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani
3. CENN Nanocenter, Ljubljana, Slovenija

Ustvarjanje in nadzor superprevodnosti s svetlobo sta že dolgo med cilji raziskav v fiziki. V tem delu pokažemo, da lahko na meji med tanko aluminijevo plastjo in silicijem ustvarimo superprevodno stanje, ki ga je mogoče programirati s svetlobo (LiPS). En sam laserski sunek (220 fs, 1035 nm) preklopi sistem v superprevodno stanje z ničelno električno upornostjo pri približno 2 K. Z ustrezno izbranimi zaporedji sunkov lahko temperaturo začetka upornostnega prehoda zvišamo na 8,5 K ali sistem vrnemo v normalno stanje, kar omogoča večkratno preprogramiranje iste naprave. Programirano stanje se brez nadaljnjega osvetljevanja ohrani, dokler je temperatura vzorca nižja od približno 50 K. S segrevanjem vzorca na sobno temperaturo stanje ponastavimo.

Meritve električnega transporta v stanju SC1 pokažejo oster prehod do ničelne upornosti, v stanju SC2 pa širok upornostni prehod. Presevna elektronska mikroskopija na meji med aluminijem in silicijem razkrije mrežo dislokacij zaradi neujemanja kristalnih mrež, ki spominja na moirejev vzorec. Predlagamo, da lasersko segrevanje ob vbrizgavanju naboja preuredi to mrežo in da pregibi vzdolž dislokacijskih linij pomagajo stabilizirati programirano stanje. LiPS odpira pot do optično programirljivih superprevodnih naprav.



Slika 1: Al na Si(100) in naprava za štiritočkovne meritve.



Slika 2: Upornostna prehoda v stanju SC1 po enem sunku in v stanju SC2 po nizu sunkov.

[1] V. Yursa in sod., arXiv:2607.14567 (2026).

Biofizika

Primož Ziherl[1,2]

1. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Predstavil bom raziskovalno delo skupine za biofiziko na Odseku za teoretično fiziko Instituta "Jožef Stefan". Skupina s teoretičnimi in računskimi pristopi raziskuje delovanje sistemov na stičišču biologije in fizike od posameznih molekul in virusov do kompleksnih celic, tkiv in organizmov. Te biofizikalne raziskave dopolnjujemo s temeljnimi koncepti fizike mehke snovi in statistične fizike, pri čemer poseben poudarek namenjamo razvoju minimalnih modelov za razumevanje procesov na različnih prostorskih in časovnih skalah.

Od celice do zdravila: fizika, modeliranje in podatkovna znanost v razvoju podobnih bioloških zdravil

Matic Kunšek, David Seč

Tehnični razvoj podobnih bioloških zdravil, Lek d.d., Slovenija

Razvoj in proizvodnja podobnih bioloških zdravil povezujeta biologijo, fiziko, procesno tehnologijo in podatkovno znanost. Žive celice proizvajajo kompleksne beljakovine, katerih lastnosti in karakteristike so odvisne od medsebojno povezanih procesnih pogojev. Razumevanje teh povezav zahteva natančne meritve, matematično-fizikalne modele in sistematično analizo podatkov.

Predstavljali bomo razvojno in proizvodno okolje podobnih bioloških zdravil v Leku in s tem Sandozu v Sloveniji ter pot od izbire celične linije gojenja celic v bioreaktorjih, do čiščenja učinkovine, analiz in meritev kakovosti in priprave končnega zdravila. Poseben poudarek je namenjen vlogi fizikalnih pristopov: merjenju procesnih parametrov, analizi signalov, modeliranju bioprocesov in optimizaciji razvojnih odločitev. Povezovanje procesnih in analitskih podatkov z matematično-fizikalnimi modeli, strojnim učenjem in digitalnimi dvojčki omogoča boljše razumevanje procesov ter podpira zagotavljanje kakovosti in produktivnosti.

Predstavitev izpostavlja interdisciplinarne izzive, pri katerih lahko fiziki pomembno prispevajo z znanjem merilnih metod, matematike, računalniškega modeliranja in obravnave kompleksnih sistemov. Namen posterja je približati uporabo teh znanj v biofarmacevtskem okolju ter študentom predstaviti možnosti sodelovanja pri razvoju in proizvodnji podobnih bioloških zdravil.

15. Slovenska fizikalna konferenca

Zbornik povzetkov

Izdala:

Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Organizatorja:

Institut »Jožef Stefan«
Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Uredniki:

Jošt Stergar
Primož Ziherl

Izdano v elektronski obliki PDF.

Dostopno na:

https://sfk.fmf.uni-lj.si/wp-content/uploads/2026/11/Zbornik26.pdf

Ljubljana, 2026

Izvedba konference je bila omogočena s podporo Fakultete za matematiko in fiziko in Instituta Jožef Stefan.

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

<<<PREDOGLED>>

NOVARTIS

Znanost, ki spreminja življenja

V Novartisu v Sloveniji razvijamo in proizvajamo inovativna zdravila s pomočjo najsodobnejših tehnologij in vrhunskega znanja. Več kot 4.300 strokovnjakov prispeva k rešitvam, ki izboljšujejo in podaljšujejo življenja ljudi po vsem svetu.

www.novartis.si



Novartis d.o.o, Verovškova ulica 57, 1000 Ljubljana, www.novartis.si

15. Slovenska fizikalna konferenca

Zbornik povzetkov

Izdala:

Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Organizatorja:

Institut »Jožef Stefan«
Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Uredniki:

Jošt Stergar
Primož Ziherl

Izdano v elektronski obliki PDF.

Dostopno na:

https://sfk.fmf.uni-lj.si/wp-content/uploads/2026/11/Zbornik26.pdf

Ljubljana, 2026

Izvedba konference je bila omogočena s podporo Fakultete za matematiko in fiziko in Instituta Jožef Stefan.

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

COBISS.SI-ID 305787395

ISBN 978-961-6619-61-5 (PDF)