

13. KONFERENCA FIZIKOV V OSNOVNIH RAZISKAVAH

13. Konferenca fizikov v osnovnih raziskavah

Bojan Hiti Silicijevi senzori osnovnih delcev s pikosekundno časovno ločljivostjo
Miha Nemevšek Metastabilna stanja in življenjski čas Standardnega modela
Blaž Bortolato Sestava ultravisoenergijskih kozmičnih žarkov
Christopher Eckner Getting the most out of space-borne gamma-ray astronomy with simulation-based inference

Denis Golež Metastabilna stanja vzbujenih Mottovih izolatorjev
Zala Lenarčič Sledi integrabilnosti v odprtih kvantnih sistemih in kvantnih računalnikih
Matjaž Gomilšek Anizotropna spinska dinamika topoloških skirmionov in meronov v Gd_2PdSi_3
Gregor Rihtaršič Gravitacijsko lečenje v jatah galaksij skozi oči Vesoljskega teleskopa Jamesa Webba

Matjaž Humar Generacija kvantne svetlobe v mehki in biološki snovi
Zala Korenjak Laserji iz smektičnih in milnih mehurčkov
Gašper Kokot Pametni materiali iz magnetnih mikrodelcev
Marko Gosak Večcelična dinamika v omrežjih celic beta

Igor Vaskivskiy Elektronski fazni prehodi kot temelj za izdelavo programabilnih modulatorjev svetlobe
Špela Krušič Superfluorescenca iz dvojno vzbujenih stanj helija
Mateja Hrast Augerjev razpad med ultrahitro molekulske disociacijo
Jan Kren Dinamika Taylorjevega mehurja v protičnem turbulentnem toku

Ogled plakatov

Podelitev Blinčevih nagrad



13. Konferenca fizikov
v osnovnih raziskavah

ZBORNİK POVZETKOV

Brdo pri Kranju
18. november 2024

Organizatorja

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

Pokrovitelj

Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

Programski odbor

Denis Arčon, Maruša Bradač, Irena Drevenšek Olenik, Jernej Fesl Kamenik, Andreja Gomboc, Borut Paul Kerševan, Peter Križan, Dragan Mihailović, Tomaž Prosen, Nataša Vaupotič, Iztok Tiselj, Rok Žitko, Matjaž Žitnik

Organizacijski odbor

Igor Lengar
Jošt Stergar
Primož Zihel
Aljaž Robek

Uredniki

Igor Lengar
Jošt Stergar
Primož Zihel

Spletna stran

konfor.fmf.uni-lj.si

Program 13. Konference fizikov v osnovnih raziskavah Brdo pri Kranju, 18. 11. 2024

9.00-9.10	Pozdravni nagovor (Janez Bonča, Igor Lengar)
9.10-9.40	Bojan Hiti: Silicijevi senzorji osnovnih delcev s pikosekundno časovno ločljivostjo
9.40-9.55	Miha Nemevšek: Metastabilna stanja in življenjski čas Standardnega modela
9.55-10.10	Blaž Bortolato: Sestava ultravisokoenergijskih kozmičnih žarkov
10.10-10.25	Christopher Eckner: Getting the most out of space-borne gamma-ray astronomy with simulation-based inference
10.25-10.55	Odmor
10.55-11.25	Denis Golež: Metastabilna stanja vzbujenih Mottovih izolatorjev
11.25-11.40	Zala Lenarčič: Sledi integrabilnosti v odprtih kvantnih sistemih in kvantnih računalnikih
11.40-11.55	Matjaž Gomilšek: Anizotropna spinska dinamika topoloških skirmionov in meronov v Gd_2PdSi_3
11.55-12.10	Gregor Rihtaršič: Gravitacijsko lečenje v jatah galaksij skozi oči Vesoljskega teleskopa Jamesa Webba
12.10-13.40	Kosilo
13.40-14.10	Matjaž Humar: Generacija kvantne svetlobe v mehki in biološki snovi
14.10-14.25	Zala Korenjak: Laserji iz smektičnih in milnih mehurčkov
14.25-14.40	Gašper Kokot: Pametni materiali iz magnetnih mikrodelcev: magneto-aktivni elastomeri
14.40-14.55	Marko Gosak: Večcelična dinamika v omrežjih celic beta: spoznanja iz večceličnega slikanja fenomenoloških modelov in mrežnih analiz
14.55-15.25	Odmor
15.25-15.55	Igor Vaskivskiy: Elektronski fazni prehodi kot temelj za izdelavo programabilnih modulatorjev svetlobe
15.55-16.10	Špela Krušič: Superfluorescenca iz dvojno vzbujenih stanj helija
16.10-16.25	Mateja Hrast: Augerjev razpad med ultrahitro molekulska disociacijo
16.25-16.40	Jan Kren: Dinamika Taylorjevega mehurja v protitočnem turbulentnem toku
16.40-17.50	Ogled plakatov
18.00-19.00	Podelitev Blinčevih nagrad
19.00-21.00	Večerja
21.00	Odhod avtobusov

Seznam plakatov

P1	Agrež Vid	Pojav filamentov ob kolapsu kavitacijskega mehurčka
P2	Andrenšek Urška	Elastična teorija podprtih epitelnih tkiv
P3	Aupič Polona	Kalorični pojav v tekočih kristalih pri neravnovesnem vklapljanju zunanega polja
P4	Barač Uroš	Dinamična robustnost omrežja multimodalnih oscilatorjev
P5	Conradi Marjetka	Primerjava vpliva laserskega teksturiranja in peskanja na lastnosti površine magnezija
P6	Duh Maja	Prostorsko organizirana heterogenost kroji modularno naravo in funkcionalnost omrežij celic beta
P7	Beltram Vitja	Dinamika ionov, električni potencial in aktivnost v nematskih tekočinah
P8	Cmok Luka	Raziskave na področju fizike mehke snovi v skupini Svetloba in snov
P9	Toroš Marko	Kvantna optika in mehanske rotacije
P10	Gosar Katja	Bosejevi ognjemeti v zlatem rezu
P11	Jagodič Uroš	Urejanje tekočih kristalov s 3D tiskom
P12	Kanduč Matej	Adsorpcija surfaktantov in micelizacija: Vpogledi iz molekularnih simulacij
P13	Kelemen Mitja	Sistem za kreacijo in verifikacijo kvantnih centrov blizu površine
P14	Kogovšek Žiber Ylenia	Hitrost doze po zaustavitvi v fuzijskih reaktorjih
P15	Gabrijelčič Matej	Raziskovanje delovanja negrafitiziranega ogljika in $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$ v Na-ionskih akumulatorjih s pomočjo operando jedrske magnetne resonance v trdnem
P16	Gazdag Urška	Funkcionalizacija SiO_2 površin z alkoksi silani
P17	Hauko Robert	Rentgenski absorpcijski spektri HI na jodovih robovih K in L : učinki molekularskih orbital in notranjih podlupin
P18	Humar Gregor	Skaliranje eksitacij pri prehodu prvega reda na kvantnem žarilniku
P19	Knaflič Tilen	Strukturni nered in naključne izmenjalne interakcije na trikotni mreži v spinskem sistemu $\text{Cr}_3\text{Se}_2\text{Br}_4$
P20	Kokalj Katarina	Simulacije molekulske dinamike fluoriranega etanola
P21	Koželj Primož	CeFe_9Si_4 : Magnetizem v kovinski spojini z atomi prehodnih elementov in redkih zemelj
P22	Lozar Andrej	Meritev razvejitvenega razmerja razpada $D^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$ z detektorjem Belle in Belle II
P23	Kokot Boštjan	Edinstvena kombinacija mikroskopije s strukturirano osvetlitvijo, projekcijskim in fazno kontrastnim slikanjem
P24	Kolar Darko	Meritve lastnosti saharkega prahu s prototipom Ramanskega lidarja nad observatorijem CTAO-North
P25	Komelj Matej	Kvantno računanje in magnetni skyrmioni
P26	Kos Žiga	Neravnovesna topološka mehka snov
P27	Košir Gregor	dE-E detektor za HISPEC-10 eksperiment
P28	Kovač Klemen	Optična manipulacija bipolaronov v sistemu z nelinearno elektron-fononsko sklopitvijo
P29	Kralj Lana	Vrednotenje mikrocirkulacije s pomočjo valčne analize: vpliv robnih efektov
P30	Lekše Peter	Obdelava kvantno izmenjanega ključa
P31	Malok Matjaž	Vbrizgavanje naboja v nanocevko MoS_2
P32	Medoš Gregor	Prepletenostna entropija kvantno kaotičnega mnogodelčnega sistema bozonov z ohranitvijo števila delcev
P33	Merzel Franci	Kolektivna Langevinova dinamika počasnih gibanj v biomolekularnih sistemih
P34	Mur Jaka	Študija kavitacijskih pojavov v interakciji med sferičnim in toroidnim mehurčkom
P35	Naseska Mimoza	Uporaba optične koherentne tomografije v kombinaciji s hidrogelnimi senzori za brezkontaktno spremljanje koncentracije glukoze in pH
P36	Northage Naomi	Dvostopenjska plazemska inaktivacija mikrobnih biofilmov v endoskopskih pripomočkih
P37	Polanšek Juš	Smer in časovna odvisnost potisne sile pri površinski razelektritvi na dielektrični pregradi
P38	Pušavec Žiga	Ozkopasovni viri prepletenih fotonov
P39	Levpušček Blaž	Tekoči nevtronski filter za validacijo jedrskih podatkov pri visokih temperaturah
P40	Lovšin Matija	Dvodimenzionalni vzorci nelinearne optične susceptibilnosti v feroelektričnih meatičnih tekočih kristalih

P41	Markelj Sabina	Vpogled v kristalno strukturo materiala s pomočjo ionskih metod
P42	Medle Rupnik Peter	Mehki značaj mehanoelektričnega sklapljanja v feroelektrični nematski tekočini
P43	Mejak Maj	Analiza frustriranega kvantnega magneta na mreži satovja z jedrsko magnetno resonanco
P44	Mesarec Luka	Vpliv koncentracije ukrivljenih nematikov na ravnovesne oblike 2D lupin
P45	Nedić Denis	Aktivacija limiterjev DEMO tokamaka
P46	Novak Nikola	Izvor ojačitve dielektrične nastavljivosti v antiferoelektrični PNZST keramiki
P47	Rajh Ava	Strukturna in kemijska analiza Na-ionskih baterij z rentgensko Ramansko spektroskopijo
P48	Ravnik Miha	Fizika mehkih snovi in fotonika
P49	Simčič Jurij	Nastanek in transport vode na luni
P50	Staniscia Fabio	Adsorpcija surfaktantov na ukrivljenih površinah
P51	Šako Marin	Kavitacija v vodi: Vpliv nepolarnih nečistoč
P52	Vaupotič Matevž	Kvantni spomin z vročimi atomi
P53	Zaplotnik Jaka	Uporaba nevronske mreže za prepoznavanje elastičnih konstant in struktur tekočih kristalov iz optičnih meritev
P54	Železnik Urban	Mehanika celičnih agregatov kot modelov tumorjev
P55	Novosel Anja	Iskanje razpada $B^0 \rightarrow \pi^- \tau^+ \nu_\tau$ na eksperimentu Belle II
P56	Pintar Rok	Polinomsko filtrirana natančna diagonalizacija v kvantnih mnogodelčnih sistemih
P57	Pirman Jure	Nadgradnja slovenskega eksperimenta s hladnimi atomi
P58	Pirnat Gregor	Kapljični mikroresonatorji za preučevanje mehkih in bioloških materialov
P59	Pogačnik Krajnc Anja	Aktivacija površine MoS ₂ nanocevk za fotokatalitično razgradnjo organskih onesnaževalcev voda
P60	Potrč Melani	Spontano urejanje zaporedij d(G ₄ C ₂): od DNK-kvadrupleksov do tekočokristalnih faz
P61	Pungerčič Anže	Uporaba metode fisiskih matrik za izračun transporta nevtronov v jedrskem reaktorju
P62	Razdevšek Ravnik	Naslednja generacija hitrega pozitronskega tomografa s časom preleta
P63	Rozman Jan	Vloga medceličnega trenja pri kolektivnem gibanju celic
P64	Stopar Ema	Spektroskopija Rydbergovih atomov
P65	Straus Izidor	Aktivni mikrofluidični kanali s komponentami iz magnetoaktivnega elastomera (MAE)
P66	Strohsack Jaka	Ultrahitro optično preklapljanje magnetne anizotropije v heterostrukturi Pt/Co/H ₂ Pc
P67	Šalamun Gaja	Izvor prepletenih fotonov na osnovi nelinearnega kristala
P68	Šetina Batič Barbara	Uklon povratno sipanih elektronov (EBSD Electron Backscatter Diffraction) v preiskavah kovinskih materialov
P69	Tkalec Uroš	Frustrirane dipolne rešetke v ograjeni plasti nematika
P70	Turnšek Janez	Samo-ojačevanje spontane emisije iz dvojno vzbujenih helijevih atomov
P71	Van Midden Mavrič Marion Antonia	Preučevanje inkapsulacije azafulerenskih radikalov z vrstičnim tunelskim mikroskopom
P72	Vilfan Andrej	Liha viskoznost v aktivnih tekočinah
P73	Žitnik Matjaž	Ujetje hitrega fotoelektrona pri razpadu vrzeli K

Glavni sponzor

Fotona[●]
choose perfection

Zlata sponzorja

 LUMENTUM

 ATOM
QUANTUM
LABS

Sponzor

 hse

Podpornik

 Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije

PREDAVANJA

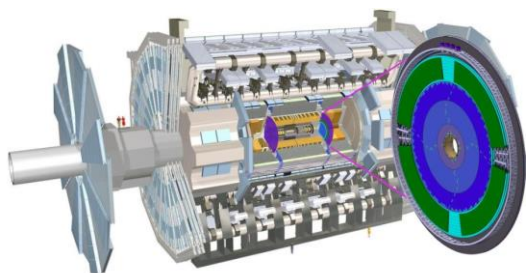
Silicijevi senzorji osnovnih delcev s pikosekundno časovno ločljivostjo

Bojan Hiti¹

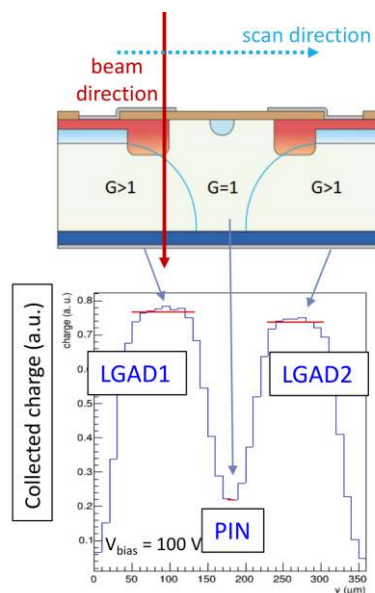
1. Odsek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev, IJS, Ljubljana

Na odseku za eksperimentalno fiziko delcev F9 na Institutu Jožef Stefan sodelujemo pri eksperimentu ATLAS na trkalniku LHC v CERN-u, kjer delujemo tudi na področju razvoja in izdelave polprevodniških detektorjev delcev ter metod za njihovo karakterizacijo. V letih 2026–2029 bo narejena nadgradnja LHC-ja za visoko luminoznost, ki cilja na povečanje pogostosti trkov za faktor 3–5 in integrirane luminoznosti za faktor 7 glede na trenutno stanje. Zaradi izredne gostote trkalnih produktov bo v eksperimentu ATLAS potrebna izgradnja dodatnega sistema HGTD (High Granularity Timing Detector), ki bo zaznaval čas prihoda delcev z ločljivostjo 50 ps ter tako pomagal pri razločevanju med delci, ki izvirajo iz ločenih trkov.

Na F9 sodelujemo pri izdelavi nove vrste silicijevih senzorjev LGAD (Low Gain Avalanche Detector) z notranjim ojačenjem in visokim razmerjem signal-šum, ki je potrebno za takšno časovno ločljivost. Predstavil bom aktivnosti, ki jih med izdelavo opravljamo na F9 s poudarkom bo na metodi, ki smo jo razvili za nadzor kvalitete sevalne odpornosti v izdelavi senzorjev LGAD. Metoda temelji na tehniki TCT (Transient Current Technique), ki preučuje signale iz senzorja po vzburjanju s pulziranim laserjem. V zaključku bom predstavil še vizijo prihodnjih trkalnikov v CERN-u in pripadajoče področje razvoja novih detektorskih tehnologij.



Slika 1: Shema sistema HGTD v eksperimentu ATLAS.



Slika 2: Meritev zbranega naboja v senzorju LGAD na območju z in brez ojačenja.

Metastabilna stanja in življenjski čas Standardnega Modela

Miha Nemevšek^{1,2}

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

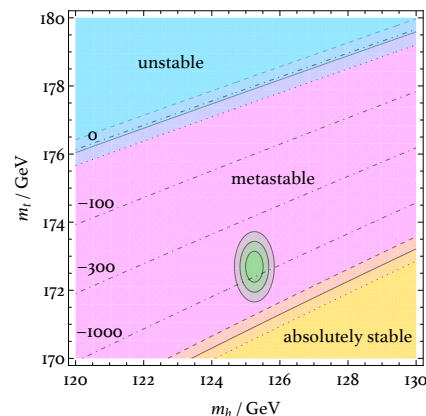
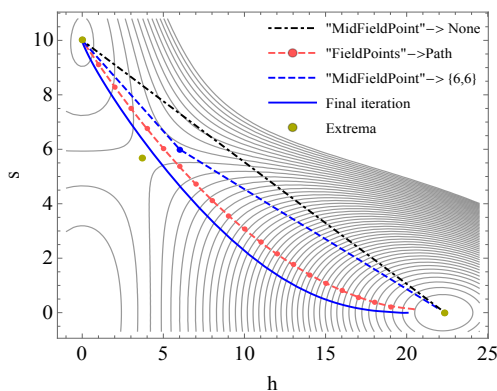
2. Odsek za teoretično fiziko F-1, IJS, Ljubljana

V naravi pogosto opazimo sisteme, ki so v metastabilnem stanju in lahko preko kvantnih ali termičnih fluktuacij preidejo v stabilnejše osnovno stanje. V kvantni teoriji polja pravimo, da sistem preide iz lažnega v pravi vakuum. Verjetnost za takšne prehode lahko napovemo z uporabo semi-klasičnega približka, ki ga lahko izboljšamo z upoštevanjem kvantnih popravkov.

Opisal bom razvoj splošne poligonarne metode [1] za poljubno število skalarnih polj v določenih dimenzijah prostor časa, ki temelji na približku potenciala z linearnimi odseki, ki omogoča perturbativne popravke. To metodo smo uspešno implementirali v FindBounce paketu [2], ki omogoča hitro in stabilno analizo poljubnih (tudi ne-analitičnih) potencialov v $D=3,4$, kot je prikazano na Sliki 1.

Pokazal bom kako smo rešili dobro znan star problem izračuna renormalizirane razpadne širine na nivoju ene zanke [3]. V limiti tanke stene smo razvili perturbativni razvoj, ki omogoča kontrolo nad poljubnimi višjimi redi in deluje tudi izven tanke stene. Na podlagi Gelfand-Yaglom teorema je presenetljivo bilo mogoče najti zaključeno analitično rešitev za celotno razpadno širino, vključno s fluktuacijami.

Trenutne meritve parametrov Standardnega modela kažejo, da je naše vesolje v metastabilnem stanju, kot kaže Slika 2. Nedavno smo v [4] popravili izračun razpadne širine s pravilnim štejetem prispevkov transverzalnih načinov umeritvenih bozonov. S tem smo napravili najnovejšo state-of-the-art napoved življenjskega časa vesolja v okviru SM ter postavili teoretični okvir za poljubne umeritvene teorije tudi preko SM.



Slika 1: Uporaba FindBounce paketa [2].

Slika 2: Fazni diagram stabilnosti SM [4].

[1] V. Guada, A. Maiezza, M. Nemevšek, Phys. Rev. D **99** (2019) 5, 056020

[2] V. Guada, M. Nemevšek, M. Pintar, Comput. Phys. Commun. **256** (2020) 107480

[3] A. Ivanov, M. Matteini, M. Nemevšek, L. Ubaldi, JHEP 03 (2022) 209

[4] P. Baratella, M. Nemevšek, Y. Shoji, K. Trailović, L. Ubaldi, arXiv: 2406.05180, submitted to PRL

Sestava ultra visokoenergijskih kozmičnih žarkov

Blaž Bortolato^{1,2}, Jernej F. Kamenik^{1,2} in Michele Tammaro³

1. *Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana*
2. *Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana*
3. *INFN Sezione di Firenze, Sesto Fiorentino, Italija*

Ultra visokoenergijski kozmični žarki so med najbolj skrivnostnimi delci v vesolju, saj njihov izvor kot sestava ostajata v veliki meri odprti vprašanji. Razumevanje njihove sestave je ključno za pojasnitev izvora in mehanizmov pospeševanja teh delcev ter za vpogled v interakcije delcev pri ekstremnih energijah. V tem prispevku predstavljamo nove rezultate o sestavi ultra visoko energijskih kozmičnih žarkov, ki temeljijo na statističnih metodah, ki smo jih razvili in uporabili na podatkih iz Observatorija Pierre Auger [1,2,3].

- [1] B. Bortolato, J. F. Kamenik in M. Tammaro, arXiv 2409.06841 [astro-ph.HE] (2024)
[2] B. Bortolato, J. F. Kamenik in M. Tammaro, Physical Review D **109**, 043023. (2024)
[3] B. Bortolato, J. F. Kamenik in M. Tammaro, Physical Review D **108**, 022004 (2022)

Getting the most out of space-borne gamma-ray astronomy with simulation-based inference

Christopher Eckner¹, Noemi Anau Montel², Florian List³, Francesca Calore⁴ in
Christoph Weniger²

1. Center for Astrophysics and Cosmology, University of Nova Gorica, Vipavska 11c, 5270 Ajdovščina, Slovenia

2. GRAPPA (Gravitation Astroparticle Physics Amsterdam),
University of Amsterdam, Science Park 904, 1098 XH Amsterdam, The Netherlands

3. Department of Astrophysics, University of Vienna, Türkenschanzstraße 17, 1180 Vienna, Austria

4. LAPTh, CNRS, F-74000 Annecy, France

Over the past 15 years, the *Fermi* Large Area Telescope (LAT) has significantly advanced our understanding of the GeV gamma-ray sky. However, the future of space-based gamma-ray astronomy, with deep sensitivity and a broad field of view, remains uncertain as no successor mission to LAT has been funded. Despite LAT's contributions, several important scientific questions remain not entirely answered, such as the composition of the isotropic diffuse gamma-ray background, the properties of the Galactic pulsar population, and the nature of the enigmatic GeV gamma-ray excess towards the Galactic centre, which could potentially be a signature thermal dark matter. Addressing these open questions requires sophisticated astrophysical models of gamma-ray emission, which pose significant computational challenges for traditional statistical methods. In this talk, I will discuss how simulation-based inference (SBI) offers a promising approach to overcoming these scalability challenges, focusing on one of its main implementations: neural ratio estimation. Additionally, SBI holds great potential for enhancing the analysis of data from next-generation ground-based gamma-ray instruments, such as the Cherenkov Telescope Array Observatory. As an example of SBI's application to the gamma-ray sky, I will present preliminary results from an ongoing study that explores the population of point-like gamma-ray sources at high latitudes in *Fermi*-LAT data.

Metastabilna stanja vzbujenih Mottovih izolatorjev

Denis Golež^{1,2}

1. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Mottov izolator bi glede na enodelčni opis valenčnih elektronov moral prevajati kot kovina, vendar je zaradi močnih elektronskih interakcij izolator. Kemijsko dopirani Mottovi izolatorji fascinirajo zaradi pojavov, kot so visokotemperaturna superprevodnost in prehodi med kovino in izolatorjem. Napredek laserske tehnologije omogoča natančno vzbuditev elektronov in vrzeli, ter odpira možnost priprave netermičnih analogov dopiranih Mottovih izolatorjev [1].

Zaradi kompleksnosti odziva koreliranih izolatorjev je težko napovedati ali bo laserska vzbuditev sistem zgolj segrela ali vodila do metastabilnih stanj. Predstavil bom dve strategiji za stabilizacijo slednjih. Prva temelji na ideji podhlajene vode (glej sliko 1), kjer kristal pripravimo blizu faznega prehoda prve reda in z zunanjim pulzom poskusimo stabilizirati vzbujen lokalni minimum [2]. Druga strategija uporablja skoraj točno ohranjeno število vzbujenih kvazidelcev v Mottovih izolatorjih, kar doda omejitve na dinamiko sistema in preprečuje termalizacijo.

Kot primer bom prikazal stabilizacijo kovinske faze v Mottovem izolatorju Ca_2RuO_4 [3]. Izolator pripravimo blizu prehoda prvega reda z močno sklopljenimi mrežnimi in elektronskimi prostostnimi stopnjami. Po vzbuditbi bi znotraj časovno odvisne Landau teorije sistem ostal izolator, a mikroskopski opis pokaže nekonvencionalni prehod v metastabilno kovinsko stanje zaradi ohranjenih količin (glej sliko 1). Ultrahitri optični in difrakcijski eksperimenti pokažejo, da je končno stanje res metastabilna kovina, ki ne obstaja v ravnovesnem faznem diagramu.



Slika 1: Tako kot se podhlajena voda hitro spremeni iz tekočega v trdno stanje [4] (levo), lahko spremljamo mikroskopske trajektorije prehoda iz izolatorja (I) v kovino (K) (desno).

[1] Y. Murakami, DG et al., arXiv:2310.05201 (2023).

[2] DG, et al., Physical review letters 118 (24), 246402 (2017).

[3] A. Verma, DG, Nature Physics 20, 807-814 (2024).

[4] Regina Fuchs-Godec, Matjaž Kristl: "Navodila za vaje: Stukturna in koloidna kemija".

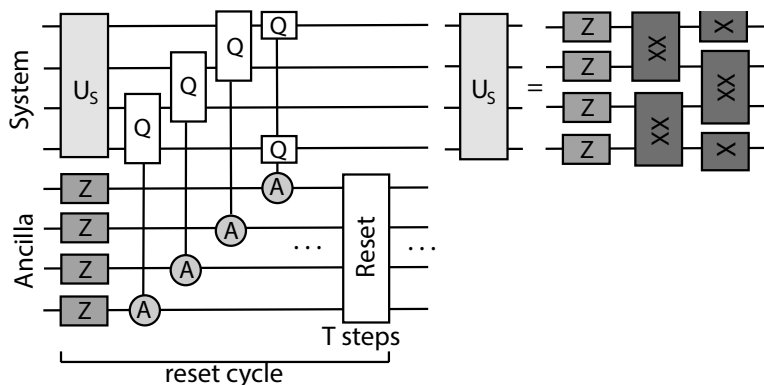
Sledi integrabilnosti v odprtih kvantnih sistemih in kvantnih računalnikih

Iris Ulčakar^{1,2} in Zala Lenarčič¹

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

Razpoložljivi kvantni računalniki so še precej zašumljeni in zato še ne najbolj primerni za simulacijo unitarnih časovnih propagacij. Njihov nenadzorovani šum in disipacija jih postavlja bližje simulatorjem odprtih kvantnih sistemov – z dodatnim problemom, da žal nimamo popolne kontrole nad tem, kaj točno simuliramo. Zato jih je smiselno uporabiti za simulacijo problemov, katerih fizika je stabilna tudi ob prisotnosti šuma.

Pokazala bom, da so sledi integrabilnosti eden izmed takih pojavov. Splošno razširjeno mnenje je, da so integrabilni modeli izjemno susceptibilni in da poljubna perturbacija uniči njihove posebne lastnosti. Z našimi deli želimo izpostaviti, da to ni res za dinamične, neunitarne perturbacije, ob katerih integrabilni vplivi ostanejo prisotni do poljubno dolgih časov. Načelna potrditev te trditve s kvantnimi računalniki bi podprla potencialno bolj aplikativno uporabo skoraj integrabilnih kvantnih materialov za učinkovito črpanje energijskih in spinskih tokov.



Slika 1: Vezje za realizacijo dissipativnih elementov s kvantnim računalnikom

[1] I. Ulčakar, Z. Lenarčič, *Generalized Gibbs ensembles in weakly interacting dissipative systems and digital quantum computers*, arXiv:2406.17033 (2024)

[2] I. Ulčakar, Z. Lenarčič, *Iterative Construction of Conserved Quantities in Dissipative Nearly Integrable Systems*, Physical Review Letters **123**, 230402 (2024)

[2] F. Lange, Z. Lenarčič, A. Rosch, *Pumping approximately integrable systems*, Nature Communication **8**, 15767 (2017)

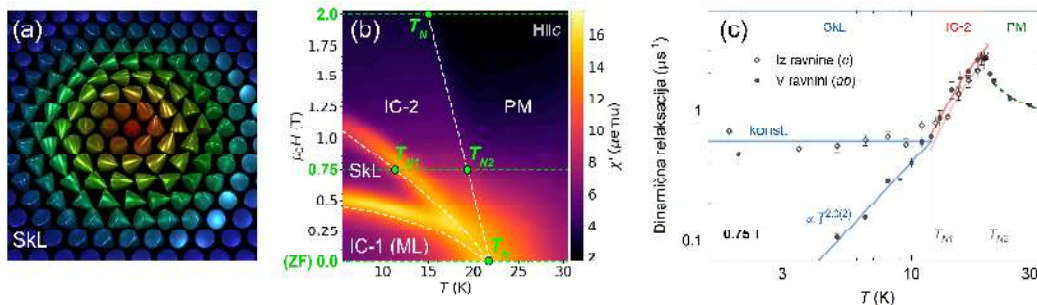
Anizotropna spinska dinamika topoloških skirmionov in meronov v Gd_2PdSi_3

M. Gomilšek^{1,2}, T. J. Hicken^{4,3}, M. N. Wilson^{5,3}, K. J. A. Franke^{6,3}, B. M. Huddart^{7,3},
A. Štefančič⁸, S. J. R. Holt⁸, G. Balakrishnan⁸, D. A. Mayoh⁸, M. T. Birch^{9,10,3},
S. H. Moody^{4,3}, H. Luetkens⁴, Z. Guguchia⁴, M. T. F. Telling¹¹, P. J. Baker¹¹,
S. J. Clark³ in T. Lancaster³

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
3. Durham University, Združeno kraljestvo
4. Paul Scherrer Institute, Švica
5. Memorial University, Kanada
6. University of Leeds, Združeno kraljestvo
7. University of Oxford, Združeno kraljestvo
8. University of Warwick, Združeno kraljestvo
9. Max Planck Institute for Intelligent Systems, Nemčija
10. RIKEN Center for Emergent Matter Science, Japonska
11. ISIS Facility, STFC Rutherford Appleton Laboratory, Združeno kraljestvo

Skirmioni in meroni so vrtincem podobne topološke spinske teksture [Slika 1(a)], ki se običajno pojavijo v materialih z zlomom simetrije pod inverzijo prostora, kar jih naredi termodinamsko stabilne [1]. Obnašajo se kot robustni topološki kvazidelci, ki so zanimivi tako s fundamentalnega stališča kot za širok spekter uporab, od spintronike (magnetnega analoga elektronike) do računanja z rezervoarji (predloga umetne inteligence preko omejitev nevronske mreže). Pred kratkim pa so bili nepričakovano odkriti tudi v centrosimetričnih materialih, primarno v Gd_2PdSi_3 [2], kar je vodilo do eksplozije raziskav. Tako stabilizacijski mehanizem kot narava osnovnega stanja teh materialov sta nejasna, z nasprotnimi si teoretičnimi predlogi.

Da bi razrešili ta vprašanja, smo raziskali dinamične lastnosti Gd_2PdSi_3 s pomočjo mionske spektroskopije [3]. Ugotovili smo, da je spinska dinamika v skirmionski fazi (SkL) proti pričakovanjem izrazito anizotropna [Slika 1(c)], kar ovrže mnoge teoretične napovedi. Prav tako smo razrešili naravo osnovnega stanja tega močno raziskovanega materiala in odkrili, da ga sestavlja mreža eksotičnih parov meron–antimeron [dveh »polovic skirmiona«; ML; Slika 1(b)]. Naši rezultati potrjujejo hipotezo Ref. [2] o osnovnem stanju tega materiala ter močno omejujejo nabor možnih stabilizacijskih mehanizmov topoloških spinskih stanj v centrosimetričnih materialih.



Slika 1: (a) Prikaz skirmiona. (b) Magnetnih fazni diagram Gd_2PdSi_3 . (c) Spinska dinamika anizotropne skirmionske (SkL), izotropne inkomenzurabilne IC-2 in paramagnetne (PM) faze. Povzeto po Ref. [3].

[1] J. Khatua *et al.*, *Physics Reports* **1041**, 1 (2023)

[2] T. Kurumaji *et al.*, *Science* **365**, 914 (2019)

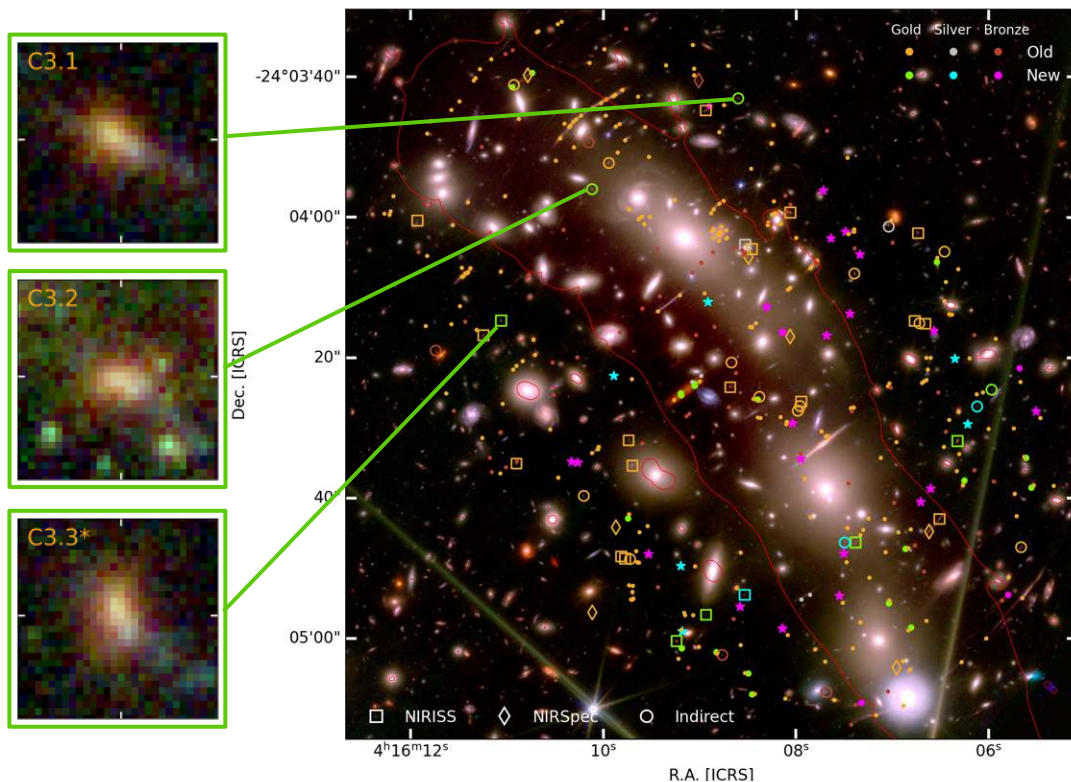
[3] M. Gomilšek *et al.*, arXiv:2312.17323, poslano v objavo

Gravitacijsko lečenje v jatah galaksij skozi oči Vesoljskega teleskopa Jamesa Webba

Gregor Rihtaršič¹, Maruša Bradač¹ in CANUCS kolaboracija

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Močno gravitacijsko lečenje v jatah galaksij omogoča raziskovanje porazdelitve temne snovi v jatah galaksij, njenih lastnosti ter oddaljenih galaksij v zgodnjem vesolju. Takšne raziskave slonijo na zanesljivih modelih porazdelitve mase, ki jih rekonstruiramo s pomočjo pozicij in spektroskopskih rdečih premikov večkratno lečenih galaksij, ki se nahajajo za jato. Vesoljski teleskop Jamesa Webba (JWST) z zmožnostjo visoko resolucijskega fotografiranja in spektroskopije v infrardeči svetlobi postaja nenadomestljivo orodje za odkrivanje in potrjevanje takšnih večkratnih slik. Njegovo učinkovitost smo demonstrirali z jato MACS J0416.1-2403, ki ima po opazovanjih z JWST v okviru programa CANUCS [1] kar 303 znane večkratne slike s spektroskopskim rdečim premikom (Slika 1), kar je največji takšen katalog v katerikoli jati galaksij doslej [2]. Večji nabor podatkov prinaša nove možnosti in izzive pri rekonstrukciji porazdelitve mase. Pri modeliranju jate MACS J1149+2223 so novi podatki denimo pokazali potrebo po vključitvi masne komponente jatnega plina, vidnega v rentgenski svetlobi.



Slika 1: Desno: Fotografija jate MACS J0416.1-2403, posneta s kamero NIRCcam na JWST z označenimi večkratno lečenimi galaksijami [2]. Barve označujejo že znane sisteme in novo odkrite kandidate skupaj z oceno njihove zanesljivosti. Kvadrati, diamanti in krogi predstavljajo sisteme z novim spektroskopskim rdečim premikom, pridobljenim z JWST. Rdeča kritična krivulja sledi območju največje povečave galaksij na rdečem premiku 9 in je rezultat rekonstrukcije porazdelitve mase v jati. Levo: Primer novo odkrite trojice večkratnih slik, ki pripadajo galaksiji na rdečem premiku 3.

[1] Willott et al. 2024, ApJ, 966, 74., [2] Rihtaršič et al. 2024, A&A, oddano, arXiv:2406.10332

Generacija kvantne svetlobe v mehki in biološki snovi

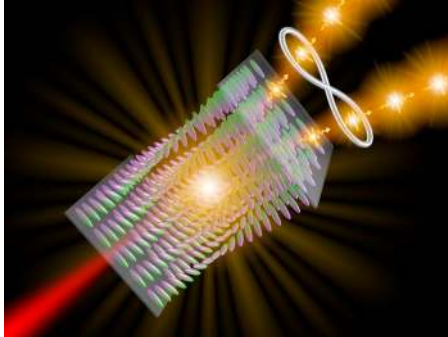
Matjaž Humar^{1,2,3}

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

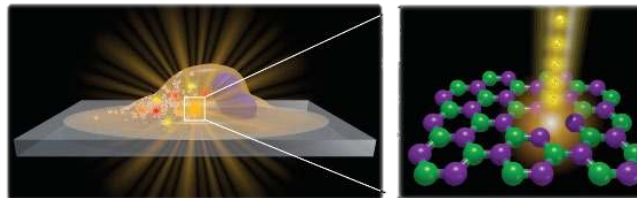
Izvori kvantne svetlobe, kot na primer izvori prepletenih in posameznih fotonov, so ključni v številnih kvantnih tehnologijah, kot so kvantno računalništvo, kvantne komunikacije in kvantna metrologija. Ti izvori pa so večinoma narejeni iz anorganskih materialov.

Pred kratkim smo prvič pokazali, da je mogoče prepletene fotone generirati v organski snovi [1]. Specifično smo to pokazali v tekočih kristalih (Slika 1), ki med drugim omogočajo, da na enostavni način spreminjamo lastnosti prepletenega stanja parov fotonov. Podobno kot pri tekočokristalnih zaslonih spreminjamo svetlost in posledično barvo posameznih slikovnih elementov, lahko sedaj spreminjamo tudi kvantne lastnosti svetlobe.

Drugi primer so izvori posameznih fotonov v kristalnih defektih, ki smo jih vstavili v žive celice (Slika 2). Ker ima vsak izvor različen spekter svetlobe smo jih uporabili za označevanje in sledenje celic [2].



Slika 1: Generacija prepletenih fotonov v tekočem kristalu.



Slika 2: Emisija posameznih fotonov iz celice.

[1] V. Sultanov, A. Kavčič, M. Kokkinakis, N. Sebastián, M. V. Chekhova, M. Humar, Tuneable entangled photon pair generation in a liquid crystal, *Nature* 631, 294–299 (2024).

[2] A. Kavčič, R. Podlipec, A. Krišelj, A. Jelen, D. Vella, M. Humar, Intracellular biocompatible hexagonal boron nitride quantum emitters as single-photon sources and barcodes, *Nanoscale* 16, 4691–4702 (2024).

Laserji iz smektičnih in milnih mehurčkov

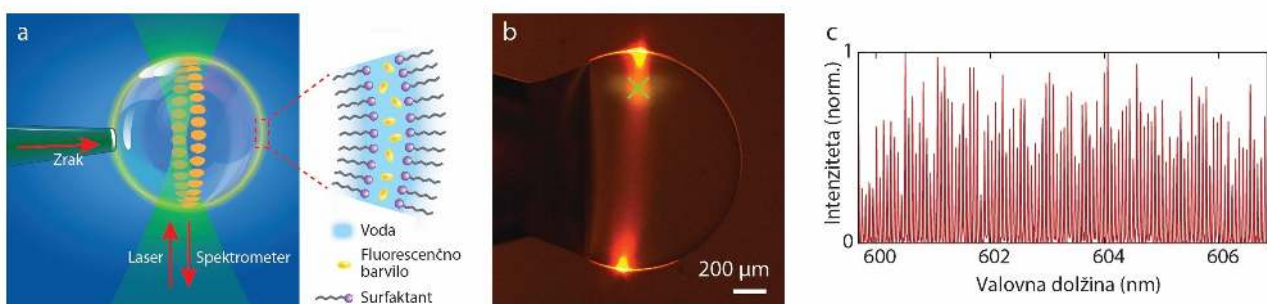
Zala Korenjak^{1,2} in Matjaž Humar^{1,2,3}

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

²Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

³CENN Nanocenter, Ljubljana

Milni mehurčki so na prvi pogled preprosti objekti, vendar imajo mnogo zanimivih lastnosti, ki pritegnejo pozornost tako širše kot tudi strokovne javnosti. V milnih filmih in mehurčkih so preučevali že različne optične pojave, vendar do zdaj še nikoli niso bili uporabljeni kot optični resonatorji. V naši raziskavi smo kot prvi pokazali, da lahko milni in smektični mehurčki delujejo kot laserji [1]. Da so mehurčki oddajali lasersko svetlobo, smo jim dodali fluorescenčno barvilo in jih vzbujali z zunanjim laserjem (slika 1a). Svetloba, ki nastane, je ujeta v steni mehurčka in kroži blizu površine, zato mehurček deluje kot laserski resonator, t. i. WGM mikroresonator. Poleg milnice, smo za izdelavo mehurčkov uporabili tudi smektične tekoče kristale, katerih molekule tvorijo dobro določene plasti. Takšni smektični mehurčki (slika 1b) so imeli popolnoma enakomerno debelino stene in najpomembneje, bili so izredno stabilni. Spekter laserske svetlobe, ki so jo oddajali mehurčki, je bil sestavljen iz več sto enakomerno razmaknjenih ostrih vrhov (slika 1c). Na podlagi spektra oddane laserske svetlobe in njegovega spreminjanja v času smo lahko izmerili tudi le deset nanometrov velike spremembe velikosti milimetrskega mehurčka. Ta izjemna natančnost nam je omogočila uporabo smektičnih mehurčkov kot enih najbolj občutljivih senzorjev električnega polja in tlaka, razvitih doslej. Laserje iz smektičnih in milnih mehurčkov bi v prihodnosti lahko uporabili tudi za preučevanje tankih filmov in optomehaniko resonančnih votlin.



Slika 1: Laserji iz smektičnih in milnih mehurčkov. (a) Shematski prikaz eksperimentalne postavitve milnega mehurčka in njegove sestave. (b) Smektični mehurček, ki oddaja lasersko svetlobo. (c) Enakomerno razmaknjeni vrhovi v emisijskem spektru smektičnega mehurčka.

[1] Z. Korenjak in M. Humar, *Phys. Rev. X* **14**, 011002 (2024).

Pametni materiali iz magnetnih mikrodelcev: magneto-aktivni elastomeri

Gašper Kokot^{1,2}, Izidor Straus², Jan Kopačin², Gaia Kravanja³, Luka Hribar³, Matija Jezeršek³, Raphael Kriegl⁴, Mikhail Shamonin⁴ in Irena Drevenšek-Olenik^{1,2}

1. Odsek za kompleksno snov, IJS, Ljubljana

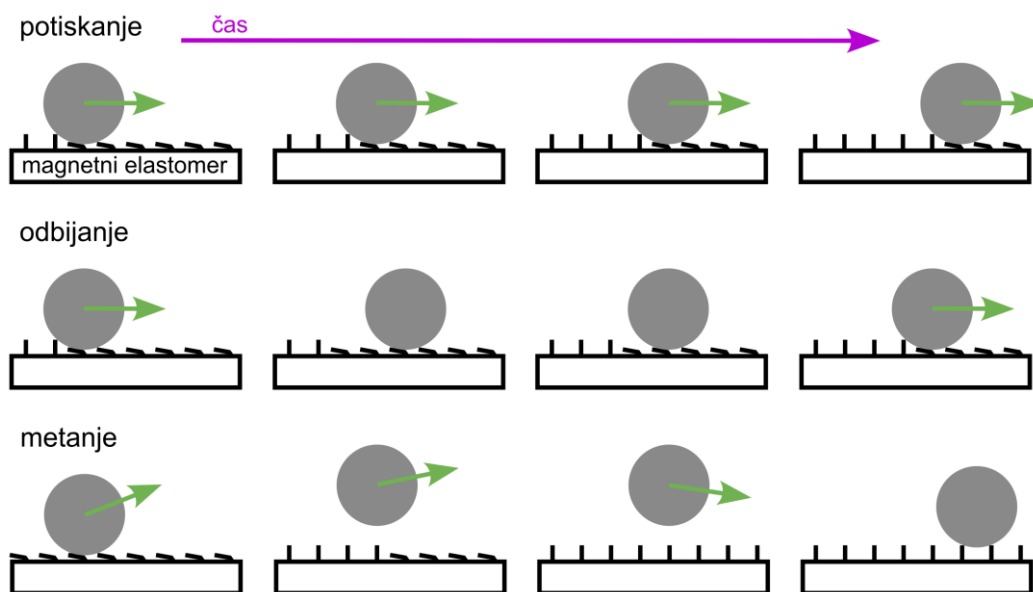
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

3. Fakulteta za strojništvo, UL, Ljubljana

4. East Bavarian Centre for Intelligent Materials (EBACIM), OTH Regensburg, Nemčija

Pametni materiali se odzivajo na zunanje dražljaje in spremenijo svoje lastnosti na željen način. To se lahko zgodi pasivno, kot posledica sprememb v okolju, ali aktivno, kot odziv na npr. vklop ali izklop magnetnega polja. Magnetno polje je odlična izbira, kadar želimo sprožiti ta odziv na daljavo in brezkontaktno, ter za medicinske aplikacije, saj minimalno interagira s tkivi. Skupine magnetnih mikrodelcev v kapljevinah so že pokazale potencial za mikrorobotiko in opravljanje nalog na mikroskali. Ko je mikrodelcev veliko, vplivajo drug na drugega, kar vodi do nepredvidljive samo-organizacije, ki jo lahko izkoriščamo za naloge, kot je recimo mešanje [1] ali transport objektov [2].

Pri magnetnih mikrodelcih zaprtih v elastomer, ne opazimo več samoorganizacijskih efektov, vendar vseeno lahko z magnetnim poljem spreminjamo mehanske lastnosti elastomera, kot je npr. elastični modul. Vplivamo lahko tudi na površinske lastnosti in modificiramo hrapavost, adhezijo ali omakanje. Če površino še dodatno mikrostrukturiramo, vpeljemo nove funkcionalnosti. To bomo pokazali na primeru odbojnosti za svetlobo [3] in transportu makroskopskih objektov [4].



Skica različnih načinov transporta kroglice z označeno smerjo gibanja pri različnih trenutkih.

[1] G. Kokot, S. Das, R. G. Winkler, G. Gompper, I. S. Aranson in A. Snezhko, Proceedings of the National Academy of Sciences **114**(49), 12870-12875 (2017)

[2] G. Kokot in A. Snezhko, Nature communications, **9**(1), 2344 (2018)

[3] I. Straus in drugi, Soft Matter, **19**(18), 3357-3365 (2023)

[4] G. Kravanja in drugi, Advanced Engineering Materials, **25**(22), 2301000 (2023)

Večcelična dinamika v omrežjih celic beta: spoznanja iz večceličnega slikanja, fenomenoloških modelov in mrežnih analiz

Marko Gosak^{1,2,3}

1. *Oddelek za fiziko, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, UM, Maribor*

2. *Inštitut za fiziologijo, Medicinska fakulteta, UM, Maribor*

3. *Univerza Alma Mater Europaea, Maribor*

Langerhansovi otočki so večcelična omrežja, v katerih več sto celic beta deluje usklajeno, da proizvede sekretorne pulze inzulina, hormona, ki je ključen za nadzor presnovne homeostaze. Njihovo kolektivno ritmično aktivnost krojijo funkcionalna heterogenost, medcelične interakcije in multimodalna narava oscilacij, ki izvira iz povratnih interakcij različnih oscilatornih podsistemov [1]. Posledično večcelična dinamika populacij beta celic izkazuje netrivialne ritmične vzorce, kar predstavlja velik izziv za njeno preučevanje. V tem prispevku bom predstavil, kako kompleksno naravo celične aktivnosti v otočkih raziskujemo s kombinacijo visokoločljivostne konfokalne mikroskopije na akutnih rezinah pankreasnega tkiva ter modeliranja in pristopov s področja znanosti o omrežjih [2]. Konstrukcija funkcionalnih omrežij iz kalcijeve aktivnosti celic beta razkriva, da je njihova struktura odvisna od stimulacije [3], modulirana s farmakološkimi sredstvi, kot so antidiabetiki [4,5], ter močno odvisna od dinamične komponente, ki se analizira. Funkcionalna omrežja, zgrajena na podlagi hitre komponente, ki odraža električno aktivnost, imajo v povprečju krajše povezave in so bolj modularna kot omrežja celic beta, ki so zgrajena iz počasne metabolne komponente oscilatorne aktivnosti [6]. Poleg tega smo z uporabo fenomenoloških modelov uspeli ne zgolj identificirati fiziološke determinante, ki jih je treba upoštevati v modelu za doseg dobrega ujemanja med modelom in eksperimentalnimi rezultati, temveč smo pridobili tudi globlje mehanistično razumevanje znotrajceličnih in medceličnih procesov, ki krojijo večcelično aktivnost in strukturo omrežij znotraj otočkov. Natančneje, kot glavne dejavnike, ki vplivajo na dobro skladnost med napovedmi modela in eksperimentalnimi podatki, smo prepoznali heterogenost v celičnem metabolizmu in električni aktivnosti ter prisotnost večplastnih medceličnih interakcij, ki poleg električne sklopitve vključujejo tudi metabolno [7]. Na koncu velja omeniti, da je predstavljena metodologija lahko širše uporabna za preučevanje kolektivne večcelične dinamike tudi v drugih vrstah tkiv.

[1] R.K.P. Benninger, V. Kravets, *Nature Reviews Endocrinology* 18, 9 (2022).

[2] A. Stožer, M. Šterk, E.P. Leitgeb, R. Markovič, M.S. Klemen, C.E. Ellis, L.K. Bombek, J. Dolenšek, P.E. MacDonald, M. Gosak, *Frontiers in Endocrinology* 13, 922640 (2022).

[3] M. Šterk, J. Dolenšek, M.S. Klemen, L.K. Bombek, E.P. Leitgeb, J. Kerčmar, M.S. Rupnik, M. Perc, A. Stožer, M. Gosak, *Biophysical Journal* 122, 784 (2023).

[4] M. Šterk, L.K. Bombek, M.S. Klemen, M.S. Rupnik, M. Marhl, A. Stožer, M. Gosak, *PLoS Computational Biology* 17, e1009002 (2021).

[5] E.P. Leitgeb, J. Kerčmar, L.K. Bombek, V. Pohorec, M.S. Klemen, M. Rupnik, M. Gosak, J. Dolenšek, A. Stožer, *Frontiers in Endocrinology* 14, 1315520 (2024).

[6] M. Šterk, Y. Zhang, V. Pohorec, E.P. Leitgeb, J. Dolenšek, R.K.P. Benninger, A. Stožer, V. Kravets, M. Gosak, *PLoS Computational Biology* 5, e1012130 (2024).

[7] M. Šterk, U. Barać, A. Stožer, M. Gosak, *Physical Review E* 108, 054409 (2023).

Elektronski fazni prehodi kot temelj za izdelavo programabilnih modulatorjev svetlobe

Igor Vaskivskiy^{1,2}, Anze Mraz^{1,2}, Rok Venturini¹, Gregor Jecl^{1,3}, Yevhenii Vaskivskiy¹, Dragan Mihailovic^{1,2}

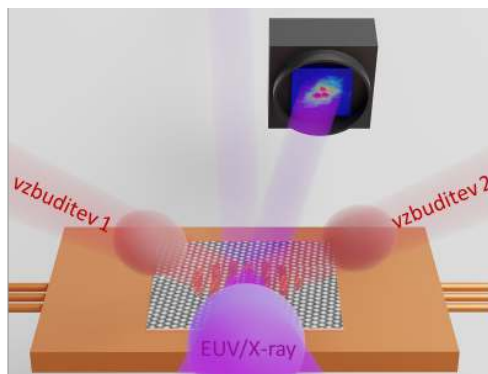
1. Odsek za kompleksne snovi, IJS, Ljubljana

2. CENN Nanocenter, Ljubljana

3. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Navajeni smo, da lahko natančno nadzorujemo vidno, infrardečo ali ultravijolično svetlobo: z uporabo različnih optičnih elementov, kot so leče, zrcala, valovne ploščice, uklonske mreže ali celo nastavljivi modulatorji, lahko spreminjamo njeno jakost, spekter, polarizacijo, izdelujemo zapletene teksture itd. Takšno bogastvo možnosti pa manjka za ekstremno ultravijolično (EUV) ali mehko rentgensko svetlobo, kjer je izbira pasivnih optičnih elementov precej bolj omejena, nastavljivih modulatorjev pa sploh ni. Ta primanjkljaj močno ovira uporabo tega zelo priročnega energetskega območja v raziskavah in tehnologiji.

Pokazal bom, kako je mogoče izdelati prostorski svetlobni modulator za EUV ali mehko rentgensko svetlobo ki deluje na odbojnost in je zasnovan na uporabi netermičnih faznih prehodov v elektronskem kristalu [1]. V pričujočem poskusu smo uporabili dva prekrížana laserska žarka za vtiskovanje dolgožive periodične reliefne strukture na površini vzorca (Slika 1). Taka struktura deluje kot uklonska mrežica za svetlobo s kratko valovno dolžino, njen življenjski čas je odvisen od stabilnosti skritih elektronskih stanj v kristalu. Zaradi elektronske narave pojava je lahko zapisovanje in brisanje izjemno hitro.



Slika 1: Shematski prikaz delovanja modulatorja svetlobe.

[1] I. Vaskivskiy, A. Mraz, R. Venturini, et al. Nature Photonics 18, 458–463 (2024).

Superfluorescenca iz dvojno vzbujenih stanj helija

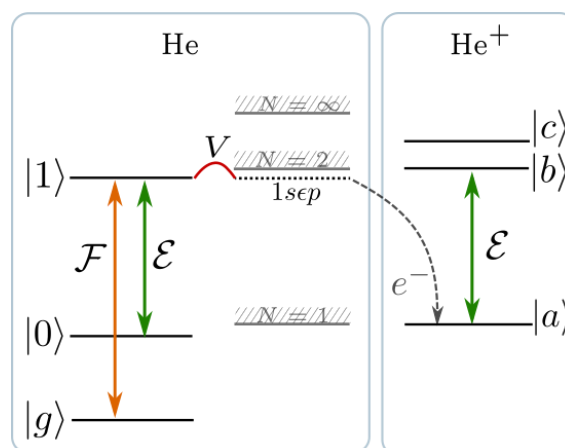
Špela Krušič^{1,2}, Andrej Mihelič^{1,2}, Klemen Bučar^{1,2}, Janez Turnšek^{1,2}
in Matjaž Žitnik^{1,2}

1. Odsek za fiziko nizkih in srednjih energij, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Superfluorescenca [1] je nelinearen kolektiven sevalni pojav, za katerega je značilno ojačanje svetlobe, ki jo spontano izseva tarča z invertirano zasedenostjo. Čeprav je ta proces v vidnem območju podrobno raziskan, lahko superfluorescenca v daljnem ultravijoličnem in rentgenskem spektralnem področju opazujemo šele od iznajdbe laserjev na proste elektrone. Kljub uspešnim meritvam značilne odvisnosti fotonskega pridelka od jakosti vzbujanja tarče [2, 3] pa smo lahko z dosedanjimi teoretičnimi modeli poustvarili le kvalitativne značilnosti tega procesa.

Da bi pridobili teoretične napovedi, ki se kvantitativno ujemajo z eksperimentalnimi rezultati, smo razvili teoretični okvir, ki opisuje štiridimenzionalni prostorsko-časovni razvoj superfluorescence v večivojskem sistemu podvrženem nekoherentnim procesom. Opis širjenja električnih polj v treh dimenzijah temelji na paraksialnem približku, spontano emisijo pa simuliramo s pomočjo stohastičnih členov.

Razviti model smo uporabili za napoved lastnosti superfluorescence v daljnem ultravijoličnem področju, ki jo izsevajo resonantno vzbujeni helijevi atomi [4]. Helijev plin z veliko gostoto s sunki laserja na proste elektrone vzbudimo v dvojno vzbujeno stanje $3a\ ^1P^o$, ki pretežno razpada preko avtoionizacije, z veliko manjšo verjetnostjo pa tudi sevalno, pri čemer se izsevajo fotoni z energijo 40,74 eV. Model napove močno ojačanje izsevane svetlobe, svetlobne sunke pa odlikujejo velika intenziteta, kratko trajanje in visoka stopnja prostorske in časovne koherence. Lastnosti izseva v opisanem sistemu smo pred kratkim tudi opazovali v okviru eksperimentalne kampanje na laserju na proste elektrone FERMI.



Slika 1: Shematski prikaz procesov v heliju po vzbuditvi v izbrano dvojno vzbujeno stanje (1), ki razpada sevalno v enojno vzbujeno stanje (0) ali preko avtoionizacije v He^+ 1s (a).

- [1] M. Gross in S. Haroche, *Physics Reports* **93**, 301 (1982)
[2] N. Rohringer *et. al.*, *Nature* **481**, 488 (2012)
[3] H. Yoneda *et. al.*, *Nature* **524**, 446 (2015)
[4] Š. Krušič *et. al.*, *Phys. Rev. A* **107**, 013113 (2023)

Augerjev razpad med ultrahitro molekulsko disociacijo

Mateja Hrast^{1,2}, in Matjaž Žitnik^{1,3}

1. *Odsek za fiziko nizkih in srednjih energij, IJS, Ljubljana, Slovenija*
2. *Institute of Science and Technology Austria, Klosterneuburg, Avstrija*
3. *Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana, Slovenija*

Kadar elektronski razpad in disociacija v molekuli potekata na podobni časovni skali, je geometrija molekule v trenutku vzbuditve lahko bistveno drugačna kot v trenutku razpada. Posledično je spekter izsevanih elektronov izrazito asimetričen in odvisen tako od oblike molekulskih potencialnih ploskev kot tudi od spreminjanja elektronske strukture med disociacijo. Klasičen opis molekulske dinamike tu ne zadošča več, temveč je za izračun spektra potrebno opisati interferenco med vsemi možnimi potmi od vzbuditve do razpada na trajektoriji disociacije.

Razvili smo ab-initio teoretično metodo s kvantno-mehanskim opisom molekulske dinamike, ki temelji na propagaciji Franck-Condonovih faktorjev s stacionarno Greenovo funkcijo in sledi razvoju molekulskih orbital preko celotne trajektorije disociacije [1]. V predavanju predstavimo metodo na primeru L-VV resonantnega Augerjevega spektra stanja $2p^{-1}\sigma^*$ v molekuli HCl [2]. Poleg tega, da se izračunan spekter lepo prilega eksperimentalnim rezultatom, metoda tudi naslovi vprašanje »Ali lahko iz energije izsevanega Augerjevega elektrona določimo molekulsko geometrijo v trenutku, ko je bil elektron izsevan?«

[1] M. Hrast, *Effect of ultrafast molecular dissociation on the Auger decay of the 2p vacancy on chlorine*, Doktorska disertacija (2024).

[2] M. Hrast in M. Žitnik, *Ab-initio Auger spectrum of the ultrafast dissociating $2p_{3/2}^{-1}\sigma^*$ resonance in HCl*, poslano v Phys. Chem. Chem. Phys. (2024).

Dinamika Taylorjevega mehurja v protitočnem turbulentnem toku

Jan Kren^{1,2}, Iztok Tiselj^{1,2} in Blaž Mikuž¹

1. Odsek za reaktorsko tehniko, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Tok Taylorjevih mehurjev oziroma čepasti tok sestavljajo veliki plinski mehurji, ločeni drug od drugega s čepi kapljevine. Takšen tok se pojavlja v številnih industrijskih procesih in napravah. Prispevek se osredotoča na obnašanje Taylorjevega mehurja v protitoku kapljevine, pri čemer smo uporabili numerične simulacije visoke ločljivosti in najsodobnejše eksperimentalne metode za podrobno analizo hitrostnih polj, dinamike medfazne površine in razpada mehurja.

Z uporabo hitrotekoče kamere smo dinamiko Taylorjevih mehurjev v mešanici zraka-voda raziskali v dveh različnih režimih – prehodnem laminarno-turbulentnem režimu toka z Reynoldsovim številom $Re = 1400$ in turbulentnem toku z $Re = 5600$. Študija se je osredotočila na mehurje dolžine od 2 do 10 hidravličnih premerov cevi pri katerih je vzgon uravnotežen z vztrajnostnim uporom v padajočem turbulentnem toku. Z lastnim algoritmom za prepoznavo medfazne površine na posnetih slikah smo identificirali asimetrične oblike mehurjev, podobne obliki hitrih vlakov. To je pomembna ugotovitev, ki je pokazala tudi prisotnost majhnih vzbujenih valov vzdolž površine mehurjev, ki smo jim z omenjenim algoritmom sledili z visoko občutljivostjo. Ti valovi so pokazali korelirana gibanja po površini mehurja, kar je dodalo novo razumevanje o obnašanju tovrstnih tokov.

Pri uporabi orodja za računske dinamiko tekočin OpenFOAM smo implementirali Runge-Kutta shemo časovne integracije visokega reda v kombinaciji z metodo VOF in geometrično rekonstrukcijo medfazne površine. Študija se je osredotočila na režim prehodnega toka s kapljevinstim $Re=1400$ v katerem smo primerjali algebraične in geometrične tehnike rekonstrukcije medfazne površine. Rezultati so pokazali prednost geometrične rekonstrukcije pri simulacijah razpada Taylorjevega mehurja. Novo odkritje je tudi pojav sekundarnega vrtinca za Taylorjevim mehurjem, v t.i. sledi Taylorjevega mehurja, ki je še posebej opazen pri gostejših ločljivostih mreže, potrdili pa smo ga tudi z eksperimenti.

Predstavljeno delo predstavlja prispevek na področju jedrske tehnike in dinamike tekočin s celovitejšim razumevanjem obnašanja čepastih tokov v protitočnih turbulentnih tokovih, ki se lahko pojavijo tudi v primarnem krogu tlačnovodnih jedrskih elektrarn. Kombinacija eksperimentov in numeričnih simulacij ponuja bolj celostni pogled ter utira pot izboljššanemu načrtovanju na različnih inženirskih področjih, kjer se pojavljajo tovrstni prehodni pojavi.

PLAKATI

Pojav filamentov ob kolapsu kavitacijskega mehurčka

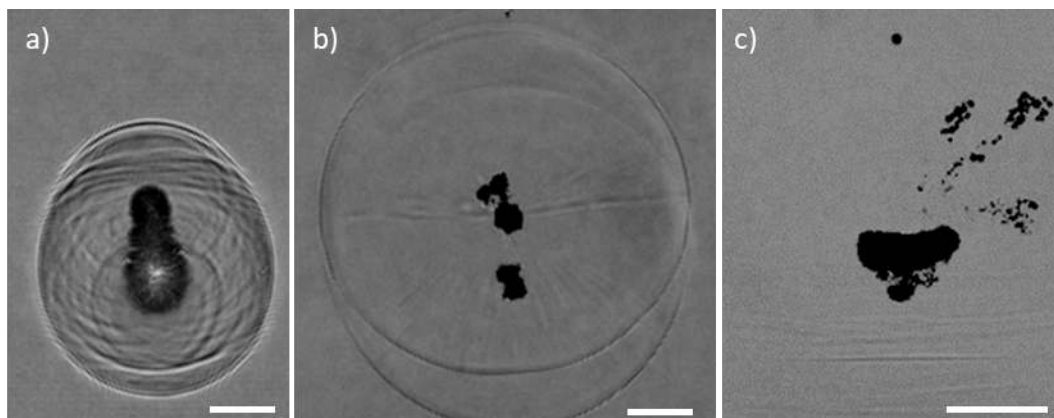
Vid Agrež^{1,2}, Rok Petkovšek¹ in Claus-Dieter Ohl²

1. Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

2. Faculty of Natural Sciences, Institute for Physics, Otto-von-Guericke-University Magdeburg

Obnašanje kavitacijskih mehurčkov v kapljevinah in ob različnih mejah je predmet obsežnih raziskav. Eden pogostih načinov njihove generacije je lasersko povzročeni preboj, pri čemer prevladuje uporaba laserjev z nanosekundnim trajanjem pulzov in energijami reda mJ. Plazma, ki nastane ob preboju s takšnimi laserji je pogosto podolgovate oblike, kar običajno vodi do nesferične oblike kavitacijskega mehurčka v začetni fazi rasti [1],[2]. Pri opazovanju njegovega kolapsa, pa je moč zaznati tanke filamente, usmerjene proti točki kolapsa [3],[4]. V določenih primerih, običajno ob preletu tlačne motnje, pa pojav spremlja tudi nastanek majhnih kratkoživih mehurčkov [5].

Prispevek predstavi povezavo med nastankom kavitacijskega mehurčka ter prisotnostjo filamentov ob njegovem kolapsu. Izvor plinastih jeder, ki se lahko razvijejo v mikrometrski mehurčke tekom kolapsa je prav tako pripisan začetni fazi razvoja kavitacijskega mehurčka. Laserski preboj v vodi je pozicioniran blizu proste meje, s čimer se doseže premik kolapsirajočega mehurčka stran od mesta preboja, kot tudi, da se udarni val odbije kot razredčina in omogoči razpenjanje majhnih plinastih jeder. Poudarek predstavljenih rezultatov je na tem, kako formacija plazme oziroma njena oblika vpliva na pojav filamentov tekom kolapsa kavitacijskega mehurčka.



Slika 1: a) Območje kavitacije 100 ns po laserskem preboju v vodi, b) primer kolapsa kavitacijskega mehurčka z vidnim horizontalnim filamentom in c) razpeti mikrometrski mehurčki v okolici kolapsa.

[1] Z. Jia, D. Li, Y. Tian, H. Pan, Q. Zhong, Z. Yao, Y. Lu, J. Guo in R. Zheng, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **206**, 106713 (2023).

[2] D. Li, Z. Jia, Y. Tian, Y. Li, Y. Lu, W. Ye, J. Guo in R. Zheng, *Opt. Express*, **29**, 44105, (2021).

[3] D. Horvat, V. Agrež, T. Požar, B. Starman, M. Halilović in R. Petkovšek, *Ultrasonics Sonochemistry*, 106160, (2022).

[4] V. Agrež, T. Požar and R. Petkovšek, *Opt. Lett., OL*, **45**, 1547–1550 (2020).

[5] O. Supponen, D. Obreschkow, P. Kobel, M. Tinguely, N. Dorsaz in M. Farhat, *Phys. Rev. Fluids*, **2**, 093601 (2017).

Elastična teorija podprtih epitelnih tkiv

Urška Andrenšek^{1,2} in Matej Krajnc^{1,2}

1. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Med življenjskim ciklom živalskih organizmov so epitelna tkiva podvržena obsežnim deformacijam – najprej pri oblikovanju organov med embriogenezo in kasneje pri ohranjanju celovitosti in funkcije organov v odrasli dobi osebk. Do katere mere so te deformacije enake deformacijam neživih elastičnih materialov in kako se razlikujejo zaradi specifičnih mikroskopskih mehanizmov celic, še ni povsem jasno.

V delu smo izpeljali teorijo elastičnosti epitelijev, podprtih z bazalno membrano in podpornim tkivom, pri kateri medcelične površinske napetosti prevladujejo nad elastičnimi prispevki celic. Tkivo opišemo v prerezu kot verigo celicam podobnih kapljic, izpostavljenih površinskim napetostim zaradi krčenja celičnega korteksa in adhezije med celicami. S kontinuumsko limito izpeljemo harmonično teorijo elastičnosti, ki opisuje, kako medcelične sile in interakcija s podpornimi strukturami vplivajo na določitev kritičnih pogojev za pojav elastične nestabilnosti bodisi upogiba bodisi gubanja.

Za razliko od običajnih elastičnih plasti, pri katerih so napetosti porazdeljene po celotni debelini sloja, naš model upošteva površinske napetosti celic, medtem ko notranjost celic obravnava kot tekočinsko. Zaradi tega specifičnega izvora elastičnosti je odvisnost ključnih fizikalnih količin od debeline sloja bistveno drugačna kot pri običajnih elastičnih dvoslojnih. Naša teorija prav tako naravno pojasnjuje obrat faze modulacije debeline od vrha do doline – znano značilnost, opaženo v epitelijih, ki je ni mogoče razložiti s teorijo elastičnosti običajnih elastičnih dvoslojnih plasti. Naše delo tako ponuja smernice za razumevanje, kako površinske napetosti celic in interakcija tkiv s podporno strukturo skupaj oblikujejo epitelije med morfogenezo. Teorija podaja nize analitičnih rezultatov, ki opredeljujejo prispevek površinske mehanike k elastičnim lastnostim in oblikam epitelnih enoslojnih plasti.

Kalorični pojav v tekočih kristalih pri neravnovesnem vklapljanju zunanjskega polja

Polona Aupič¹, Tilen Potisk², Daniel Svenšek^{1,2} in Gregor Skačej¹

1. *Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana*

2. *Kemijski inštitut, Ljubljana*

Z zunanjim poljem (električnim ali magnetnim) lahko uredimo orientacije molekul v tekočih kristalih. Če polje spreminjamo npr. pri izotermnih pogojih, se spremeni entropija sistema in posledično pride do izmenjave toplote z okolico, kar je primer kaloričnega pojava. Pri teh pojavih gre za termične spremembe materialov zaradi sprememb zunanjskega električnega, magnetnega ali mehanskega polja. Predmet zanimanja so zaradi možnosti uporabe v okolju bolj prijaznih hladilnih napravah in toplotnih črpalkah. Tradicionalno se pri raziskavah kaloričnih pojavov osredotočajo na ravnovesni izotermni ali adiabatni proces [1].

V tem delu opazujemo izotermno vklapljanje in izklapljanje zunanjskega polja v končnem času, od zelo hitrega do zelo počasnega (kvazi ravnovesnega), pri temperaturah v bližini faznega prehoda med nematsko in izotropno fazo. Uporabimo simulacije molekularne dinamike in se osredotočimo na majhen sistem, kjer so fluktuacije velike ter kjer je izmenjana toplota odvisna od začetne mikroskopske konfiguracije sistema. Pri tem računamo toploto in delo na ravni posamezne trajektorije po vzoru stohastične termodinamike [2]. Predstavljene so verjetnostne porazdelitve in povprečja dela ter toplote pri različnih hitrostih vklapljanja, izračunana pa je tudi razlika proste energije prek enakosti Jarzynskega [3].

[1] Y. Liu, J. F. Scott in B. Dkhil, *Applied Physics Reviews* **3**, 031102 (2016)

[2] U. Seifert, *Reports on Progress in Physics* **75**, 126001 (2012)

[3] C. Jarzynski, *Physical Review Letters* **78**, 2690–2693 (1997)

Dinamična robustnost omrežja multimodalnih oscilatorjev

Uroš Barač¹, Matjaž Perc^{1,2,3,4,5} in Marko Gosak^{1,2,6,*}

¹ *Oddelek za fiziko, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru, Maribor, Slovenija*

² *Univerza Alma Mater Europaea, Maribor, Slovenija*

³ *Oddelek za medicinske raziskave, Bolnišnica Kitajske medicinske univerze, Kitajska medicinska univerza, Taichung, Tajvan*

⁴ *Complexity Science Hub Vienna., Dunaj, Avstrija*

⁵ *Oddelek za fiziko, Kyung Hee University, Seul, Južna Koreja*

⁶ *Inštitut za fiziologijo, Medicinska fakulteta, Univerza v Mariboru, Maribor, Slovenija*

V realnih sistemih je makroskopska funkcionalnost sistema pogosto posledica zapletenih interakcij med mikroskopskimi komponentami. Ti sistemi, od bioloških omrežij do tehnoloških infrastruktur, so lahko občutljivi na notranje napake in zunanje motnje. Raziskovanje kritičnega prehoda v makroskopsko neaktivnost sistema ali prehod v staranje (ang. aging transition) [1] je ena od ključnih tem na področju preučevanja sklopljenih oscilatornih omrežij. Pojav raziskuje kako se globalna aktivnost sklopljenih oscilatorjev zmanjšuje z naraščanjem deleža neaktivnih elementov in je še posebej pomemben pri raziskavah bioloških sistemov, kjer kolektivna funkcija pogosto izhaja iz interakcij posameznih oscilatornih enot, katerim se lahko v patoloških razmerah postopoma okvari delovanje. Dosedanji raziskovalni prispevki so bili predvsem osredotočeni na ansamble sklopljenih oscilatorjev z limitnom ciklom [2] ali ekscitabilnih [3] oscilatorjev, vendar je v bioloških sistemih oscilatorna aktivnost pogosto bolj kompleksna. V njih se pogosto manifestira multimodalna aktivnost, za katero so značilne soodvisne oscilacije, ki se pojavljajo na različnih časovnih skalah. Takšna ritmična dejavnost običajno nastane zaradi zapletenega prepletanja različnih oscilatornih podsistemov, ki jih poganjajo različni a sovisni mehanizmi. Med procesom patogeneze v katerem posamezne celice doživijo disfunkcijo, je mogoče, da bolezen prizadene le določene podsisteme, npr. počasne, kar pa vpliva na celotno ritmično aktivnost in delovanje. Da bi te dinamične procese podrobneje preučili smo v tej študiji izdelali dvoplastni fenomenološki model, v katerem vsaka plast predstavlja svoj oscilacijski podsistem, počasnega in hitrega. Znotraj posamezne plasti oscilatorji medsebojno interagirajo, medtem ko so interakcije med plastmi zajete z modulacijo aktivnosti hitre oscilacijske plasti s strani počasnih oscilatorjev. S tem večplastnim in multimodalnim modelom smo metodično preučili vpliv deaktivacije oscilatorjev v počasni oscilacijski plasti na makroskopsko aktivnost hitre oscilacijske plasti. Natančneje, raziskali smo učinke jakosti sklopitve in deleža neaktivnih oscilatorjev na povprečno globalno amplitudo in frekvenco signala hitrega sistema. Naše numerične analize razkrivajo zanimivo obnašanje. Pokažemo, da lahko pri določenih shemah povezovanja deaktivacija počasnega podsistema povzroči izgubo sinhronizacije počasnih komponent in s tem večjo aktivnost hitre populacije [4]. Te dinamične fenomene se da povezati z empiričnimi podatki na nivoju tkiv, ko pride do bolezni.

[1] W. Zou, D. V. Senthilkumar, M. Zhan, J. Kurths, *Physics Reports* **931** (2021) 1-72.

[2] K. Daido, N. Nakanishi, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 104101.

[3] U. Barač, M. Perc, M. Gosak, *Chaos* **33** (2023) 043120.

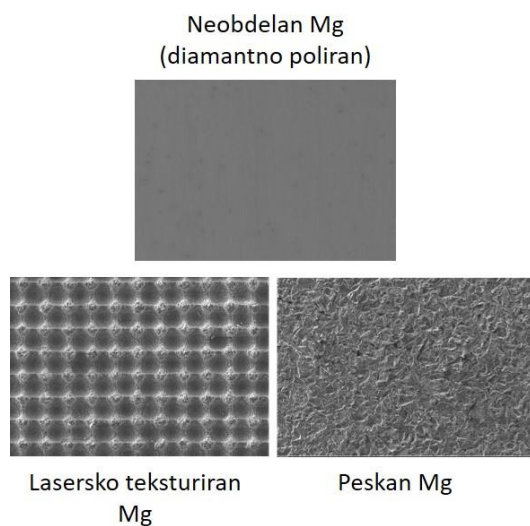
[4] U. Barač, M. Perc, M. Gosak, *Phys. Rev. Research* **6**, 033269 (2024).

Primerjava vpliva laserskega teksturiranja in peskanja na lastnosti površine magnezija

Marjetka Conradi

Institut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana

Magnezij in njegove zlitine veljajo za lahke in vzdržljive, slovijo pa predvsem zaradi biokompatibilnosti ter biorazgradljivosti kar jim daje visoko uporabno vrednost v biomedicinskih aplikacijah. V naših raziskavam smo modificirali površino magnezija s konvencionalno metodo peskanja v različnih časovnih intervalih (2 s, 5 s, 10 s in 30 s) ter napredno metodo laserskega teksturiranja (LT) z namenom izboljšanja bioaktivnosti materiala za biomedicinske aplikacije. Analizirali smo morfologijo površine po obdelavi, spremembe v trdoti površine, omočljivosti, tribološke lastnosti ter korozijsko obnašanje v Hankovi (3.5 % NaCl) raztopini. SEM in EBSD analizi sta pokazali, da tako peskanje kot tudi LT ne spremenita samo površinske morfologije ampak vplivata tudi na mikrostrukturo v smislu zmanjšanja kristalnih zrn magnezija v primerjavi z neobdelanim materialom. Meritve trdote so pokazale utrjevanje površine, ki je bila najbolj izrazito pri lasersko teksturiranem vzorcu. Rezultati meritev omočljivosti so pokazali superhidrofobno naravo LT površine medtem ko je bila peskana površina superhidrofilna s kotom omočljivosti koreliranim s časovnim intervalom peskanja. Najvišjo stopnjo odpornosti proti obrabi ter korozijske odpornosti pa je pokazala s konvencionalno metodo peskanja obdelana površina v najkrajšem časovnem intervalu 2 s. Na ta način smo z našo raziskavo opozorili, da lahko obdelave površine s preprostimi metodami še vedno do določene mere konkurirajo z modernejšimi tehnologijami površinskih obdelav kot je lasersko teksturiranje.



Slika 1: S konvencionalno metodo peskanja ter z napredno metodo laserskega teksturiranja modificirana površina magnezija v primerjavi z neobdelano površino magnezija.

Prostorsko organizirana heterogenost kroji modularno naravo in funkcionalnost omrežij celic beta

Maja Duh^{1,2,4}, Marko Šterk^{1,2}, Lidija Križančič Bombek¹, Patrick E. MacDonald³,
Andraž Stožer¹ in Marko Gosak^{1,2,4}

1. Inštitut za fiziologijo, Medicinska fakulteta, UM, Maribor

2. Univerza Alma Mater Europaea, Maribor

3. Inštitut za farmakologijo in Inštitut za Diabetes, Univerza Alberta, Edmonton, Kanada

4. Oddelek za fiziko, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, UM, Maribor

Večcelične strukture interpretirajo zunanje dražljaje skozi kolektivna delovanja celičnih populacij. To velja tudi za Langerhansove otočke, v katerih se omrežja celic beta koordinirano odzivajo na spremembe v zunajceličnih koncentracijah hranil in uravnavajo izločanje inzulina. Zaradi funkcionalne heterogenosti pa so njihovi vzorci prostorsko-časovne dinamike zelo kompleksni in nepopolno razumljeni [1]. V naši raziskavi smo se osredinili na preučevanje systemske organiziranosti celic beta in na njeno sovpadanje s funkcionalnimi omrežji. Slednja smo zgradili na podlagi s konfokalno mikroskopijo izmerjene večcelične kalcijeve aktivnosti v pankreatičnih tkivnih rezinah miši in v izoliranih otočkih človeških darovalcev [2,3]. Naše analize celične aktivnosti so pokazale, da se celice beta s podobnimi signalnimi značilnostmi prostorsko združujejo v večje skupke in da se ob prehodu iz nestimulativne v stimulatивно raven glukoze celice aktivirajo progresivno v manjših skupkih. Opazili smo tudi, da so funkcionalna omrežja celic beta visoko modularna, pri čemer je struktura skupnosti močno odvisna od prostorske pozicije celic. Ta struktura se delno prekriva s skupki, določenimi na podlagi kalcijeve aktivnosti, še bolj pa s skupinami hkratnih aktivacij, ki nastanejo kot odziv na zvišanje ravni glukoze. Vse to nakazuje na medsebojno prepletenost teh fenomenov ter prisotnost splošnih organizacijskih načel, ki veljajo tako za otočke miši kot tudi otočke človeških darovalcev. Ugotovili smo tudi, da so specifične subpopulacije celic, kot so centralne celice, celice, ki sprožajo kalcijeve valove, in celice, ki se prve odzovejo na stimulacijo, načeloma razporejene po različnih skupnostih. Prisotnost le-teh je v mišjih otočkih odvisna predvsem od njihove lege znotraj otočka, medtem ko je v človeških otočkih bolj pod vplivom aktivnosti posamezne podregije [4].

[1] G. A. Rutter, A. Gresch, L. S. Delgadillo in R. K. P. Benninger, Exploring pancreatic beta-cell subgroups and their connectivity. *Nature Metabolism* (2024)

[2] A. Stožer, M. Šterk, E. P. Leitgeb, R. Markovič, M. S. Klemen, C. E. Ellis, L. K. Bombek, J. Dolenšek, P. E. MacDonald in M. Gosak, From isles of Königsberg to islets of Langerhans: examining the function of the endocrine pancreas through network science, *Frontiers in Endocrinology* (2022)

[3] M. Šterk, Y. Zhang, V. Pohorec, E. P. Leitgeb, J. Dolenšek, R. K. P. Benninger, A. Stožer, V. Kravets in M. Gosak, Network representation of multicellular activity in pancreatic islets: Technical considerations for functional connectivity analysis, *PLOS Computational Biology* (2024)

[4] M. Duh, M. Šterk, L. K. Bombek, P. E. MacDonald, A. Stožer in M. Gosak, Spatial Organization and Temporal Dynamics of Pancreatic Beta Cell Networks, "in preparation"

Dinamika ionov, električni potencial in aktivnost v nematskih tekočinah

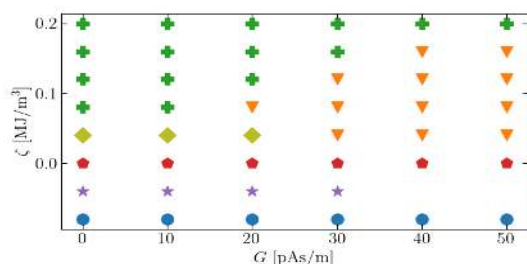
Vitja Beltram^{1,2}, Žiga Kos² in Miha Ravnik^{1,2}

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

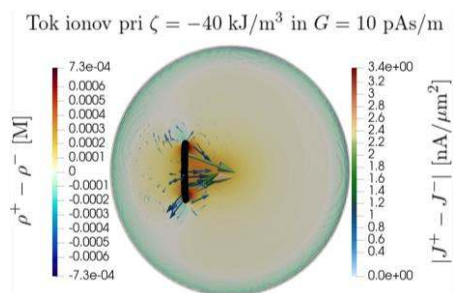
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Velik poudarek pri raziskovanju izotropnih tekočin z ioni (elektrolitov) je dan na kontrolo naboja, saj ta igra ključno vlogo pri lastnostih različnih sistemov. Vsem je skupno, da je naboj kontroliran preko površin, ki se ustvarijo med različnimi tekočinami ali med tekočino in trdnino. Nastavljanje površin pa ni trivialno, zato lahko pri kontroli naboja pride do določenih omejitev. V primerjavi z izotropno tekočino pa tekočekristalno urejena mehka snov zaradi višje stopnje urejenosti ponuja več možnosti za kontrolo naboja. Naboj se namreč lokalizira v topoloških defektih orientacijske ureditve [1].

Da bi boljše razumeli različne elektrostatske efekte, vključno z ioni, na dinamiko aktivnih kompleksnih nematskih tekočin, smo z numeričnimi simulacijami in teoretično analizo raziskovali vpliv fleksoelektričnosti in ionov v aktivnem nematskem tekočem kristalu [2]. Najprej smo s primerjavo analitičnih in numeričnih izračunov v izotropni tekočini z ioni v eni in dveh dimenzijah pokazali razliko med režimoma predpisanega potenciala in predpisanega naboja. Osredotočili smo se na sistem konstantnega števila ionov, kar je omejilo izbiro robnih pogojev. Nato smo v aktivnem nematiku s fleksoelektričnostjo raziskali dinamiko v sferični kapljici pri različnih vrednostih fleksoelektrične konstante in aktivnosti (glej sliko 1). Opazili smo nabor dinamičnih režimov, ki smo jih opisali in karakterizirali, med njimi je bila tudi aktivna turbulenca. Nadaljevali smo z raziskovanjem dinamike aktivnega nematika z ioni v različnih dinamičnih režimih, pri čemer smo opazovali tudi električni tok v celici. Opazili smo, da ioni večinoma sledijo dinamiki direktorskega polja in materialnega toka ter nanjo ne vplivajo (slika 2). Spremembo smo opazili le pri režimu aktivne turbulence, katere stabilnost so ioni povečali na račun bolj statičnih režimov. Časovno povprečje električnega toka v celici je bil v vseh režimih zanemarljiv. Nazadnje smo pokazali, da različne Gibbsove prenosne energije vplivajo na gostoto ionov v jedrih defektov.



Slika 1: Fazni diagram aktivnega nematika brez ionov v omejenem območju aktivnosti ζ in fleksoelektrične konstante G .



Slika 2: Gostota in tok ionov ter disklinacijski obroč v aktivnem nematiku z ioni.

[1] J. C. Everts in M. Ravnik, *Ionically Charged Topological Defects in Nematic Fluids*, Phys. Rev. X **11**, 011054 (2021).

[2] V. Beltram, *Dinamika ionov, električni potencial in aktivnost v nematskih tekočinah* (2024), magistrsko delo

Raziskave na področju fizike mehke snovi v skupini Svetloba in snov

Luka Cmok^{1,2} in Mojca Vilfan^{1,2}

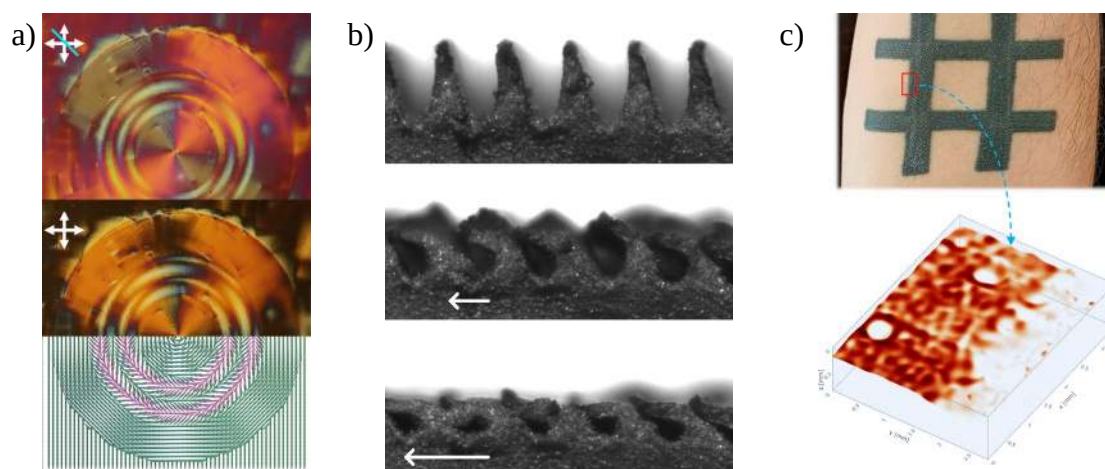
¹Odesek za kompleksne snovi, Institut Jožef Stefan, Ljubljana

²Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Interakcija svetlobe s snovjo je eden od najosnovnejših mehanizmov za proučevanje fizikalnih lastnosti snovi. Ta proces ima zaradi bogatega nabora raznovrstnih optičnih pojavov pomembno vlogo tako v osnovnih raziskavah kot v sodobnih tehnologijah. S svetlobo lahko snovi preučujemo, vzbujujamo, spreminjamo in manipuliramo, hkrati pa lahko s snovmi vplivamo na lastnosti svetlobe.

V programski skupini Svetloba in snov (<http://complex.ijs.si>) z optičnimi tehnikami raziskujemo mehke snovi, pri čemer se osredotočamo predvsem na tekoče kristale, koloide, elastomere in biološke materiale. Proučujemo njihovo strukturo, fazne prehode, dinamične procese ter odzive na zunanja polja in druge zunanje dejavnike. Pri tem uporabljamo vrsto različnih optičnih eksperimentalnih metod, kot so standardna in polarizacijska ter nelinearna optična mikroskopija, optična pinceta, navzkrižna diferenčna dinamična mikroskopija, dinamično sipanje svetlobe, fluorescenčna spektroskopija, spektroskopska elipsometrija, fototermalna radiometrija in difuzna odbojna spektroskopija. Poleg tega nove eksperimentalne metode tudi sami razvijamo, izpopolnjujemo in prilagajamo glede na specifične potrebe raziskav.

Najobširnejše raziskave trenutno potekajo na področju nedavno odkritih polarnih tekočerkristalnih faz, še posebej feroelektrične in feromagnetne nematične faze (slika 1a). Zanimajo nas tudi mehanizmi nastanka tekočerkristalnih faz v bioloških molekulah, kot na primer oligonukleotidih DNK. Proučujemo lasersko strukturirane elastomere z magnetnimi delci, ki jih lahko krmilimo z magnetnim poljem, kar obeta široke možnosti uporabe v mehki robotiki (slika 1b). Na področju eksperimentalne biofizike sodelujemo s farmacevtskimi partnerji in raziskujemo procese agregacije beljakovin, ki so pomembni pri razvoju bioloških zdravil. Na področju biomedicinske optike razvijamo neinvazivne metode za karakterizacijo bioloških tkiv in organov, predvsem kože (slika 1c).



Slika: Feroelektrični nematični tekoči kristal in simulacija ureditve molekul (a); magnetne elastomerne lamele, ki se odzivajo na magnetno polje (b); razvoj nove tehnike za prostorsko slikanje tetovaž (c)

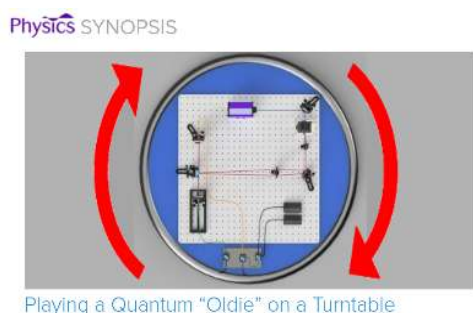
Kvantna optika in mehanske rotacije

Marko Toroš¹

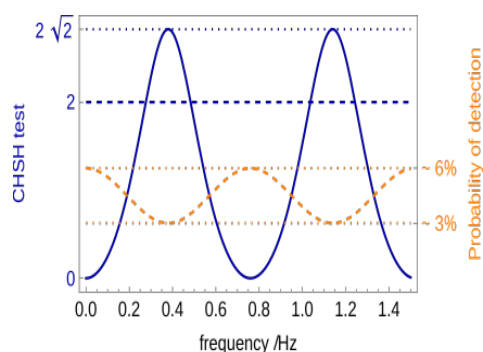
1. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Jadranska 19, SI-1000 Ljubljana

Pregledali bomo nedavne eksperimentalne in teoretične rezultate kvantne optike na vrtečih se platformah. Ti rezultati opirajo nove smeri tako za temeljne raziskave kot za kvantne tehnologije. Testiramo lahko teoretične zamisli o kvantni mehaniki v ne-inercialnih sistemih, kjer se istočasno pojavijo tako elementi Einsteinove relativnosti kot tudi temeljnimi kvantni pojavi. Poleg tega nadzorovanje kvantnih pojavov z nizkofrekvenčnimi mehanskimi rotacijami opira vrata novim metodam zaznavanja rotacijskega gibanja, kot tudi ustvarjanju kvantnih stanj svetlobe z mehanskimi rotacijami.

Eksperimenti so pokazali da nizkofrekvenčne mehanske rotacije vplivajo na statistiko fotonov [1] ter da lahko pretvorijo fotone iz popolnoma nerazločljivih (bozonsko obnašanje) v popolnoma razločljive (fermionsko obnašanje) [2,3]. Poleg tega je bilo napovedano ustvarjanje prepletenosti z nizkofrekvenčnimi mehanskimi rotacijami [4] ter rotacijsko inducirano kvantno nelokalnost, ki lahko maksimalno krši Clauser-Horne-Shimony-Holt (CHSH) neenakost v eksperimentalno dostopnem režimu [5].



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



Slika 2: Odvisnost nelokalnosti od kotne hitrosti (arXiv:2407.14276).

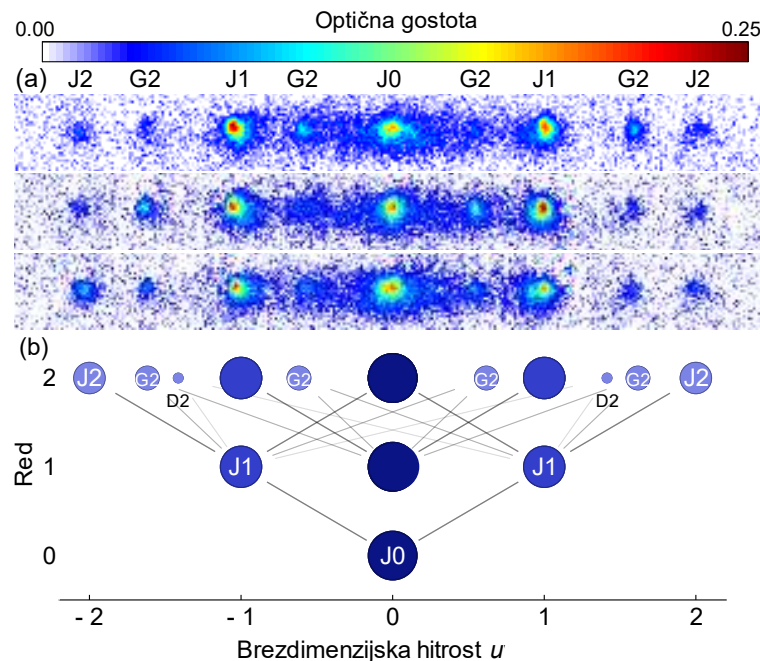
- [1] S Restuccia, M Toroš, GM Gibson, H Ulbricht, D Faccio, MJ Padgett, Photon bunching in a rotating reference frame [Phys. Rev. Lett. **123**, 110401 \(2019\)](#)
- [2] M Toroš, S Restuccia, GM Gibson, M Cromb, H Ulbricht, MJ Padgett, D Faccio. Revealing and concealing entanglement with noninertial 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, M Paternostro, MJ Padgett, D Faccio, Generating quantum non-local entanglement with mechanical rotations [arXiv:2407.14276 \(2024\)](#)

Bosejevi ognjemeti v zlatem rezu

Tadej Mežnaršič^{1,2,3}, Rok Žitko^{3,4}, Katja Gosar^{1,3}, Jure Pirman^{1,3}, Katja Arh^{1,3},
Matevž Jug^{1,3}, Erik Zupanič^{1,5} in Peter Jeglič^{1,3}

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Univerza v Chicagu, ZDA
3. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
4. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana
5. Naravoslovnotehniška fakulteta, UL, Ljubljana

Bose-Einsteinov kondenzat cezijevih atomov vzbuja s periodično modulacijo interakcije med atomi. Pari atomov ob trku pridobijo en kvant energije vzbujevalnega polja in se izstrelijo iz kondenzata. Ker gre za bozonsko stimuliran proces, število izstreljenih atomov eksponentno narašča, tako da se jih večina nabere v dveh nasproti letečih valovnih paketih vzdolž kvazi-enodimenzionalne dipolne pasti [1]. Če je število atomov v izstrelkih prvega reda dovolj veliko, lahko opazimo tudi izstrelke višjih redov, ki nastanejo z več zaporednimi trki atomov. V eksperimentu smo opazili izstrelke z dvakratno hitrostjo prvega reda in pa izstrelke, katerih hitrosti so $(1 + \sqrt{5})/2$ (zlati rez) in pa $(1 - \sqrt{5})/2$ hitrosti prvega reda [2]. Slednji nastanejo pri trku mirujočih atomov in izstrelkov prvega reda. Zaradi njihove hitrosti, ki je v brezdimenzijskih enotah enaka zlatemu rezu, jim pravimo »zlati«, jim pravimi »zlati«.



Slika 1: (a) Absorpcijske slike treh različnih primerov izstrelkov med katerimi so tudi »zlati« (oznaka G2). (b) Shema vseh mogočih izstrelkov, ki lahko nastanejo po enem ali dveh zaporednih trkih (red, dodatno označen tudi z barvo).

[1] Tadej Mežnaršič, Rok Žitko, Tina Arh, Katja Gosar, Erik Zupanič in Peter Jeglič, Emission of correlated jets from a driven matter-wave soliton in a quasi-one-dimensional geometry, *Phys. Rev. A* **101**, 031601(R) (2020).

[2] Tadej Mežnaršič, Rok Žitko, Katja Gosar, Jure Pirman, Katja Arh, Matevž Jug, Erik Zupanič in Peter Jeglič, Incommensurable matter-wave jets in quasi-1D geometry, arXiv.2303.07004 (2024).

Urejanje tekočih kristalov s 3D tiskom

○Uroš Jagodič¹, Mahendran Vellaichamy¹, Miha Škarabot^{1,2}, Igor Muševič^{1,2}

¹Odsek za fiziko trdne snovi, Institut "Jožef" Stefan,
Jamova 39, 1000 Ljubljana

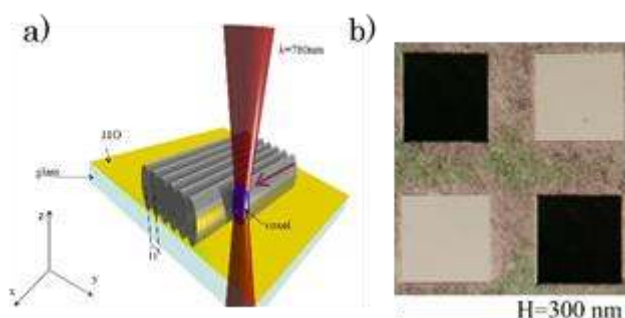
²Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska 19, 1000 Ljubljana

Urejanje tekočih kristalov (TK) je ključno tako za tehnološke aplikacije kot za temeljno znanost, ki vključuje površine TK. Tradicionalne tehnike poravnave, kot sta mehansko drgnjenje in foto-poravnava, ustvarjajo specifične vzorce na površini, ki usmerjajo orientacijo molekul TK. V tem delu prikažemo uporabo neposrednega laserskega 3D tiska (DLW) za izdelavo polimernih poravnalnih slojev, s čimer dosežemo visokokakovostno poravno površin in omogočimo izdelavo kompleksnih vzorcev.

Tehnika DLW uporablja femtosekundni laser z valovno dolžino 780 nm za polimerizacijo fotosenzitivne smole. Žarišče laserja -voxel se nadzira in premika, s čimer nastane tanek polimerni sloj s specifičnimi vzorci, kot je prikazano na Sliki 1.a. Velikost voxla ali prostornina polimerizacije je odvisna od uporabljenega objektiva – objektivi z višjo numerično aperturo omogočajo boljšo ločljivost. Preizkusili smo različne smole, vključno z IP-S, IP-L in IP-n162 (Nanoscribe GmbH), glede na njihovo učinkovitost pri ustvarjanju poravnalnih slojev.

Izmerili smo jakost sidranja površine in elektro-optične lastnosti twist nematičnih celic, pripravljenih z natisnjenimi poravnalnimi sloji. Te celice so bile napolnjene s 5CB ali z MLC13300. Kakovost poravnave in elektro-optične lastnosti smo preverjali s polarizacijsko mikroskopijo in različnimi metodami merjenja.

Ustvarili smo vzorce šahovnice z izmeničnimi smermi poravnave, kot je prikazano na Sliki 1.b. Izmerili smo azimutalno jakost sidranja, ki znaša $5 \times 10^{-6} \text{ J/m}^2$. Čeprav je sidrna jakost DLW slojev nekoliko šibkejša od komercialnih podrgnjenih polimidnih slojev, je bil prag napetosti za Fréederickszov prehod le nekoliko višji v primerjavi s celicami, pripravljenimi s polimidnimi sloji. Poleg tega so bili izmerjeni časi preklopa primerljivi s časi preklopa celic s polimidnimi sloji.



Slika 1. a) Shematski prikaz delovanja dvo-tofonskega DLW tiska, kjer je razmak med dvema črtama risanja poimenovan hatching H. b) POM slika 8 μm twist nematic celice s šahovnico ki ima hatching 300nm.

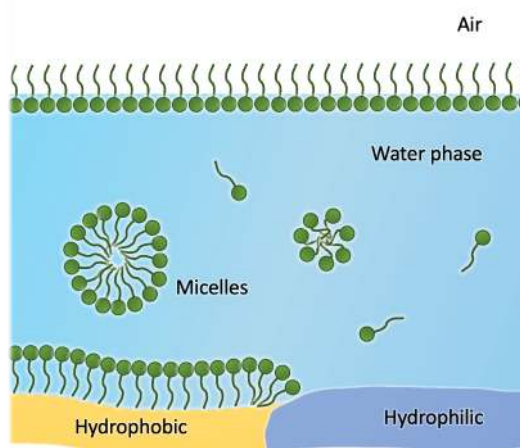
Predstavljamo, da lahko DLW učinkovito ustvari poravnalne sloje za nematske tekoče kristale (NLC) ter omogoča natančen nadzor nad vzorci poravnave. Prilagodljivost DLW omogoča izdelavo kompleksnih vzorcev poravnave tako v 2D kot v 3D, kar odpira nove možnosti za uporabo tekočih kristalov v optičnih in fotonih aplikacijah.

Adsorpcija surfaktantov in micelizacija: Vpogledi iz molekularnih simulacij

Fabio Staniscia¹, Marin Šako^{1,2} in Matej Kanduč¹

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

Adsorpcija amfifilnih molekul na vodnih površinah (slika 1) se pojavlja v številnih tehnoloških in bioloških okoljih, včasih zaželena (stabilizacija pene), včasih pa ne (kontaminacija). Majhni surfaktanti tvorijo ohlapne monosloje in izkazujejo hitro izmenjavo med površino in raztopino, kar je mogoče spremljati v molekularnih simulacijah [1]. Surfaktanti z daljšimi alkilnimi verigami se adsorbirajo v obliki gostejših monoslojev in se izmenjujejo na eksperimentalnih časovnih skalah, ki so predolge, da bi jih zajele simulacije, kar predstavlja izziv za molekularno modeliranje [2]. Dvoverižni surfaktanti (imenovani tudi "lipidi") pa se izmenjujejo med raztopino in površino še precej počasneje kot so eksperimentalne časovne skale. Obstajajo kot dvoslojni agregati že v raztopini in se adsorbirajo na površine v obliki monoslojev le pod določenimi pogoji [3].



Slika 1: Amfifilne molekule (surfaktanti) se samosestavljajo v agregate v vodnih medijih ter adsorbirajo na določene površine v obliki monoslojev.

[1] F Staniscia, HV Guzman, M Kanduč, J. Phys. Chem. B **126** (17), 3374 (2022)

[2] M Kanduč, C Stubenrauch, R Miller, E Schneck, J. Chem. Theory Comput. **20** (4), 1568 (2024)

[3] M Šako, F Staniscia, E Schneck, RR Netz, M Kanduč, PNAS Nexus **2** (6), pgad190 (2023)

Sistem za kreacijo in verifikacijo kvantnih centrov blizu površine

Mitja Kelemen¹, Žiga Brenčič^{1,2}, Matevž Skobe¹, Žiga Gosar^{2,3} in Jurij Simčič¹

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

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

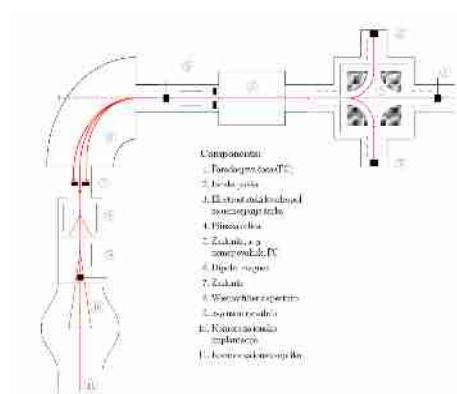
3. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

Defekte v diamantnem kristalu, ki so sestavljeni iz vezanega stanja vrinjenega dušikovega atoma in praznine brez ogljikovega atoma (ang. nitrogen-vacancy, skrajšano N-V), je mogoče uporabiti kot stabilen kubit v kvantnem računalništvu in za obdelavo informacij pri sobni temperaturi [1]. Istočasno je tak vezan sistem občutljiv na perturbacije zunanjega električnega ali magnetnega polja ali temperature. To spremeni kubit v izjemno natančen in občutljiv senzor[2].

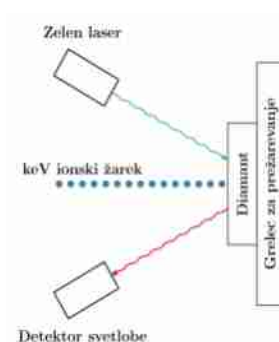
Za raziskovanje novih kvantnih pojavov potrebujemo N-V centre in tudi druge barvne centre, sestavljene iz poljubnih ionov in praznine (I-V), tik pod površino diamantnega kristala. Ena od uveljavljenih metod ustvarjanja centrov je ionska implantacija. S prilagajanjem energije ionskega žarka med eV do nekaj MeV vsadimo poljuben ion v kristalno rešetko diamanta v globine od nekaj nm do nekaj μm .

Trenutno lahko na Mikroanalitskem centru, Inštitutu Jožefa Stefana ustvarjamo N-V centre v diamantih z uporabo MeV ionskih žarkov dušika, vendar ta metoda proizvaja samo N-V centre v globini. Da bi odprli nove možnosti pri ustvarjanju ionskih centrov, nameravamo razširiti implantacijo ionskih žarkov do energij nekaj keV. S tem projektom bi uvedli pospeševanje ionskih žarkov z energijo nekaj keV in jih uporabili za nizkoenergijsko implantacijo ionov. To nam bo omogočilo proizvodnjo plitvih centrov v diamantih z visoko prostorsko (x, y), visoko globinsko ločljivostjo (z), hkrati pa bomo zmožni nadzorovati količino implantiranih ionov.

V tem prispevku bomo predstavili eksperimentalno opremo, ki bo omogočala implantacijo diamantov s poljubnimi ioni, prežarevanje diamantov, celjenje poškodb kristalne rešetke med implantacijo in aktivacijo I-V centrov. Ter in-situ laserski sistem za verifikacijo in karakterizacijo ustvarjenih in aktiviranih I-V centrov.



Slika 1: Shema keV implantacijske linije.



Slika 2: Shema in-situ sistema za detekcijo in aktivacijo I-V centrov.

[1] D. Awschalom et al., Nat. Photonics, VOL12, 2018

[2] R. Schirhagl et al., Annu. Rev. Phys. Chem., VOL 65, 2014

Hitrost doze po zaustavitvi v fuzijskih reaktorjih

Ylenia Kogovšek Žiber^{1,2}, Klemen Ambrožič^{1,2} in Igor Lengar²

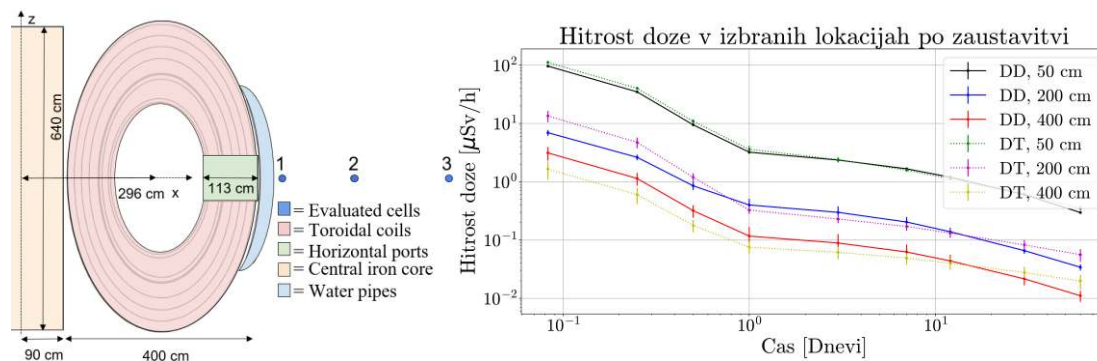
1. Odsek za reaktorsko fiziko, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Pri načrtovanju fuzijskih reaktorjev je iz vidika varnosti ključnega pomena poznavanje polj sevanja v reaktorju in hitrosti doze med delovanjem in po zaustavitvi. Težave pri varnosti fuzijskega reaktorja, kot so degradacija občutljive opreme in izpostavljenost vzdrževalnega osebja sevanju med remontom [1], je mogoče zmanjšati z natančnimi napovedmi hitrosti doze po zaustavitvi (angl. Shut Down Dose Rate, SDDR). Večina izračunov hitrosti doze po zaustavitvi je bila narejena na modelih poskusnega fuzijskega reaktorja ITER (angl. International Thermonuclear Experimental Reactor) in Tokamak JET (angl. Joint European Torus).

Za izračun hitrosti doze po zaustavitvi obstajata dve metodologiji, rigorozna dvostopenjska metoda (R2S) in direktna enostopenjska metoda (D1S). Hitrost doze po zaustavitvi je izračunana s kodo D1SUNED [2] na poenostavljenem modelu tokamaka JET. Model tokamaka ima premer 10 m, višino 6,5 m in je prikazan na Sliki 1. Hitrost doze je izračunana v kroglih s polmerom 5 cm na razdalji 50 cm, 200 cm in 400 cm od tokamaka. Modeliran je bil obsevalni scenarij z 20 pulzi dolžine 10 sekund z intenziteto 10^{17} 1/s za DT in TT plazmo.

V kroglu na lokaciji 1 ob času 0,5 dneva po zaustavitvi je vrednost hitrosti doze za DT plazmo 13 % višja kot vrednost hitrosti doze za DD plazmo pri enaki intenziteti nevtronov. Rezultati izračunov hitrosti doze po zaustavitvi, ki so predstavljeni na sliki 2., imajo podoben trend in so primerljivi z drugimi raziskavami [3].



Slika 1: Vertikalni presek poenostavljenega modela tokamaka. **Slika 2:** Hitrost doze do 60 dni po zaustavitvi za DT in DD plazmo.

[1] A. Kolsek, R. Juarez, A. Lopez, G. Pedroche, A. Serikov, R. Pampin, L. Bertalot, V. Udintsev, J. Guirao in J. Sanz, "Shutdown dose rate mitigation in the ITER upper ports", Fusion Engineering and Design, 136, Part A (2018)

[2] P. Sauvan, R. Juarez, G. Pedroche, J. Alguacil, J.P. Catalan, F. Ogando, J. Sanz, "D1SUNED system for the determination of decay photon related quantities", Fusion Engineering and Design, Volume 151 (2020)

[3] B. Kos, G. Radulescu, R. Grove, R. Villari, P. Batistoni, "Comprehensive Analysis of Streaming and Shutdown Dose Rate Experiments at JET with ORNL Fusion Neutronics Workflows", Fusion Science and Technology, 79(3) (2023)

Raziskovanje delovanja negrafitiziranega ogljika in $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$ v Na-ionskih akumulatorjih s pomočjo *operando* jedrske magnetne resonance v trdnem

Matej Gabrijelčič^{1,2}, Blaž Tratnik¹, Marjan Bele¹, Elena Tchernychova¹, Nataša Zabukovec Logar^{1,3}, Robert Dominko^{1,4,5}, Andraž Krajnc¹, Alen Vizintin¹

1. Kemijski inštitut, Hajdrihova 19, 1000 Ljubljana, Slovenija

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Jadranska 19, 1000 Ljubljana, Slovenija

3. Fakulteta za podiplomski študij, Univerza v Novi Gorici, Vipavska 13, 5000 Nova Gorica, Slovenija

4. Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerza v Ljubljani, Večna pot 113, 1000 Ljubljana, Slovenija

5. ALISTORE-European Research Institute, CNRS FR 3104, Hub de l'Energie, Rue Baudelocque, 80039 Amiens Cedex, Francija

Možne Na-ionske akumulatorje sestavljajo negrafitizirani ogljiki za negativno elektrodo in $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$ (NVPF) za pozitivno elektrodo. (De)interkalacija in (de)insercija Na ionov iz/v negrafitizirane ogljike in NVPF sta v središču številnih nedavnih študij [1]. Omenjen akumulatorski sistem je v primerjavi z Li-ionskim razmeroma nov, zato njen natančen mehanizem delovanja in degradacije še ni povsem pojasnjen [2]. V tej študiji so bile s pomočjo *operando* spektroskopije jedrske magnetne resonance (NMR) v trdnem stanju določene fizikalne in elektrokemijske lastnosti polovične celice iz negrafitiziranega ogljika, pridobljenega iz koruznih storžev pri 1400 °C [3], ter polovične celice iz NVPF.

Zaradi nastajanja različnih metastabilnih, vmesnih in/ali kratkotrajnih faz med elektrokemijskimi reakcijami v celici, le-teh ni mogoče zaznati v *ex-situ* načinu [4]. Zato se sodobne raziskave usmerjajo v *operando* meritve [5]. V tem načinu akumulator med delovanjem ni uničen, ampak se uporabljajo neinvazivne metode za opazovanje akumulatorja med delovanjem, s čimer se pridobijo informacije o dinamičnih strukturnih spremembah in procesih v realnem času.

Z merjenjem NMR spektrov ^{23}Na negrafitiziranega ogljika v konfiguraciji polovične celice smo pridobili informacije o interkalaciji natrija v aktivni material, kar vodi do premika NMR vrha med procesom sodiacije, tvorbe trdne elektrolitske plasti (SEI) na površini elektrode v obliki Na_2CO_3 ter potencialne tvorbe kovinskih dendritov na Na elektrodi. Poleg tega smo lahko opazovali tudi spremembe v kemijskem okolju materiala NVPF med sodiacijo v konfiguraciji polovične celice. [6]

Ta raziskava je prejela finančno podporo CERIC-ERIC in Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v okviru raziskovalnega programa P2-0423 in P1-0021 ter projekta N2-0266.

[1] X. Chen, Y. Zheng, W. Liu, C. Zhang, S. Li, and J. Li, *Nanoscale* **11**, 22196 (2019).

[2] C. Bommier, T. W. Surta, M. Dolgos, and X. Ji, *Nano Lett.* **15**, 5888 (2015).

[3] B. Tratnik, N. Van de Velde, I. Jerman, G. Kapun, E. Tchernychova, M. Tomšič, A. Jamnik, B. Genorio, A. Vizintin, and R. Dominko, *ACS Appl. Energy Mater.* **5**, 10667 (2022).

[4] L. H. B. Nguyen, P. Sanz Camacho, T. Broux, J. Olchowka, C. Masquelier, L. Croguennec, and D. Carlier, *Chem. Mater.* **31**, 9759 (2019).

[5] J. M. Stratford, P. K. Allan, O. Pecher, P. A. Chater, and C. P. Grey, *Chem. Commun.* **52**, 12430 (2016).

[6] M. Gabrijelčič, B. Tratnik, M. Bele, E. Tchernychova, N. Zabukovec Logar, R. Dominko, A. Krajnc, A. Vizintin, manuscript under preparation.

Funkcionalizacija SiO₂ površin z alkoksi silani

Urška Gazdag^{1,2}, Aljaž Sušnik^{1,3}, Ajda Tuševski⁴, Drago Strle⁴, Miha Ravnik^{1,3},
Aleksander Matavž^{1,3}

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, UL, Ljubljana

3. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

4. Fakulteta za elektrotehniko, UL, Ljubljana

Funkcionalizacija SiO₂ površin na substratih iz silicija (angl. *single-crystal Si wafer*), igra pomembno vlogo v tehnoloških aplikacijah, primer so kemijski senzori za hlapne organske spojine, ki jih razvijamo v sklopu projekta “Razvoj integriranega mnogo kanalnega umetnega nosu za detekcijo raka” [1, 2].

Pogosta oblika kemijske modifikacije površine je depozicija monosloja (angl. *self-assembled monolayer*) alkoksi silanov (splošna formula R¹-Si-(OR²)₃), s čimer vplivamo na lastnosti površine, npr. njeno afiniteto za interakcije s spojinami iz okolice. Da je funkcionalizacija uspešnejša, je potrebna čim boljše predhodna hidroksilacija površine, s katero povečamo število terminalnih hidroksilnih (-OH) skupin na površini. Posebno pozornost moramo posvetiti tudi homogenosti nanešene plasti, na katero vpliva stopnja medsebojne kondenzacije na površino vezanih molekul silana preko siloksanskih povezav [2].

Izbira silana temelji na željeni polarnosti in reaktivnosti njegove funkcionalne skupine. Pri modifikaciji površine so poleg lastnosti izbranega silana ključni parametri še koncentracija uporabljene raztopine silana, topilo, temperatura pri depoziciji, čas reakcije, način in trajanje sušenja substrata po funkcionalizaciji, vsebnost vode itd. [3]. Za pripravo senzorjev v našem projektu smo izbrali silane z različnimi lastnostmi za čim bolj raznolik odziv na različne hlapne organske spojine. Za določitev uspešnosti funkcionalizacije površine smo uporabili meritev kontaktnega kota, debelino nanešene plasti pa smo določili posredno z nedestruktivno optično metodo spektroskopsko elipsometrijo. Preko meritve količine adsorbiranih plinov pri različnih parcialnih tlakih smo določili fizikalno-kemijske lastnosti modificirane površine. Ta meritev nam poda informacije tudi o stabilnosti tanke plasti v določeni atmosferi. Z omenjenimi metodami smo preverili vpliv sinteznih pogojev na uspešnost funkcionalizacije, vključno s vplivom izbire topila, starostjo reakcijske raztopine ter debelino SiO₂ plasti. V naslednji fazi bomo te izsledke uporabili pri selektivni funkcionalizaciji senzorskih kondenzatorjev in preverili njihov električni odziv na različne pline.

[1] D. Strle, B. Štefane, M. Trifkovič, M. Van Miden, I. Kvasić, E. Zupanič in I. Muševič, *Sensors* **17**, 2845 (2017).

[2] M. Sypabekova, A. Hagemann, D. Rho in S. Kim, *Biosensors* **13**, 36 (2022).

[3] G. Jakša, B. Štefane in J. Kovač, *Appl. Surf. Sci.* **315**, 516 (2014).

Rentgenski absorpcijski spektri HI na jodovih robovih K in L : učinki molekularskih orbital in notranjih podlupin

Robert Hauko¹, Jana Padežnik Gomilšek¹, Alojz Kodre^{2,3}, Iztok Arčon^{4,3} in Uroš Luin⁵

1. Fakulteta za strojništvo, UM, Maribor

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

3. Institut Jožef Stefan, Ljubljana

4. Univerza v Novi Gorici

5. Laboratorij za raziskave materialov, Univerza v Novi Gorici

Rentgenski absorpcijski spektri so vir osnovnih podatkov o atomu, hkrati ponujajo test različnih teoretičnih modelov. Posebej pomembne so raziskave usklajenega gibanja elektronov znotraj atoma - elektronskih korelacij. Te se kažejo v obliki drobnih struktur nad absorpcijskim robom in so posledica vzbuditve ali izbitja dodatnih, manj vezanih elektronov, ki spremljajo primarni fotoefekt v notranji lupini. V spektrih atomov s stalno kemijsko okolico ostajajo te strukture zakrite v precej močnejših nihanjih absorpcije zaradi sipanja fotoelektrona na bližnjih sosedih – signal EXAFS. Tako so za raziskave elektronskih korelacij najbolj primerni vzorci prostih atomov. Poleg žlahtnih plinov, ki so naravno enoatomni in so zato najbolj raziskani, so bili do sedaj zaradi zahtevnosti priprave vzorcev izmerjeni atomarni spektri samo pri peščici hlapljivih kovin in jodu [1]. Učinke elektronskih korelacij lahko preučujemo tudi v absorpcijskih spektrih plinastih vzorcev iz preprostih molekul. Najbolj uporabne so molekule hidridov, pri katerih preprosta kemijska vez z vodikovim atomom ne spremeni bistveno potenciala preučevanega atoma, strukturni signal EXAFS pa je preprost in šibak [2].

Izmerili in analizirali smo rentgenske absorpcijske spektre plinastega vodikovega jodida (HI) v območju vezavnih energij notranjih lupin K in L [3]. V enovito analizo smo vključili že prej izmerjene spektre ksenona (Xe) in atomarnega joda (I), rezultate smo primerjali tudi s homolognimi spektri lažjih hidridov (HF, HCl in HBr), ter z žlahtnimi plini (Ne, Ar, Kr).

V monoatomnem spektru I se v primerjavi z HI in Xe pokaže močno povečana relativna verjetnost za enoelektronske prehode $[1s]6p$. Ponuja se analogija iz analize parov atomarnih spektrov alkalnih elementov in pripadajočih žlahtnih plinov: valenčni elektron na polovično zapolnjeni podlupini v atomu alkalnega elementa slabše senči jedro za vzbujeni elektron, kar povečuje verjetnost za prehod iz $1s$ na np [1]. Nezapolnjeno elektronsko stanje $5p$ v jodovem atomu pa ne vpliva bistveno na večielektronske prehode: izolirane sovzbuditve podlupin $4d$, $4p$ in $3d$ v atomarnem I imajo praktično enake preseke kot v HI in Xe. Te sovzbuditve so enako močne tudi v HI in Xe na robovih L , vloga proste molekulske orbitale je pri tem relativno majhna.

Pri HI so sovzbuditve valenčnih elektronov na prosto molekulske orbitale na robu L_3 precej intenzivnejše kot na robu L_1 , kar pripisemo vplivu elektronskih korelacij ter modifikaciji molekulske orbitale zaradi različnih simetrij (p ali s) globokih vrzeli. Pričakovano pa vrtilna količina globoke vrzeli nima zaznavnega učinka na proces otresanja globje vezanih elektronov.

Eksperimentalno delo je bilo opravljeno na raziskovalnih linijah XAFS sinhrotrona Elettra v Trstu, Italija (projekta 20185165 in 20220483) ter P65-Petra III, Desy v Hamburgu, Nemčija (projekt I-20180356 EC). Delo je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije ARIS (P1-0112).

[1] A. Kodre in drugi, *Int. Tables Crystallogr.*, I., ch.3.23, 404-408 in ch.8.1, 926-930 (2024)

[2] R. Hauko in drugi, *Rad. Phys. Chem.* **171**, 108743 (2020)

[3] R. Hauko in drugi, *Iodine K - and L -edge X-ray absorption spectra of HI: the effect of molecular orbitals and core subshells*, poslano v objavo v *Rad. Phys. Chem.* (oktober, 2024)

Skaliranje ekscitacij pri prehodu prvega reda na kvantnem žarilniku

Gregor Humar^{1,2}, Jaka Vodeb³ in Dragan Mihailović^{1,2,4}

1. Odsek za kompleksno snov, IJS, Ljubljana, Slovenija

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana, Slovenija

3. Institute for Advanced Simulation, Jülich Supercomputing Centre, Forschungszentrum Jülich, Nemčija

4. CENN Nanocenter, Ljubljana, Slovenija

Kvantni fazni prehodi prvega reda so temeljni proces pri preučevanju neravnovesne dinamike mnogodelčnih sistemov. Prehodi čez kritično točko so dobro razumljeni pri prehodih drugega reda v okviru mehanizma Kibble-Zurek [1]. Nedavne študije pa so ta mehanizem razširile na določene prehode prvega reda [2, 3]. Napredek na področju kvantnih tehnologij omogoča nove programabilne platforme za eksperimentalno raziskovanje prehodov prvega reda v različnih kvantnih sistemih. Predstavljamo skaliranje gostot vzbuditev v Isingovem modelu s transverzalnim in longitudinalnim poljem po kvantnem faznem prehodu prvega reda na kvantnem žarilniku D-Wave. Obravnavamo protokol, pri katerem začnemo v osnovnem stanju Isingovega modela, nato pa počasi spremenimo polje v longitudinalni smeri čez kvantni fazni prehod prvega reda. Med časovno evolucijo se v specifičnih območjih parametrov tvorijo vzbuditve v obliki kvantiziranih mehurčkov. Gostote teh vzbuditev sledijo skaliranju, podobnemu mehanizmu Kibble-Zurek. Uporabljamo kvantni žarilnik D-Wave za dostop do velikih sistemov z 2000 kubiti in do dolgih simulacijskih časov. Rezultate kvantnih simulacij iz kvantnega žarilnika primerjamo z numeričnimi simulacijami.

[1] D. Rossini in E. Vicari. Coherent and dissipative dynamics at quantum phase transitions. *Physics Reports*, 936:1–110 (2021)

[2] A. Sinha, T. Chanda, in J. Dziarmaga. Nonadiabatic dynamics across a first-order quantum phase transition: Quantized bubble nucleation. *Phys. Rev. B*, 103:L220302 (2021)

[3] L.-Y. Qiu, H.-Y. Liang, Y.-B. Yang, H.-X. Yang, T. Tian, Y. Xu in L.-M. Duan. Observation of generalized kibble-zurek mechanism across a first-order quantum phase transition in a spinor condensate. *Science Advances*, 6(21):eaba7292 (2020)

Strukturni nered in naključne izmenjalne interakcije na trikotni mreži v spinskem sistemu $\text{Cr}_3\text{Se}_2\text{Br}_4$

Tilen Knaflič¹, Tina Arh¹, Matej Pregelj¹, Andrej Zorko^{1,2}, Wenhao Liu³, Zixin Zhai³, Bing Lv³ in Denis Arčon^{1,2}

1. Institut Jožef Stefan, Odsek za fiziko trdne snovi, Ljubljana, Slovenija

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija

3. The University of Texas at Dallas, Dallas, ZDA

V kvantnih magnetnih sistemih prisotnost antiferomagnetnih interakcij na trikotni mreži spinov lahko vodi do stanja kvantne spinske tekočine. V tem primeru je spinska dinamika prisotna tudi pri najnižjih temperaturah in sistem ne preide v stanje magnetne ureditve dolgega dosega [1,2]. Eden od razlogov za to je frustracija antiferomagnetnih interakcij med spini na trikotni mreži, kjer ni možno da bi bile vse interakcije hkrati antiferomagnetne. Sistem zato fluktuirata med mnogo stanji z enako energijo, kar povzroča trajno spinsko dinamiko. Podobno sliko lahko dobimo tudi tako, da na trikotni mreži spinov dodamo neko naključnost v velikost izmenjalne interakcije, J [3]. V realnih sistemih največkrat pride do take naključnosti kot posledica strukturnega nerada.

Pri feromagnetnih interakcijah spinov na trikotni mreži, geometrijskega vira frustracije ni in sistem tako nima naravne težnje, da bi vzpostavil stanje kvantne spinske tekočine. Kaj pa se zgodi, če v tak sistem vnesemo strukturni nered, ki vodi do določene mere naključnosti v izmenjalni interakciji? Zanimiv primer takega sistema je spojina $\text{Cr}_3\text{Se}_2\text{Br}_4$, kjer ioni kroma tvorijo ravnine s trikotno mrežo [4]. Krom je v stanju mešane valence Cr^{3+} in Cr^{2+} , kar pomeni tudi, da je spinsko stanje mešanica spinov $S = 3/2$ in $S = 2$ v razmerju 2:1. Selen in brom v strukturi zavzemata isto kristalografsko mesto naključno, kar vnaša v sistem strukturni nered. Skupaj z mešanim stanjem spinov to pomeni določeno mero naključnosti v izmenjalni interakciji. Magnetizacijske meritve kažejo na magnetni red, ki se vzpostavi pod temperaturo 7 K, hkrati pa namigujejo na to, da je povprečna izmenjalna interakcija med spini vsaj 50 K. To kaže na znatno mero frustracije v spinskem sistemu, ki preprečuje magnetno urejanje pri višjih temperaturah. Meritve nevtronskega sipanja in mionske spinske spektroskopije kažejo na prisotnost internih polj s široko porazdelitvijo, ki ustrezajo feromagnetnemu redu kratkega dosega. Frustracija zaradi naključnosti v izmenjalni interakciji tako prepreči magnetno urejanje pri višjih temperaturah in magnetni red dolgega dosega [4].

[1] P.W. Anderson, Mater. Res. Bull. 8, 153 (1973).

[2] Balents, L., Nature 464, 199–208 (2010).

[3] K. Watanabe et al., Journal of the Physical Society of Japan 83, 034714 (2014).

[4] T. Knaflič et al., v pripravi.

Simulacije molekulske dinamike fluoriranega etanola

Katarina Kokalj^{1,2,3}, Matija Tomšič³ in Andrej Jamnik³

1. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

3. Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, UL, Ljubljana

Fluorirani alkoholi spadajo med per- in polifluorirane spojine (PFAS), ki imajo na alkilni verigi vezanih več atomov fluora [1]. Ker je vez med fluorom in ogljikom ena izmed najmočnejših enojnih vezi v organski kemiji, so te spojine termično in kemijsko bolj stabilne od njihovih hidrogeniranih analogov [2]. Zaradi tega so se PFAS spojine včasih množično uporabljale, ne dolgo nazaj pa smo spoznali, da so škodljive tako za okolje kot tudi za zdravje ljudi. Dandanes ta skupina spojin predstavlja enega izmed obstojnih onesnaževal, zaradi njihovih edinstvenih kemijskih in fizikalnih lastnosti pa je sanacija PFAS spojin postavljena pred številne izzive [2, 3]. Poznavanje in razumevanje njihovih lastnosti je pri obravnavi te tematike zato ključno, pri tem pa so nam v izjemno pomoč simulacije molekulske dinamike (MD), saj omogočajo natančno modeliranje in preučevanje molekularnih sistemov na atomskem nivoju skozi izbrano časovno obdobje.

Simulacije MD smo izvedli na sistemu tekočega 2,2,2-trifluoroetanolu, naš cilj pa je bil ugotoviti, kako se različna polja sil obnašajo pri opisovanju lastnosti PFAS spojin. V ta namen smo obravnavali šest različnih polj sil: TRAPPE, GROMOS-UA, GROMOS-AA, CHARMM, AMBER in OPLS. Njihovo ustreznost pri napovedovanju strukturnih in dinamičnih lastnosti smo ovrednotili s pomočjo primerjave rezultatov izračunanega rentgenskega sipanja modelnih sistemov z eksperimentalnimi podatki, literaturne konformacijske analize in nekaterih termodinamskih količin.

[1] OECD (2021), Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance, OECD Series on Risk Management, No. 61, OECD Publishing, Paris.

[2] Kirsch, Peer: *Modern fluoroorganic chemistry: synthesis, reactivity, applications*. Wiley-VCH, 2004.

[3] S. C. E. Leung, D. Wanninayake, D. Chen, N.-T. Nguyen, Q. Li: Physicochemical properties and interactions of perfluoroalkyl substances (PFAS) - Challenges and opportunities in sensing and remediation. *Sci. Total Environ.* **2023**, 905, 166764.

CeFe₉Si₄: Magnetizem v kovinski spojini z atomi prehodnih elementov in redkih zemelj

P. Koželj^{1,2}, S. Vrtnik^{1,2}, J. Boutbien³, J. Luzar¹, A. Jelen¹, S. Semsari Parapari¹,
P. Boulet³, M.-C. de Weerd³, G. Lengaigne³, M. Wencka⁴, V. Fournée³, J. Ledieu³,
S. Šturm¹, J. Dolinšek^{1,2}

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

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

3. Institut Jean Lamour, Université de Lorraine, Nancy, Francija

4. Institute of Molecular Physics, Polish Academy of Sciences, Poznan, Poljska

Raziskave spojine CeNi₉Si₄ poročajo o odkritju zanimivega primera stanja Kondove mreže, saj so magnetni momenti nikljevih atomov enaki nič in je tako magnetna mreža sestavljena zgolj iz zelo majhnega atomskega deleža cerijevih atomov [1]. Ta prispevek bo predstavil rezultate raziskav magnetnih lastnosti spojine CeFe₉Si₄, ki je po sami strukturi enaka CeNi₉Si₄, nikljevi atomi pa so zamenjani z atomi železa.

Kristalna struktura našega vzorca CeFe₉Si₄, ki je bil sintetiziran s taljenjem z obločnim plamenom in naknadnim termičnim popuščanjem, se ujema s strukturo iz prejšnjih poročil [2]. V vzorcu prisotna paramagnetna nečistoča CeFe₂Si₂ je neproblematična za analizo magnetnih lastnosti, prisotnost vključkov feromagnetne nečistoče Fe₃Si pa je bilo potrebno upoštevati med analizo rezultatov.

Magnetne lastnosti kovinske spojine smo raziskovali preko direktnih meritev magnetnih lastnosti, preko meritev specifične toplote in meritev magnetoupornosti. Spojina CeFe₉Si₄ je kovina in feromagnet z Curiejeve temperaturo ≈ 94 K. Za dober opis magnetizma CeFe₉Si₄ je potrebno upoštevati prisotnosti lokaliziranih magnetnih momentov cerijevih atomov in itinerantnih momentov zaradi železovih atomov, samo feromagnetno ureditev pa je možno predvideti na podlagi izmenjalne interakcije med atomi Fe in Ce. Ob analizi meritev temperaturne odvisnosti specifične toplote pri različnih magnetnih poljih ter magnetoupornosti v odvisnosti temperature je znotraj feromagnetne faze možno opaziti širok vrh, za katerega domnevamo, da je posledica magnetoelastičnih efektov.

[1] H. Michor, *et al.* Phys. Rev. B **67**, 224428 (2003).

[2] D. Berthebaud, *et al.* J. Alloys Compd. **442**, 104–107 (2007).

[3] P. Koželj, *et al.* Inorg. Chem. **62**, 6169–6180 (2023).

Meritev razvejitenega razmerja razpada $D^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$ z detektorjem Belle in Belle II

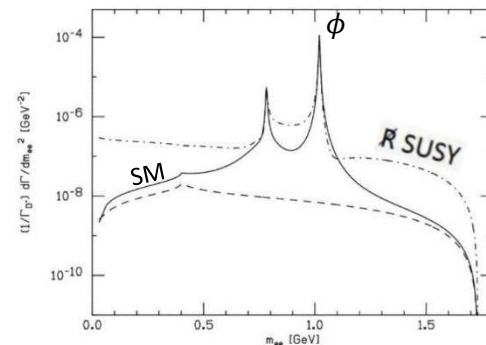
Andrej Lozar¹, Rok Pestotnik^{1,2}, Luka Šantelj^{1,2}, Peter Križan^{1,2}

1. Odsek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Fizika osnovnih delcev je široko področje fizike, ki preučuje naravo osnovnih gradnikov snovi in njihovih interakcij. Za najbolj popolno teorijo za opis teh procesov velja *Standardni model* (SM), saj se napovedi modela zelo dobro ujemajo z dosedanjimi eksperimenti. Kljub temu pa SM ne pojasni nekaterih pojavov kot so asimetrija med snovjo in anti-snovjo, masa nevtrinov, temna snov, ... Te pojave želimo razložiti s *fiziko izven standardnega modela* oz. z modeli *nove fizike* (NF). Pri eksperimentih na trkalnikih delcev se za iskanje signalov NF uporabljata dva komplementarna pristopa: t.i. energijsko obzorje (trki pri zelo visokih energijah) in t.i. obzorje natančnosti (natančne meritve procesov pri nižjih energijah). Iskanje redkega razpada $D^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$ spada v slednji pristop, kjer bi morebitna odstopanja od napovedi SM lahko nakazovala na obstoj NF.

Tri-delčni razpad $D^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$ je v SM zaradi mehanizma Glashow-Iliopoulos-Maiani (GIM) močno potlačen in je mogoč le v višjih redih. Napoved razvejitenega razmerja (BR) je reda $O(10^{-8})$ [1], kar ponuja priložnost za iskanje NF, saj nekateri modeli NF napovejo BR vse do $O(10^{-5})$ [2]. Težavo pa predstavljajo prispevki močne interakcije, ki potekajo preko vmesnih vektorskih resonanc $D^+ \rightarrow \pi^+ V, V \rightarrow e^+ e^-$, saj je njihovo razvejitveno razmerje po SM reda $O(10^{-6})$ in zakrijejo iskani redek razpad. Vplivu resonančnih procesov se je mogoče delno izogniti z opazovanjem faznega prostora invariantne mase para elektrona-pozitron stran od resonanc, kjer lahko pričakujemo prispevke NF (slika 1).



Slika 1: Diferencialno razvejitveno razmerje [3].

Izbrani razpad je že bil iskan izven območja resonanc pri eksperimentu Babar, kjer signalnih dogodkov niso opazili, in so zato postavili zgornjo mejo na BR pri $1,1 \cdot 10^{-6}$ [2]. Z novo meritvijo na skupnih podatkih eksperimentov Belle II in njegovega predhodnika Belle, pa pričakujemo boljšo občutljivost, ki bo omogočila detekcijo prispevkov nižjih od 10^{-6} . Eksperiment Belle II se nahaja na asimetričnem trkalniku elektronov in pozitronov SuperKEKB, ki je zasnovan za raziskovanje fizike mezonov B in D, ter leptona τ [4]. V prispevku bom predstavil razvoj metod za omenjeno meritev in prve rezultate na simulacijah.

[1] S. Fajfer, “Theory of rare charm decays”, [arXiv:1311.6314](https://arxiv.org/abs/1311.6314)

[2] J. P. Lees et al., Phys. Rev. D, vol. 84, no. 7, 2011, [10.1103/PhysRevD.84.072006](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.84.072006)

[3] G. Burdman et al., Phys. Rev. D, vol. 66, no. 1, 2002, [10.1103/PhysRevD.66.014009](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.66.014009)

[4] E. Kou et al, “The Belle II Physics Book”, [10.1093/ptep/ptz106](https://doi.org/10.1093/ptep/ptz106)

Edinstvena kombinacija mikroskopije s strukturirano osvetlitvijo, projekcijskim in fazno-kontrastnim slikanjem

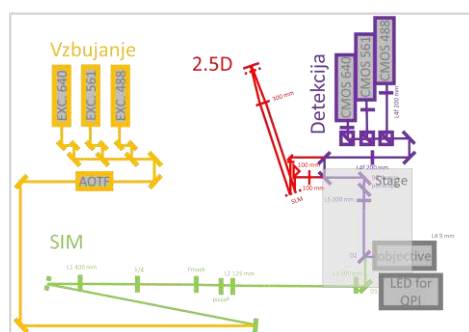
Cody Tripp¹, David Kopitar¹, Luka Šalamun¹ in Boštjan Kokot^{1,2}

1. Odsek za fiziko trdne snovi, Laboratorij za biofiziko, IJS, Ljubljana

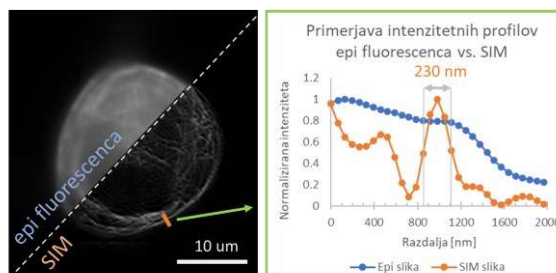
2. Center za napredne optične mikroskopije, IJS, Ljubljana

Dobra ponovljivost in zanesljivost raziskav v biologiji zahteva veliko število tehničnih in bioloških ponovitev za doseganje dovolj šne statistike [1]. Pri odkrivanju zgodnjih molekularnih dogodkov in povezav med njimi to terja zajem množice mikroskopskih slik [2], zato je potreba po hitrih, avtomatiziranih mikroskopijah s širokim vidnim poljem čedalje večja. Za identifikacijo in študijo celičnih dogodkov je pogosto dovolj že konfokalna ločljivost mikroskopa (200 nm) [3], ki pa jo v običajnih izvedbah dosežemo šele pri relativno majhnih vidnih poljih (80 μm), zaradi česar lahko spremljamo le nekaj celic naenkrat.

To težavo smo rešili z implementacijo mikroskopije s strukturirano osvetlitvijo (Structured Illumination Microscopy – SIM) v kombinaciji z zračnim objektivom z 20x povečavo, s katero smo dosegli 8x hitrejši zajem (20 s) 280 μm velikega vidnega polja pri 1.75x boljši resoluciji (230 nm) kot pri vrstičnem konfokalnem mikroskopu z istim objektivom (160 s zajema, 400 nm resolucija). Da bi razširili dostopen nabor časovnih in krajevnih skal, smo v optični sistem vključili še dve dodatni tehniki: 1) projekcijsko (2.5D) slikanje, ki 10x pohitri zajem volumetrične informacije (projekcije celotnega volumna) iz do 13 μm debelega vzorca, in 2) kvantitativno slikanje s faznim kontrastom (Quantitative Phase Imaging – QPI), s katerim pridobimo dejanske vrednosti lomnih količnikov v vzorcu z blagim osvetljevanjem brez dodanih fluorescenčnih barvil. Prednost celotnega mikroskopa (Slika 1) pa ni samo v hitrem zajemu slik, ampak v popolnoma avtomatiziranem preklapljanju med tehnikami, kar omogoča uporabniški vmesnik, ki smo razvili na osnovi odprto dostopne kode ImSwitch [4]. Novo razviti multi-modalni mikroskop bo tako omogočal najnaprednejše raziskave na področju identifikacije zgodnjih celičnih dogodkov, ki so ključnega pomena za bolj zanesljivo razumevanje bolezni [2].



Slika 1: Skica multi-modalnega sistema.



Slika 2: Izboljšava ločljivosti in rezinjenja pri posnetkih zajetih s strukturirano osvetlitvijo (SIM).

[1] S. J. Lord, in ostali *Journal of Cell Biology* **219**, e202001064 (2020)

[2] H. Kokot in ostali, *Adv. Mat.* **32**, 2003913 (2020)

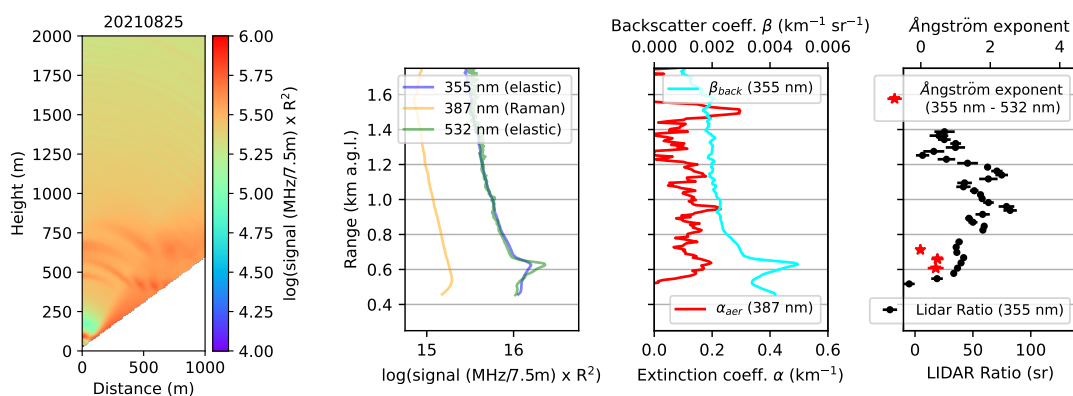
[3] L. M. Brown in ostali, *Nat Commun* **15**, 8218 (2024)

[4] X. C. Moreno in ostali, *Journal of Open Source Software*, **6**, 3394 (2021)

Meritve lastnosti saharškega prahu s prototipom Ramanskega lidarja nad observatorijem CTAO-North

Darko Kolar za skupino CTAO-North Raman Lidar Pathfinder
Center za astrofiziko in kozmologijo, Univerza v Novi Gorici, Nova Gorica

Observatorij Polje teleskopov Čerenkova (CTAO) za opazovanje vesolja s kozmičnimi fotoni visokih energij (VHE) je v fazi izgradnje, sestavljalo pa ga bo več kot 70 teleskopov za zaznavanje bliskov Čerenkove svetlobe v atmosferi (IACT). Nameščeni bodo na območju Observatorija Roque de Los Muchachos (ORM), La Palma, Španija (CTAO North) in Evropskega Južnega Observatorija (ESO), Cerro Paranal, Čile (CTAO South). S slikanjem bliskov Čerenkove svetlobe, vzbujene s plazovi sekundarnih delcev, ki nastanejo pri interakcijah vpadnih fotonov z atomskimi jedri atmosferskih plinov, IACT posredno merijo njihove lastnosti v energijskem območju od nekaj 10 do nekaj 100 GeV. V primerjavi z obstoječimi eksperimenti bo CTAO zaradi svoje velikosti imel za en velikostni razred boljšo občutljivost za detekcijo v energijskem območju 20 GeV – 300 TeV. Boljši bosta tudi energijska in kotna ločljivost, sistematske napake pa bodo bistveno manjše. Za doseganje zastavljenih performansov observatorija je ključnega pomena natančno spremljanje atmosferskih pogojev, še posebej propustnosti atmosfere za Čerenkovo svetlobo, kar je mogoče le z daljinskim zaznavanjem - z uporabo posebej v ta namen zasnovanega lidarskega sistema. Barcelona Raman LIDAR (BRL) je uradni prototip Ramanskega lidarja za observatorij CTAO-North, ki smo ga med letoma 2021 in 2022 preizkušali na območju ORM in poleg načrtovanih raziskav imeli priložnost izmeriti tudi lastnosti saharškega prahu, ki so ga v zadnjih dveh tednih avgusta 2021 nad observatorij prinesli pasatni vetrovi.



Slika 1: Stanje atmosfere nad ORM 25. 8. 2021. **Od leve proti desni:** Neenakomerna porazdelitev aerosolov pri nižjih višinah se porazgubi v čisto atmosfero; Povratno sipanje v elastičnih (355 nm - modra, 532 nm – zelena) in Ramanskem kanalu (387 nm – oranžna); Koefficient povratnega sipanja (modra) pri 355 nm in ekstinkcijski koefficient (rdeča) na podlagi Ramanskega signala pri 387 nm; Profil Ångströmovega eksponenta (355 nm – 532 nm, rdeče zvezde) in vrednosti lidarskega razmerja za kanal pri 355 nm (črni krogi). Iz povprečnih vrednosti Ångströmovega eksponenta in lidarskega razmerja lahko sklepamo, da so v oračju prisotni veliki delci nepravilnih oblik.

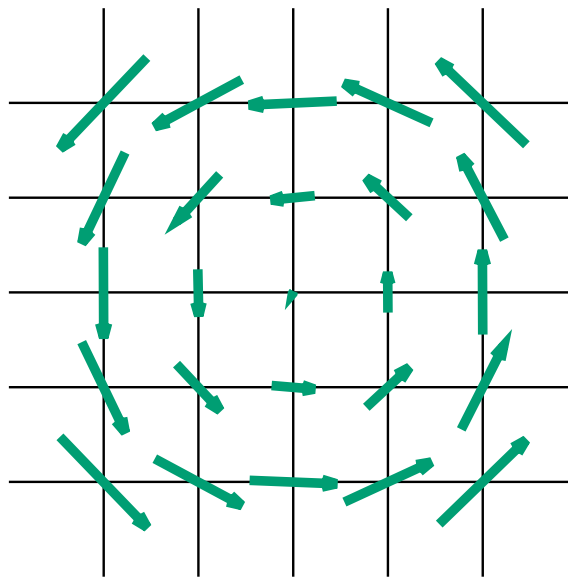
Kvantno računanje in magnetni skyrmioni

Matej Komelj

Institut Jožef Stefan, Jamova 30, SI-1000 Ljubljana, Slovenia

Magnetni skyrmioni so topološko zaščiteni vrtničasti vzorci namagnetosti, ki se pod posebnimi pogoji lahko pojavijo v sistemih brez centra inverzije. Potencialno bi lahko bili uporabni kot nosilci klasične (biti) ali kvantne (kubiti) informacije [1]. Njihov obstoj na makroskopskem nivoju je pojav pri končnih temperaturah, teorija pa predvideva skyrmione na nanometerski skali pri $T = 0$ [2].

Ustrezno fazo lahko opiše dvorazsežni Heisenbergov model z interakcijo Dzyaloshinskii-Moriya v zunanjem magnetnem polju. Primerna metoda za iskanje osnovnega stanja tega Hamiltoniana je kvantni algoritem VQE (*Variational Quantum Eigensolver*) [3]. Na ta način smo raziskali fazni diagram v odvisnosti od modelskih parametrov. Čeprav je bila mreža zaradi premajhnega števila delovnih kubitov premajhna za simulacijo celotnega skyrmiona, rezultati jasno kažejo na ustrezen fazni prehod.



Slika 1: Skyrmionu podobna magnetna struktura, simulirana s kvantnim algoritmom VQE na Heisenbergovi mreži velikosti 5×5 .

[1] C. Psaroudaki and C. Panagopoulos, Phys. Rev. Lett. **127** (2021) 067201.

[2] A. Haller, S. Groenedijk, A. Habibi, A. Michels and T. Schmidt, Phys. Rev. Research **4** (2022), 043223.

[3] A. Peruzzo, J. McClean, P. Shadbolt, M.H. Yung, X.Q. Zhou, P. J. Love, A. Aspuru-Guzik and J. L. O'Brien, Nat. Commun. **5** (2014) 4213.

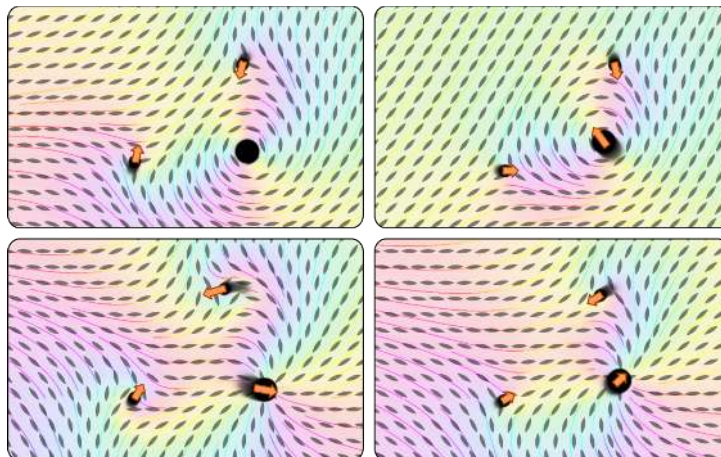
Neravnovesna topološka mehka snov

Žiga Kos^{1,2}

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

2. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

Mehka snov je pogosto izrazito izven ravnovesja, kot na primer v bakterijskih kolonijah ali v gnanih tekočih kristalih. V takšnih sistemih je ključna sklopitev med materialnim tokom in strukturo tekočine, predvsem v tekočinah z orientacijskim redom gradnikov pa se struktura kaže v obliki in dinamiki topoloških defektov. Pokazal bom izbrane rezultate iz dinamike neravnovesnih sistemov z nematsko ureditvijo: analitske rešitve elastičnih sil na defekte v dveh dimenzijah [1], plavanje mikroplavalcev [2], lastnosti aktivne turbulence v treh dimenzijah [3] ter kontrolo stanj v nematski mikrofluidiki.



Slika 1: Primer sil v sistemu 3 defektov v dveh dimenzijah [1].

[1] S. Čopar in Ž. Kos, Many-defect solutions in planar nematics: interactions, spiral textures and boundary conditions, *Soft Matter* **20**, 6894, 2024

[2] S. J. Kim, Ž. Kos, E. Um, J. Jeong, Symmetrically pulsating bubbles swim in an anisotropic fluid by nematodynamics, *Nat. Commun.* **15**, 1220, 2024

[3] N. Kralj, M. Ravnik, Ž. Kos, Chirality, anisotropic viscosity and elastic anisotropy in three-dimensional active nematic turbulence, *Commun. Phys.* **7**, 222, 2024

dE-E detektor za HISPEC-10 eksperiment

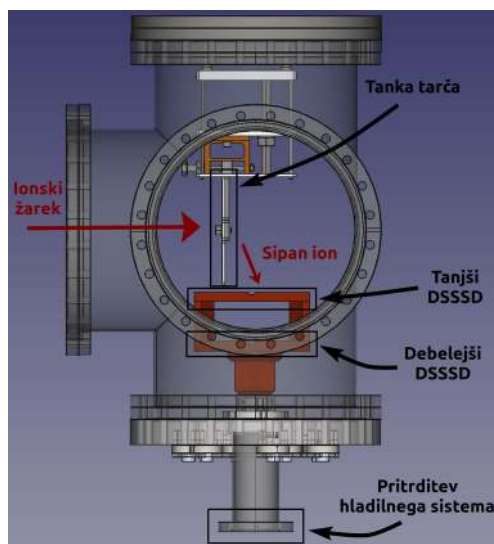
Gregor Košir^{1,2}, Klemen Žagar¹, Matevž Skobe¹, Jelena Vesić¹ in Matjaž Vencelj¹

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

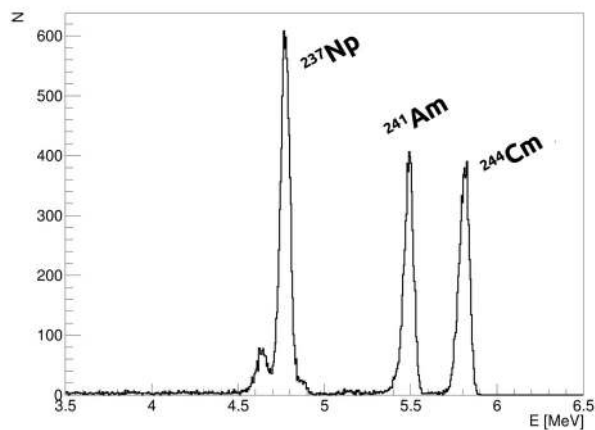
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

V Evropskem centru za raziskave z antiprotoni in ioni FAIR (angl. *Facility for Antiproton and Ion Research*) [1] poteka izdelava pospeševalnika z najmočnejšim ločevalnikom eksotičnih ionov Super-FRS (angl. *Superconducting Fragment Separator*), ki bo omogočal zanesljivejše študije redkih izotopov. V okviru eksperimenta HISPEC-10 (angl. *High-resolution In-flight SPECTroscopy 10*) bomo nastale izotope upočasnili za učinkovitejše preučevanje visoko vzbujenih stanj.

Produktivno izvedbo eksperimenta otežujeta vnos neželenih izotopov med upočasnjevanjem žarka in Dopplerjev premik merjenih žarkov gama, ki nastanejo ob razpadih vzbujenih stanj pred ustavitvijo iona [2,3]. Rešitev obeh izzivov je uporaba dveh segmentiranih silicijevih detektorjev dE-E vrste DSSSD (angl. *Double-Sided Silicon Strip Detector*), v kombinaciji s sistemom za meritev hitrosti ionov. Za enolično identifikacijo poljubnega jedra potrebujemo njegovo maso in število protonov (oz. naboj), ki ju pridobimo iz meritve celotne kinetične energije, hitrosti in energijske izgube (dE/dx). Za eksperiment HISPEC-10 razvijamo detektorski sistem dE-E za identifikacijo težkih upočasnjenih ionov, ki je sestavljen iz dveh silicijevih detektorjev DSSSD debeline 20 μm in 300 μm . Pri tem s tanjšim detektorjem izmerimo energijske izgube dE in z debelejšim preostalo kinetično energijo E.



Slika 1: Testna detektorska postavitvena na žarkovni liniji, namenjena vrednotenju izvedljivosti eksperimenta HISPEC-10.



Slika 2: Spekter izmerjenih energij delcev alfa označenih izotopov, pridobljen med testiranjem in konstruiranjem detektorske elektronike.

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

[2] Z. Podolyák, From RISING to HISPEC/DESPEC, Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B 266, 4589 (2008). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.05.106>.

[3] F. Naqvi et al, *Development of slowed down beams at the fragment separator for FAIR*, Acta Phys. Pol. B 42, 725 (2011). DOI: <http://dx.doi.org/10.5506/AphysPolB.42.725>.

Optična manipulacija bipolaronov v sistemu z nelinearno elektron-fononsko sklopitvijo

K. Kovač¹, D. Golež^{1,2}, M. Mierzejewski³, J. Bonča^{1,2}

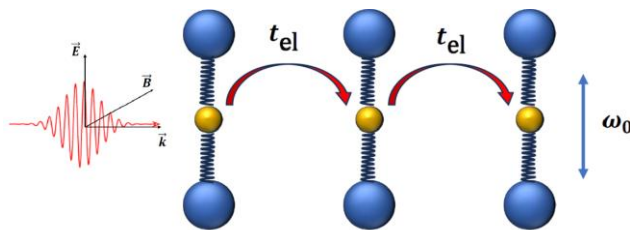
¹Inštitut Jožef Štefan, 1000 Ljubljana, Slovenija

²Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, 1000 Ljubljana, Slovenija

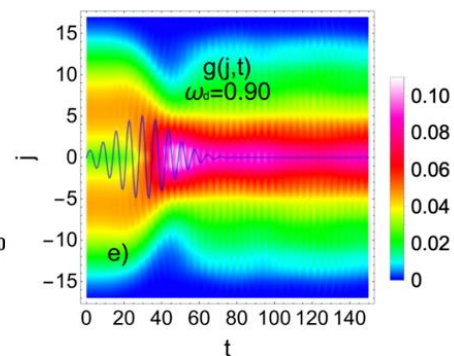
³Department of Theoretical Physics, Faculty of Fundamental Problems of Technology, Wrocław University of Science and Technology, 50-370 Wrocław, Poland

Raziskave na področju vzbujenih kvantnih materialov so v ospredju sodobne fizike trdne snovi. Razvoj novih laserskih virov je omogočil novo poglavje na tem področju, s selektivnim vzbujanjem kolektivnih prostostnih stopenj lahko ustvarimo oziroma dostopamo do novih stanj snovi [1,2,3].

Naše delo [4] se osredotoča na časovno evolucijo sistema dveh elektronov, nelinearno sklopljenih z mrežnimi deformacijami in posredno vzbujenih z zunanjim laserskim pulzom, ki se direktno skloplja z dipolno aktivnimi nihajnimi načini mreže. Elektronska vezava se lahko dramatično ojača ali oslabi, odvisno od protokola vzbujanja. To lahko vodi v dolgoživo (metastabilno) stanje, v katerem elektronska vezava (odboj) ostane povečana tudi po izklopu pulza. Do vezave pride le pri negativnih vrednostih nelinearne elektron-fononske sklopitve, kar je v nasprotju s prej znanimi napovedmi, ki so napovedovale vezavo neodvisno od predznaka sklopitve. Izkazuje se, da metastabilno stanje počasi razpada, v kolikor vpeljemo v model fononsko disperzijo, vendar pa ostane dvojna zasedenost povišana v primerjavi z njeno vrednostjo pred impulzom.



Slika 1: Vizualizacija modela



Slika 2: Odziv sistema na motnjo

[1] D. N. Basov, R. D. Averitt, D. Hsieh, Nat. Mat. **16**, 1077 (2017)

[2] C. Giannetti, M. Capone, D. Fausti, M. Fabrizio, F. Parmigiani, D. Mihailovic, Adv. Phys **65**, 58 (2016)

[3] A. de la Torre, D. M. Kennes, M. Claassen, S. Gerber, J. W. McIver, M. A. Sentef, Rev. Mod. Phys. **93**, 041002 (2021)

[4] K. Kovač, D. Golež, M. Mierzejewski, J. Bonča, Phys. Rev. Lett. **132**, 106001 (2024)

Vrednotenje mikrocirkulacije s pomočjo valčne analize: vpliv robnih efektov

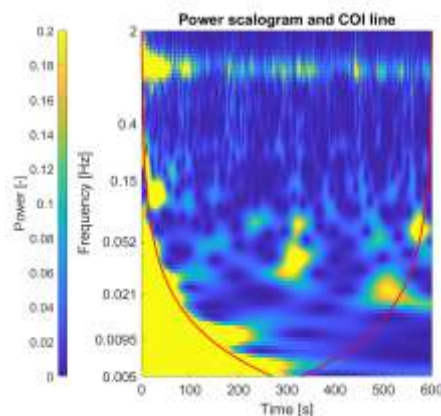
Lana Kralj¹ in Helena Lenasi¹

1. Medicinska fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana

Fizikalno in biološko ozadje signalov, izmerjenih z lasersko Dopplersko (LD) metodo, ki se uporablja za oceno pretokov v mikrocirkulaciji, je kompleksno. Zato se za natančnejšo oceno LD signalov lahko uporabi valčno analizo, ki izmerjeni signal razdeli na šest frekvenčnih intervalov, ki segajo od 0.005 do 2 Hz. Vsak arbitrarno določeni interval je povezan z določenim fiziološkim vplivom, ki uravnava mikrocirkulatorno dinamiko [1]. Ker imajo LD signali končno dolžino, so rezultati valčne analize podvrženi robnim efektom. Stožec vpliva (angl. *cone of influence*, COI), definiran kot čas, v katerem se avtokorelacija pri vsakem skalnem nivoju zmanjša na $1/e$ svoje začetne vrednosti, označuje območja, kjer ti efekti postanejo pomembni [2].

Cilj študije je bil ovrednotiti vpliv robnih efektov na rezultate valčne analize kompleksnih mikrocirkulatornih LD signalov. Signale smo merili pri osemnajstih zdravih prostovoljcih ter primerjali valčne spektre, izračunane brez in s korekcijo robnih efektov. Kodo za valčno analizo in izračun robnih efektov smo razvili v programskem okolju Matlab.

Naši rezultati so pokazali, da je upoštevanje robnih efektov zaželeno, zlasti pri analizi nizkofrekvenčnih intervalov, katerih dejanski vpliv je težko oceniti v praksi. Neupoštevanje le-teh lahko pripelje do netočnih rezultatov valčne analize in posledično do napačnih sklepov o vplivih fizioloških dejavnikov na uravnavanje mikrocirkulacije.



Slika 1: Valčni skalogram in področje robnih efektov (angl. *cone of influence*, COI).

[1] Kralj, L., & Lenasi, H. (2023). Wavelet analysis of laser Doppler microcirculatory signals: Current applications and limitations. *Frontiers in Physiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1076445>

[2] Chen, X., Gupta, R. S., & Gupta, L. (2023). Exploiting the Cone of Influence for Improving the Performance of Wavelet Transform-Based Models for ERP/EEG Classification. *Brain Sciences*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/brainsci13010021>

Obdelava kvantno izmenjanega ključa

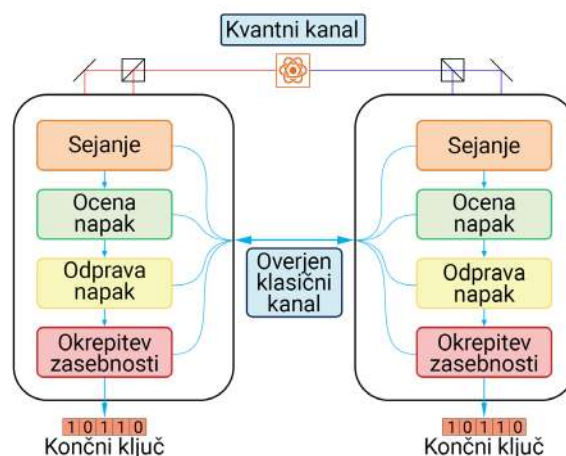
Peter Lekše^{1,2}, Gaja Šalamun^{1,2}, Izidor Benedičič¹, Lara Ulčakar^{2,4}, Žiga Pušavec², Roman Novak³, Rok Žitko^{2,4}, Peter Jeglič¹

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

Z razvojem kvantnih računalnikov grozi zastarelost nekaterim trenutno najbolj uporabljanim klasičnim kriptografskim protokolom, ki temeljijo na računski zahtevnosti faktorizacije velikih števil in diskretnih logaritmov, saj bodo kvantni računalniki prav te računske naloge izvajali z lahkoto [1]. Zato se v zadnjem času razvijajo nove kriptografske rešitve, ki bodo odporne na napade s kvantnim računalnikom.

Protokol BBM92 [2] nam na osnovi zakonov kvantne mehanike zagotavlja [3] varno izmenjavo naključnega kriptografskega ključa, tudi če ima prisluškovalec neomejene računske sposobnosti in ni omejen s časom. Prvi korak je izmenjava prepletenih fotonov preko optičnega vlakna ali praznega prostora ter meritve v naključnih bazah. Sledi naknadna obdelava prejetih signalov, med katero poteka komunikacija preko overjenega klasičnega kanala. Sestavljena je iz sejanja surovega ključa glede na izbrane baze, ocenjevanja količine napak, odpravljanja napak in okrepitev zasebnosti. Če kdo prisluškuje povezavi, to neizbežno opazimo na številu napak in prekinemo izmenjavo ključa. Če pa je izvedba protokola uspešna, na obeh straneh dobimo enak, popolnoma naključen končni ključ. Preko klasičnega kanala ne pošiljamo informacij, ki bi lahko razkrile ključ.

V Laboratoriju za kvantno prepletenost na IJS smo sestavili izvor prepletenih fotonov in dve analizni postaji ter z implementacijo protokola BBM92 znotraj laboratorija proizvedli kriptografski ključ. Sedaj v sodelovanju z Laboratorijem za kvantno optiko na FMF pripravljamo implementacijo protokola med dvema lokacijama.



Slika 1: Shema naknadne obdelave izmenjanih fotonov (povzeto iz [4]).

[1] Shor, Peter W. *Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer*, SIAM Journal on Computing **26**, 1484 (1997).

[2] C. Bennett, G. Brassard, and N. Mermin. *Quantum Cryptography Without Bell's Theorem*, Physical Review **68**, 557 (1992).

[3] Tomamichel, M., & Leverrier, A. *A largely self-contained and complete security proof for quantum key distribution*, Quantum **1**, 14 (2017).

[4] Luo, Y., Cheng, X., Mao, H.-K., Li, Q. *An Overview of Postprocessing in Quantum Key Distribution*. Mathematics **12**, 2243 (2024).

Vbrizgavanje naboja v nanocevko MoS₂

Matjaž Malok^{1,2}, Janez Jelenc¹, Rupert Schreiner³, Andreas K. Hüttel⁴, Luka Pirker^{1,5}
in Maja Remškar¹

1 Oddelek za fiziko trdne snovi, Institut Jožef Stefan, Ljubljana

2 Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana

3 Faculty of Applied Natural Sciences and Cultural Studies, OTH Regensburg, Regensburg

4 Institute for Experimental and Applied Physics, University of Regensburg, Regensburg

5 Department of Electrochemical Materials, J. Heyrovsky Institute of Physical Chemistry, Praga

Molibdenov disulfid (MoS₂) spada med plastne kristale in ima obetavne elektronske in kvantne lastnosti, ki so pomembne za naslednjo generacijo visoko zmogljivih računalniških naprav nizke moči. Nanocevke MoS₂ sintetizirane s kemijsko transportno reakcijo vedno rastejo v kiralnem načinu in so znane po visoki strukturni popolnosti [1]. Elektronske lastnosti nanocevk smo preučevali pred in po vbrizgavanju naboja v mikroskopu na atomsko silo (VT-AFM Omicron, Nemčija) pri tlaku 10⁻⁹ mbar. Pri tem je bila uporabljena kombinacija mikroskopije na atomsko silo (AFM), Kelvinove tipalne mikroskopije (KPFM) in vrstične tunelske mikroskopije (STM).

Topografijo in izstopno delo nanocevke smo merili hkrati z nekontaktno mikroskopijo na atomsko silo (nc-AFM) in KPFM [2]. Nanocevko, ki je bila položena na MoS₂ monokristalno podlago, smo najprej poiskali z nc-AFM. Nato smo preklopili v način STM, kjer so se vsiljene oscilacije nosilca ustavile, konica pa se je samodejno približala vzorcu, dokler ni bil vzpostavljen prednastavljen tunelski tok (200 pA). Elektrone in vrzeli smo vbrizgavali 2 min pri napetostih od -2 V do -8 V ter od +2 V do +8 V v korakih po 2 V. Tok 200 pA smo nadzorovali s povratno zanko.

Po vbrizgavanju elektronov se je izstopno delo nanocevke zmanjšalo, po vbrizgavanju vrzeli pa povečalo. Vbrizgan naboj je spremenil tudi obliko nanocevke, ki se je postopoma deformirala iz svoje idealne cilindrične oblike. V skrajnem primeru se je nanocevka sesedla v obliko podobno traku. Poleg radialne deformacije smo opazili tudi spiralno zvijanje deformirane nanocevke. Spremembe v topografiji pojasnjujemo z obratnim piezoelektričnim učinkom, teorijo, predlagano za kiralne nanostrukture [3].

Deformacija nanocevke, ki jo je povzročil vbrizgan naboj, in s tem povezane spremembe izstopnega dela so bile obstojne več dni. Po sploščitvi je nanocevka ostala v sploščenem stanju zaradi plastičnih deformacij in novih vezi med stenama nanocevke. Torzijska komponenta obratnega piezoelektričnega efekta je povzročila vrtenje nanocevke. Ko smo vbrizgavali elektrone, se je nanocevka vrtela v eno smer, po vbrizgavanju vrzeli pa v nasprotno smer.

[1] M. Remškar, A. K. Hüttel, T. V. Shubina, A. Seabaugh, S. Fathipour, R. Lawrowski in R. Schreiner, *Isr. J. Chem.* 61, e202100100 (2021)

[2] M. Remškar, J. Jelenc, N. Czepurnyi, M. Malok, L. Pirker, R. Schreiner in A. K. Hüttel, *Nanoscale Adv.* 6, 4075-4081 (2024)

[3] N. Sai in E. J. Mele, *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.* 68, 1 (2003)

Prepletenostna entropija kvantno kaotičnega mnogodelčnega sistema bozonov z ohranitvijo števila delcev

Gregor Medoš^{1,2}, in Lev Vidmar^{1,2}

1. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Kvantna prepletenost v mnogodelčnih kvantnih sistemih ima pomembno vlogo v neravnovesnih procesih in termalizaciji zaprtih kvantnih sistemov. To so sistemi, ki so popolnoma izolirani od okolice. Zaprt kvantni sistem, ki je na začetku daleč od ravnovesja, termalizira, ko lokalne pričakovane vrednosti dosežejo ravnovesje. To pomeni, da celoten sistem doseže neko temperaturo. V tem procesu prepletenostna entropija igra vlogo termodinamične entropije. Sistemi, ki imajo to lastnost, se imenujejo kvantno kaotični ali kvantno ergodični sistemi. Hipoteza je, da lahko Hamiltonov operator, ki opisuje dinamiko takega sistema, nadomestimo z naključno matriko z enakimi simetrijami. Eden izmed načinov preverjanja kvantnega kaosa je torej primerjati prepletenostno entropijo visoko vzbujenih lastnih stanj s prepletenostno entropijo naključnih stanj, ki jih generiramo z upoštevanjem simetrij sistema. Posebej nas zanima ohranitev števila delcev [1], ki je prisotna v Bose-Hubbardovem modelu, ki je primer kvantnega mnogodelčnega sistema bozonov z lastnostjo kvantnega kaosa v določenem režimu parametrov modela. Porazdelitev prepletenostne entropije za naključna stanja z ohranitvijo števila delcev je t. i. Bianchi-Donova porazdelitev [2, 3], ki se razlikuje od Pageove porazdelitve [4] za naključna stanja brez te omejitve. Primerjamo prepletenostno entropijo visoko vzbujenih lastnih stanj Bose-Hubbardovega modela z Bianchi-Donovo porazdelitvijo. Volumski člen Bianchi-Donove porazdelitve izpeljemo z novim pristopom, ki izhaja iz velekanonične porazdelitve pri neskončni temperaturi.

1. Vidmar, L. & Rigol, M. *Physical review letters* **119**, 220603 (2017).
2. Bianchi, E., Hackl, L., Kieburg, M., Rigol, M. & Vidmar, L. *PRX Quantum* **3**, 030201 (2022).
3. Cheng, Y., Patil, R., Zhang, Y., Rigol, M. & Hackl, L. *arXiv:2310.19862* (2023).
4. Page, D. N. *Physical review letters* **71**, 1291 (1993).

Kolektivna Langevinova dinamika počasnih gibanj v biomolekularnih sistemih

Neli Sedej, Anže Hubman in Franci Merzel

Laboratorij za molekularno strukturno dinamiko, Teoretični odsek
Kemijski Inštitut, Ljubljana

Biomolekularni sistemi izkazujejo vibracijska gibanja z izdatno prisotnostjo stohastičnih komponent. Kot osnovni model za opis takšnih sistemov vzamemo sistem sklopljenih dušenih harmonskih oscilatorjev s šumom, katerega dinamiko opišemo s posplošeno Langevinovo enačbo. Deterministične in stohastični količine v enačbi izpeljemo na podlagi analize navzkrižnih hitrostnih korelacij med gradniki biomolekularnega sistema, ki jih dobimo iz atomističnih simulacij molekularne dinamike. Med gradnike je vključen tudi vodni medij. Prikazani pristop omogoča okvir za opis počasnih sklopljenih gibanj v biomolekularnih sistemih, ki zajemajo časovne in prostorske skale znotraj katerih delujejo tovrstni sistemi, in se spogleduje z napovedovanjem konformacijskih sprememb biomolekul.

Študija kavitacijskih pojavov v interakciji med sferičnim in toroidnim mehurčkom

Jaka Mur^{1,2}, Alexander Bußmann³, Thomas Paula³, Stefan Adami³, Nikolaus Adams³, Rok Petkovšek¹ in Claus-Dieter Ohl²

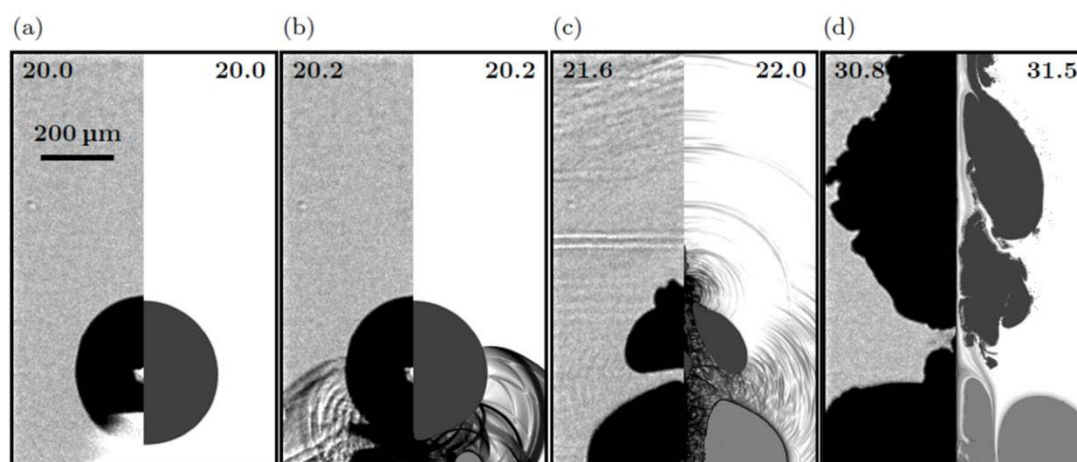
1. FOLAS, Fakulteta za strojništvo, UL, Ljubljana

2. Institute for Physics, Department Soft Matter, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Nemčija

3. Chair of Aerodynamics and Fluid Mechanics, Technical University of Munich, Nemčija

Hitri curki tekočine, ki nastajajo zaradi kavitacijskih mehurčkov, imajo pomembno vlogo v razumevanju in uporabi dinamike kapljev. Nenadzorovani povzročajo poškodbe površin, po drugi strani nadzorovani mikro-curki predstavljajo orodje v medicinski terapiji (injektiranje brez igel, perforacija mehkega tkiva). Mikro-curki nastanejo že z interakcijo kavitacijskega mehurčka z bližnjo površino, kar je dobro raziskano eksperimentalno in numerično, ali npr. zaradi interakcije mehurčka z udarnim valom. Možen je nastanek curkov z nadzvočnimi hitrostmi propagacije, nad 1000 m/s.

Kompleksnost interakcije se bistveno poveča, ko obravnavamo par mehurčkov. V scenariju, ko interagira par sferičnih mehurčkov v nasprotni fazi, se hiter mikro-curek formira zaradi kolapsa enega mehurčka v smeri drugega [1]. V tem delu eksperimentalno in numerično z visoko časovno in prostorsko ločljivostjo obravnavamo interakcijo sferičnega mehurčka s toroidnim mehurčkom, pri čemer je slednji pritrjen na steno in generiran v nasprotni fazi sferičnemu (potek na sliki 1). Intenzivni, fokusirani udarni valovi po nastanku toroidnega mehurčka povzročijo formiranje mikro-curka in sekundarne kavitacije, slednje po odboju udarnega vala od sferičnega mehurčka. Mikro-curek prebode kolapsirajoči sferični mehurček, pri čemer je curek dodatno pospešen zaradi sekundarne kavitacije. Nastajajoči toroidni mehurček odriva sferičnega, ki v območju znižanega tlaka v tekočini doživi izrazito povečano sekundarno oscilacijo. Volumna mehurčkov tekom interakcije ostajata ločena, nasprotno od omenjene interakcije para sferičnim mehurčkov.



Slika 1: Interakcija sferičnega in toroidnega mehurčka v eksperimentu (levi paneli) in simulacijah, ob času a) iniciacije toroidnega mehurčka, b) po 200 ns, c) ob preobodu sferičnega mehurčka s curkom tekočine, in d) ob maksimumu druge oscilacije sferičnega mehurčka. Čas v μ s. Povzeto po [2].

[1] Y. Fan, A. Busmann, F. Reuter, H. Bao, S. Adami, J. M. Gordillo, N. Adams, C.-D. Ohl, *Physical Review Letters* **132** (2024).

[2] J. Mur, A. Bussmann, T. Paula, S. Adami, N. Adams, R. Petkovšek in C.D. Ohl, revised submission in progress, *Ultrasonics Sonochemistry* (2024).

Uporaba optične koherentne tomografije v kombinaciji s hidrogelnimi senzorji za brezkontaktno spremljanje koncentracije glukoze in pH

Mimoza Naseska^{1,2}, Aleš Globočnik¹, Samuel Davies³, Ali K. Yetisen³
in Matjaž Humar^{1,2,4}

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Jadranska ulica 19, 1000 Ljubljana, Slovenija

3. Odsek za kemijsko inženirstvo, Imperial College London, London SW7 2AZ, Združeno Kraljevstvo

4. Center odličnosti nanoznanosti in nanotehnologije, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

Optična koherentna tomografija (OCT) je neinvazivna tehnika za slikanje tkiv, ki ima veliko vdorno globino, vendar majhno kemijsko specifičnostjo. Zaradi možnosti neinvazivnega slikanja, v preteklosti so bile narejene raziskave za brezkontaktno spremljanje koncentracije fiziološko pomembnih parametrov s pomočjo OCT, vendar zaradi omejene kemijske specifičnosti so bili rezultati nedokončni. V naši raziskavi [1] predlagamo uporabo funkcionaliziranih biokompatibilnih hidrogelov za zaznavanje glukoze in pH, ki v kombinaciji z OCT odpirajo možnost za brezkontaktno in kontinuirano spremljanje koncentracije glukoze in raven pH v tkivih.

Hidrogeli so v vodi netopni polimeri, ki imajo sposobnost absorbiranja in zadrževanja vode, hkrati pa ohranjajo svojo strukturo. Z vključitvijo funkcionalnih monomerov v strukturi, hidrokele je mogoče sintetizirati tako, da se odzivajo na prisotnost določenih molekul z reverzibilnimi spremembami volumna. V raziskavi smo uporabili hidrogelne filme občutljive na glukozo in pH, katerih debelina se je spreminjala v odvisnosti od koncentracije glukoze ali raven pH. Raziskali smo lastnosti in predlagali princip delovanja implantabilnega senzorja za spremljanje glukoze v intersticijski tekočini, s katerim bi lahko kontinuirano spremljali koncentracijo glukoze na minimalno invaziven način. Nadalje, prvič smo predlagali uporabo pH-občutljivih filmov v kombinaciji z OCT za brezkontaktno spremljanje stanja rane na koži prekrita s povoji.

Dobljeni rezultati so pokazali, da kombiniranje ustreznih hidrogelnih biosenzorjev z OCT odpira možnost za brezkontaktno in kontinuirano spremljanje tudi drugih fiziološko pomembnih parametrov.

[1] Naseska, Mimoza, et al. "Non-contact monitoring of glucose concentration and pH by integration of wearable and implantable hydrogel sensors with optical coherence tomography." *Optics Express* 32.1 (2023): 92-103.

Dvostopenjska plazemska inaktivacija mikrobnih biofilmov v endoskopskih pripomočkih

Naomi Northage^{1,2}, Stéphane Simon², Vasyl Shvalya¹, Martina Modic¹, Malcolm J. Horsburgh³, in James L. Walsh^{1,4}

1. *Odsek za plinsko elektroniko (F6), IJS, Ljubljana, Slovenia*
2. *Centre for Plasma Microbiology, Department of Electrical Engineering and Electronics, University of Liverpool, Liverpool, UK*
3. *Infection Biology & Microbiomes, Institute of Infection, Veterinary and Ecological Sciences, University of Liverpool, Liverpool L69 7BE, UK*
4. *York Plasma Institute, University of York, York, UK*

Prilagodljivi endoskopi so ključnega pomena v sodobni medicini, vendar njihova zapletena geometrija, zlasti ozke odprtine, stimulira nastajanje mikrobnih biofilmov, kar predstavlja velik izziv za čiščenje in razkuževanje. Tradicionalne metode čiščenja pogosto ne uspejo učinkovito odstraniti nastalih biofilmov, zaradi česar se je pojavila potreba po novih pristopih razkuževanja. Ta študija raziskuje dvostopenjski postopek razkuževanja s hladno atmosfersko plazmo (CAP) in s plazemsko aktivirano vodo (PAW). Pri obeh procesih nastanejo t. i. reaktivne plazemske vrste, ki pri kontaktu z biološkim materialom vodijo do edinstvenih reakcij in interakcij. Kombinirani pristop uporablja različne lastnosti CAP in PAW, s čimer želimo doseči bolj učinkovito in temeljito metodo za dezinfekcijo biofilmov.

V tej študiji smo v pretočnem sistemu, sestavljenih iz 2,0- in 6,0- milimetrskih endoskopskih testnih kosov, razvili biofilme iz klinično pomembnih bakterijskih vrst. Razkuževanje je potekalo 5 in 10 min s kroženjem CAP, PAW in s kombinacijo obeh. CAP je po 10 minutah dosegel zmanjšanje biofilma mešanih vrst za 4,48 log, kar je bilo boljše od 3,54 log pri PAW. Pri kombiniranem pristopu (PAW + CAP) se je zmanjšanje še povečalo na 5,72 logov, kar dokazuje večjo protimikrobno sposobnost kombinirane dostave kratko-živečih in dolgo-živečih reaktivnih vrst, ki jih generira plazma. Analiza površine z mikroskopijo na atomsko silo in rentgensko fotoelektronsko spektroskopijo je pokazala minimalne spremembe v sestavi ali morfologiji površine endoskopskih testnih kosov po več ciklih razkuževanja. Ta študija dokazuje, da je mogoče CAP uporabiti v dvostopenjskem pristopu za učinkovito razkuževanje patogenov, ki jih najdemo pri koloniziranih medicinskih pripomočkih.

Smer in časovna odvisnost potisne sile pri površinski razelektritvi na dielektrični pregradi

Juš Polanšek^{1,2}, Uroš Cvelbar¹

1. *Odsek za plinsko elektroniko F6, IJS, Ljubljana*
2. *Mednarodna podiplomska šola Jožefa Štefana, Ljubljana*

V tej raziskavi preiskujemo, kako se potisna sila, ustvarjena pri površinski razelektritvi na dielektrični pregradi (ang. *Surface Dielectric Barrier Discharge*, SDBD), spreminja s časom, in eksperimentalno določimo smer sile. Za razelektritev na dielektrični pregradi potrebujemo dielektrik, na katerega na vsako stran namestimo po eno elektrodo, ki ju priključimo na visoko električno napetost (nekaj kV). Eno elektrodo izoliramo, druga pa ostane izpostavljena zraku. Močno električno polje okoli izpostavljene elektrode ionizira zrak, kar povzroči nastanek tanke plasti hladne plazme na površini dielektrika. Električno polje pospeši nabite delce v plazmi od izpostavljene elektrode proti izolirani. Pospešeni nabiti delci trčijo z nevtralnimi delci v okoliškem zraku in jim pri tem prenesejo gibalno količino. To povzroči kolektivno premikanje zraka nad površino dielektrika, ki mu rečemo tudi ionski veter. To premikanje zraka inducira silo v nasprotni smeri, imenovano elektrohodinamska (EHD) sila.

Z uporabo analitične tehtnice, natančne do 1 mg, in posebej izdelanega stojala smo izmerili, da je EHD sila, ki nastane zaradi ionskega vetra, usmerjena približno 8° stran od površine dielektrika. Opazili smo tudi, da se sila s časom zmanjšuje, kar pripisujemo segrevanju dielektrika, saj je padec sile večji pri večjih vhodnih močeh, kjer se dielektrik občutno bolj segreje, kar smo izmerili tudi s termovizijsko kamero. Sklepamo, da se sila zmanjša, ker pri višjih temperaturah prenehajo nastajati nekateri ioni, ki so ključnega pomena za nastajanje ionskega vetra. Ti rezultati prispevajo k boljšemu razumevanju ionskega vetra, ustvarjenega s SDBD, kar vodi do optimizacije aplikacij za nadzor zračnega toka in zmanjševanja zračnega upora na letalih.

Ozkopasovni viri prepletenih fotonov

Žiga Pušavec¹, Lara Ulčakar^{1,2}, in Rainer Kaltenbaek^{1,3}

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

2. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana

3. Inštitut za kvantno optiko in kvantne informacije (IQOQI), Dunaj

Učinkovita distribucija prepletenosti na daljših razdaljah bo omogočila vzpostavitev kvantnih omrežij večih oddaljenih kvantnih sistemov (senzorjev, računalnikov). Že obstoječa omrežja optičnih vlaken ponujajo cenovno dostopen komunikacijski kanal, po katerem bi bila prepletenost prenešena preko stanj potujočih fotonov. Glavni izziv takega omrežja je omejen doseg potovanja fotonov. Zaradi absorpcije svetlobe v steklu (okoli 0.2 dB/km pri 1550 nm) lahko fotoni dosežejo razdalje največ nekaj sto kilometrov. V primerjavi s klasičnimi omrežji tu signala ne moremo ponovno direktno ojačati, saj bi to spremenilo kvantno stanje. Možna rešitev je t.i. kvantni repetitor, ki je osnovan na postopku zamenjave kvantne prepletenosti. Komunikacijsko pot razdelimo na več manjših odsekov. Na vsakem vozlišču ustvarimo par prepletenih fotonov, ki ju pošljemo v sosednja odseka. Ko se fotona iz sosednjih vozlišč srečata, lahko na njiju izvedemo zamenjavo prepletenosti, s čimer prepletemo stanji dveh bolj oddaljenih fotonov. Tako lahko v več korakih prepletemo dva poljubno oddaljena sistema.

Pari prepletenih fotonov so ustvarjeni v nelinearnem procesu *spontanega parametričnega deljenja frekvence* (angl. *spontaneous parametric downconversion*, SPDC). Ker gre za naključen proces, ne moremo v naprej vedeti, kdaj bosta fotona nastala in kdaj pripotovala do vozlišč, na katerih bi izvedli zamenjavo prepletenosti. Zato bo potrebno stanja fotonov začasno shraniti v kvantni spomin. Da bo ta proces učinkovit, morajo imeti prepleteni fotoni približno enako spektralno širino, kot jo imajo atomski prehodi v kvantnem spominu. Ti so reda velikosti 10 MHz, medtem ko je tipična spektralna širina fotonov, nastalih v procesu SPDC, reda velikosti 100 GHz.

Na plakatu predstavljamo naše delo na dveh možnih izvori prepletenih fotonov, ki imajo dovolj ozko spektralno širino za sklopitev s kvantnim spominom. Oba sta osnovana na resonatorskem ojačenju procesa SPDC. V tem procesu iz enega fotona nastaneta dva, pri čemer vsak prevzame del energije. Resonator ima vlogo spektralnega filtra procesa. Prvi izvor ima v vsakem od vej Michelsonovega interferometra resonator z enim nelinearnim kristalom. Drugi izvor ima v enem resonatorju dva nelinearna kristala, katerih osi so med seboj pravokotne. Prepletenost v obeh primerih dosežemo tako, da naredimo oba SPDC procesa med seboj neločljiva. Na plakatu predstavljamo zasnovo in trenutno stanje eksperimentov.

Tekoči nevtronski filter za validacijo jedrskih podatkov pri visokih temperaturah

Blaž Levpušček^{1,2}, Vladimir Radulović², Andrej Trkov², Gilles Noguère³,
Olivier Serot³, Christophe Destouches³

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

2. Odsek za reaktorsko fiziko, IJS, Ljubljana

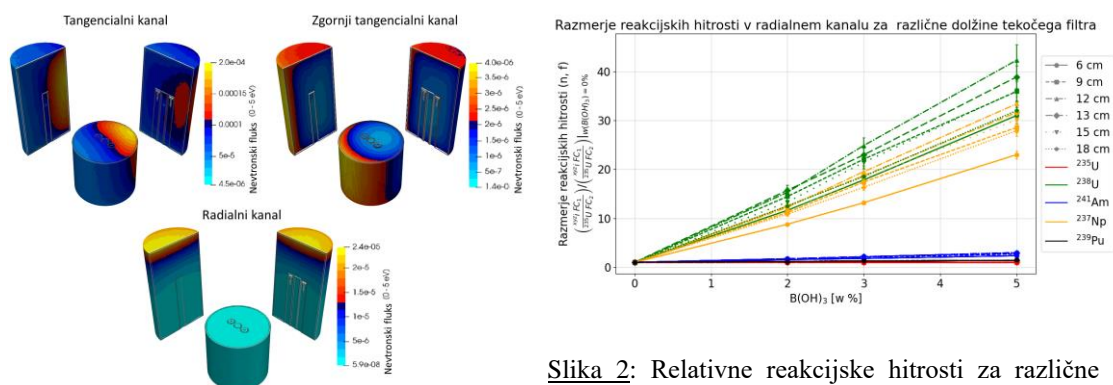
3. CEA, DES, IRESNE, DER, Cadarache, Francija

Tekoči nevtronski filter je eksperimentalna naprava, ki omogoča simulacijo temperaturnega premika termičnega nevtronskega spektra s spreminjanjem koncentracije borove kisline v vodi. Ta pristop predstavlja novost na področju raziskav, saj omogoča doseganje visokih efektivnih temperatur nevtronskega spektra, kar je bilo doslej izziv v eksperimentalnih jedrskih analizah. Naprava omogoča natančne meritve hitrosti cepitvenih reakcij pri različnih efektivnih temperaturah in s tem določanje nevtronskih cepitvenih presekov za izbrane težke aktinide v termičnem območju.

Z uporabo stohastične kode za transport nevtronov MCNP so bili izračunani odzivi različnih fisijskih celic v tekočem nevtronskem filtru v treh različnih obsevalnih kanalih reaktorja TRIGA na IJS. Na sliki 1 so prikazane jakosti termičnih nevtronskih spektrov (0 – 5 eV) v teh kanalih.

Izračunan je bil vpliv dolžine tekočega filtra v radialnem kanalu ter vpliv rotacije naprave v zgornjem tangencialnem kanalu. Cilj optimizacije je bil doseči največjo skladnost med odzivoma v fisijskih celicah in hkrati zagotoviti čim večji premik nevtronskega spektra, kar bi omogočilo najbolj natančne eksperimentalne rezultate.

Ugotovljeno je bilo, da bi najboljšo podobnost nevtronskega fluksa v obeh fisijskih celicah dosegli, če je nevtronski filter v zgornjem tangencialnem kanalu rotiran za 17° proti sredici. Za dolžino filtra v radialnem kanalu se je izkazalo, da je optimalna razdalja med dnem filtra ter fisijskimi celicami 12 cm. Odvisnost reakcijskih hitrosti za različne dolžine filtra v radialnem kanalu je prikazana na sliki 2.



Slika 1: Termični nevtronski spekter v tekočem filtru v različnih obsevalnih kanalih.

Slika 2: Relativne reakcijske hitrosti za različne nuklide v radialnem kanalu pri različnih dolžinah tekočega filtra.

Dvodimenzionalni vzorci nelinearne optične susceptibilnosti v feroelektričnih nematičnih tekočih kristalih

Matija Lovšin^{1,2}, Andrej Petelin², Brecht Berteloot³, Natan Osterman^{1,2}, Satoshi Aya^{4,5}, Mingjun Huang^{4,5}, Irena Drevenšek-Olenik^{1,2}, Richard J. Mandle^{6,7}, Kristiaan Neyts^{3,8}, Alenka Mertelj¹, Nerea Sebastian¹

1. Odsek za kompleksno snov, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

3. Liquid Crystals and Photonics Group, ELIS Department, Ghent University, Gent, Belgija

4. South China Advanced Institute for Soft Matter Science and Technology (AISMST), School of Emergent Soft Matter, South China University of Technology, Guangzhou, Kitajska

5. Guangdong Provincial Key Laboratory of Functional and Intelligent Hybrid Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Kitajska

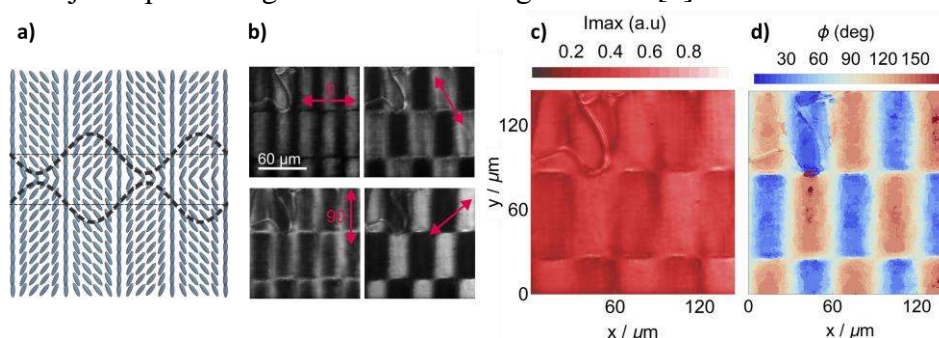
6. School of Physics and Astronomy, University of Leeds, Leeds, Združeno kraljestvo

7. School of Chemistry, University of Leeds, Leeds, Združeno kraljestvo

8. State Key Lab of Advanced Displays and Optoelectronics Technologies, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong

O izrazitih nelinearnih optičnih pojavih v feroelektrični nematični tekočokristalni fazi (N_F) so poročali že ob njenem odkritju leta 2017. Za razliko od običajne nematične faze, ki je sicer orientacijsko urejena, vendar nepolarna, so v N_F fazi dipoli molekul večinsko enako usmerjeni. Posledično, zaradi odsotnosti simetrije inverzije, pri prehodu svetlobe skozi N_F fazo nastane močan frekvenčno podvojen (SHG) signal. Polarizacija frekvenčno podvojene svetlobe je odvisna od smeri spontane električne polarizacije v vzorcu; le-ta pa je odvisna od orientacijske ureditve tekočega kristala.

Prostorsko ureditev N_F faze lahko učinkovito moduliramo z uporabo foto-ureditvenih površinskih slojev [1]. Z njihovo pomočjo smo ustvarili 2D periodične ureditvene vzorce na mikrometrski skali. S kombinacijo polarizacijske optične mikroskopije, SHG mikroskopije in interferometrije ter računalniških simulacij smo pokazali, da v tovrstnih strukturah s spreminjanjem kota polarizacije vpadne svetlobe lahko izberemo, kateri deli vzorca oddajajo malo in kateri veliko SHG signala (Slika 1). Pri večji debelini vzorca elektrostatična interakcija povzroči zvojno deformacijo nematskega direktorja za 180 stopinj. Z ustrezno kombinacijo periode zvojne deformacije in optičnih lastnosti materiala, je v zviti strukturi SHG signal lahko še znatno večji kot pri homogeni ureditvi tekočega kristala [2].



Slika 1: (a) Shema ureditve direktorja na površini celic. (b) Posnetek vzorca dobljen z SHG mikroskopijo pri različnih kotih polarizacije vpadne svetlobe. (c) Prostorski profil maksimalne intenzitete SHG signala. (d) Prostorska odvisnost kota polarizacije vpadne svetlobe pri katerem dobimo maksimalno intenziteto SHG odziva (0° ustreza vodoravni, 90° pa navpični polarizaciji).

[1] N. Sebastián, *et al.*, Nat Commun **14**, 3029 (2023).

[2] M. Lovšin, *et al.*, Giant **19**, 100315 (2024).

Vpogled v kristalno strukturo materiala s pomočjo ionskih metod

S. Markelj¹, E. Punzón-Quijorna¹, M. Kelemen¹, T. Schwarz-Selinger², X. Jin³, E. Lu³, F. Djurabekova³, K. Nordlund³, J. Zavašnik¹, A. Šestan¹, M. L. Crespillo⁴, G. García López⁴, R. Heller⁵

1. Jožef Stefan Institute (JSI), Ljubljana, Slovenia

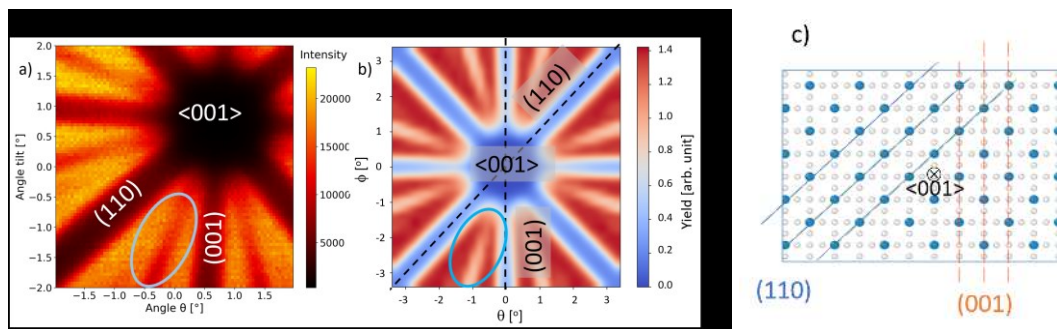
2. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Garching,

3. Department of Physics, University of Helsinki, Helsinki, Finland

4. Center for Micro Analysis of Materials (CMAM), Madrid, Spain

5. Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Rossendorf, Germany

Ionska metoda Rutherfordovo povratno sipanje v konfiguraciji kanaliziranja (RBS-C) je dobro uveljavljena metoda za raziskovanje kristalne strukture v monokristalih. Še posebej pa je uporabna za preučevanje napak v kristalni rešetki in razvoja teh napak, ki jih povzročajo obstreljevanje z visokoenergijskimi ioni ali nevtroni. Za kvantifikacijo napak se meri sprememba v pridelku povratno sipanih lahkih ionov (⁴He) vzdolž določene kristalografske smeri [1].



Slika 1: a) Eksperimentalna in b) simulirana slike pridelka povratno sipanih delcev v kristalu W(100) ter c) kristala struktura z označenimi osmi kanaliziranja.

Izmerili smo pridelke povratno sipanih ionov v monokristalu volframa W(100) ter jih primerjali s simulacijami in dobili zelo dobro ujemanje, slika 1. V namen preučevanja napak v kristalni rešetki smo izmerili tudi spektre ter pridelke povratno sipanih ionov v monokristalih W(111) in W(100), ki so bili predhodno obstreljevani z 10,8 MeV ioni volframa pri dveh različnih dozah in temperaturah. Analiza spektralnih podatkov je pokazala različne odzive ionskega signala za vsak vzorec [2]. Eksperimentalne spektre smo tudi simulirali s pomočjo RBSADEC kode [3], kjer smo kot vhodno kristalno strukturo uporabili celice izračunane z molekularno dinamiko (MD) prekrivajočih se kaskad. Izkaže se da je ta način primerjave izmerjenih spektrov s simuliranimi edini način, ki omogoča direktno validacijo najnovejših modelov in simulacij. Raziskave potekajo v okviru fuzijskih raziskav. Volfram bo namreč material, ki bo izpostavljen plazmi v bodočih fuzijskih reaktorjih, vendar pa bo njegova kristalna rešetka v prihodnjem jedrskem okolju močno spremenjena zaradi napak, ki jih bodo povzročili nevtroni z energijo 14 MeV, ki izhajajo iz D-T fuzijske reakcije. Nastale napake bodo vplivale na fizikalne lastnosti materiala, zato je pomembno da jih razumemo.

[1] L.C. Feldman et al., Academic Press, San Diego, (1982), pp. 88–116

[3] Markelj et al, Acta Materialia 263 (2024) 119499

[4] Zhang et al. Phys. Rev. E 94, 043319 (2016).

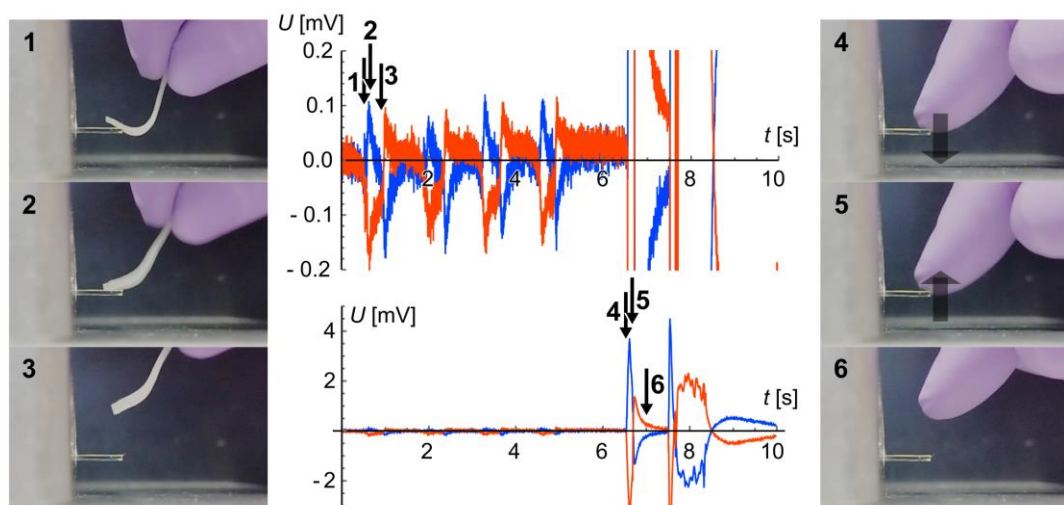
Mehki značaj mehanoelektričnega sklapljanja v feroelektrični nematski tekočini

Peter Medle Rupnik^{1,2}, Nerea Sebastián¹, Luka Cmok^{1,2} in Alenka Mertelj¹

1. Odsek za kompleksno snov, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Za feroelektrince nematske tekočine je značilna kombinacija visokih vrednosti spontane električne polarizacije in 3D fluidnosti. V naši študiji smo pokazali, da inducirani tok feroelektrične tekočine povzroči reorientacijo električne polarizacije in posledično spremembe električnega polja v okolici vzorca. Takšne spremembe je mogoče zaznati, če v bližino vzorca namestimo elektrode, kjer merimo razlike električne napetosti. V našem primeru smo takšne viskozne mehano-električne signale opazovali pri sobni temperaturi v nizkofrekvenčnem režimu 1-200 Hz in pri razmeroma nizkih mehanskih silah 1-10 mN. Zaradi kombinacije mehkega mehanskega odziva na zunanje deformacije in mehкости feroelektrične strukture se poreklo mehano-električne transdukcije v feroelektrični tekočini v bistvenem razlikuje od piezoelektričnega efekta v trdninah. Posledično je mogoče študirati bogat nelinearen mehanoelektrični signal, ki je rezultat večih fizikalnih mehanizmov. Tako jakost kot oblika mehanske deformacije vplivata na obliko signala, kar pomeni, da bi bilo mogoče feroelektrične nematske tekočine uporabiti za konstrukcijo taktilnih senzorjev, primernih za uporabo na področjih protetike in robotike.



Slika 1: Mehanoelektrični odziv v primeru mehanske deformacije tekočerkristalne celice napolnjene s feroelektrično tekočino. Na levih fotografijah (1-3) smo vzorec deformirali s pomočjo tankega kosa PDMS-ja na desnih (4-6) pa neposredno s prstom. V prvem primeru so bile aplicirane sile znatno manjše (1-10 mN) od tistih pri neposrednem dotiku. Na grafih je prikazana izmerjena razlika napetosti med elektrodami. Reproducirano po [1] (CC BY-NC-ND 4.0).

Ta študija je prejela financiranje okvirnega programa Evropske unije za raziskave in inovacije, Obzorja 2020, po pogodbi št. 899285 in programa P1-0192 Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije.

Feroelektrični nematski tekoči kristal, ki smo ga uporabili v študiji, smo pridobili od Merck Electronics KGaA.

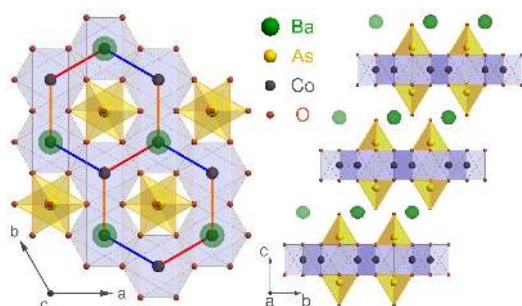
[1] P. Medle Rupnik, L. Cmok, N. Sebastián in A. Mertelj, *Advanced Functional Materials* **34**, 2402554 (2024).

Analiza frustriranega kvantnega magneta na mreži satovja z jedrsko magnetno resonanco

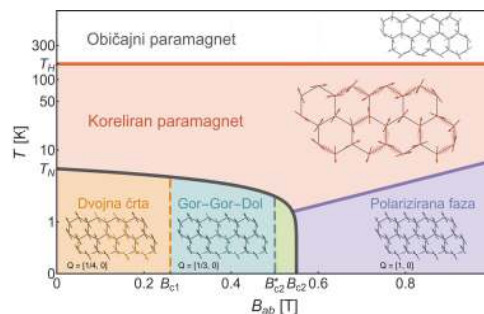
Maj Mejak¹ in Martin Klanjšek¹

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

Kvantni materiali, kjer fiziko narekujejo lokalizirane spinske prostostne stopnje, lahko kljub svoji preprostosti gostijo številne zanimive kvantne pojave. Še posebej so zanimivi frustrirani spinski sistemi, kjer si izmenjalne interakcije med spini med seboj nasprotujejo, kar zavira nastanek običajne magnetne ureditve in pod vplivom kvantnih fluktuacij lahko vodi do nastanka kvantne spinske tekočine. Za tovrstno kvantno stanje je poleg močnih spinskih korelacij in visoke stopnje kvantne prepletenosti značilna tudi frakcionalizacija spinskih prostostnih stopenj [1]. Frustrirani kvantni magneti na mreži satovja so v fizikalni skupnosti dobili veliko pozornosti predvsem zaradi teoretičnega modela Kitaeva [2], ki je eden redkih analitično rešljivih modelov kvantne spinske tekočine ter napoveduje možnosti aplikacije topoloških lastnosti vzbuditev za namene kvantnega računalništva. V svojih raziskavah z metodo jedrske magnetne resonance analiziram vpliv magnetnega polja ter temperature na različna stanja plastovitega kobaltovega kvantnega magneta $\text{BaCo}_2(\text{AsO}_4)_2$ (slika 1). Jedrska magnetna resonanca izkorišča spine atomskih jeder arzena ^{75}As kot lokalne eksperimentalne sonde okoliškega magnetizma kobaltovih Co^{2+} ionov. Poleg lokalne magnetizacije v spinskem sistemu lahko s to metodo določimo tudi čas relaksacije jedrskih spinov v termično ravnovesje, kar nam razkrije lastnosti osnovnih vzbuditev spinskega sistema. V predavanju so predstavljene faze kobaltovega magneta (slika 2), izvor magnetne frustracije ter osnovne vzbuditve, ki jih z jedrsko magnetno resonanco opazimo v različnih fazah. Stanja spinske tekočine sicer nismo opazili, saj pride pri nizkih temperaturah do antiferomagnetne ureditve, vendar na prisotnost močne frustracije namigujejo znaki nenavadnih vzbuditev v korelirani paramagnetni fazi ter v polariziranem stanju. Prav tako lahko na podlagi izmerjenega spektra v urejeni fazi določimo vrsto magnetne ureditve ter izluščimo parametre hiperfine sklopitve arzenovih jeder s kobaltovimi ioni. Z izsledki eksperimentalnih raziskav lahko sklepamo tudi o mikroskopskem modelu spinske fizike v analiziranem kvantnem materialu.



Slika 1: Kristalna struktura $\text{BaCo}_2(\text{AsO}_4)_2$, kjer kobaltovi Co^{2+} ioni tvorijo mrežo satovja.



Slika 2: Fazni diagram kobaltovega magneta v odvisnosti od zunanje polja in temperature.

[1] L. Balents, Nature **464**, 199 (2010)

[2] A. Kitaev, Annals of Physics **321**, 2 (2006)

Vpliv koncentracije ukrivljenih nematikov na ravnovesne oblike 2D lupin

Luka Mesarec¹, Veronika Kralj-Iglič², Samo Kralj^{3,4} in Aleš Iglič¹

1. Fakulteta za elektrotehniko, UL, Ljubljana

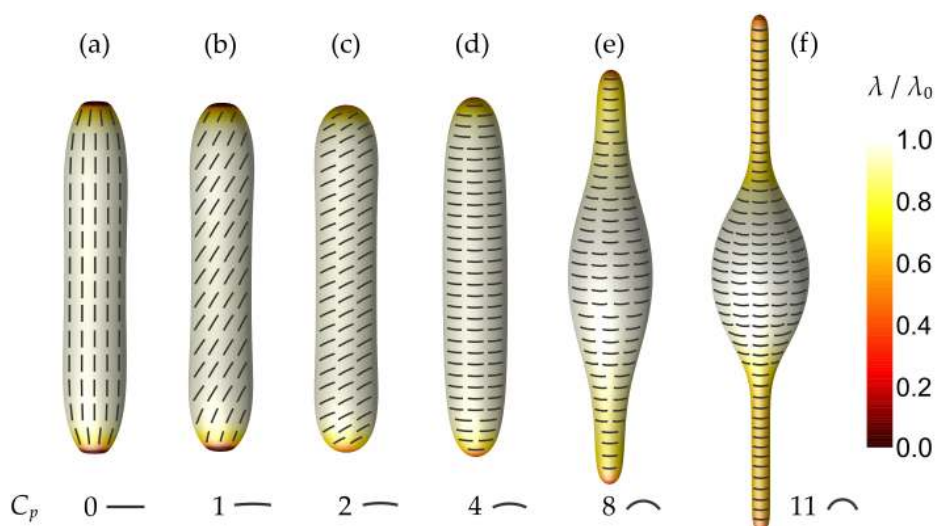
2. Zdravstvena fakulteta, UL, Ljubljana

3. Fakulteta za naravoslovje in matematiko, UM, Maribor

4. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

V prispevku proučujemo nematično orientacijsko urejanje ukrivljenih fleksibilnih nematskih molekul na 2D lupinah, ki ga v naravi lahko opazimo na primer v tekočih kristalih ali bioloških membranah. Pri modeliranju smo uporabili mezoskopski pristop tipa Helfrich-Landau-de Gennes, kjer sta ukrivljenost fleksibilne lupine in polje nematične urejenosti medsebojno povezana in hkrati določena v procesu minimizacije proste energije. S pomočjo numeričnih simulacij smo predvideli raznolik nabor novih oblik zaprtih 3D nematskih lupin in ustreznih profilov nematične urejenosti na teh lupinah, ki so močno odvisne od relativnega volumna oblike in lastne ukrivljenosti nematičnih molekul na površini [1].

Kadar so molekule razporejene po celotni 2D površini, so na lupinah s krogelno topologijo vedno prisotni topološki defekti. Če koncentracijo ukrivljenih molekul zmanjšamo, pa obstaja tudi možnost, da se molekule po površini razporedijo na način, kjer se topološkimi defekti izognemo, saj se lahko molekule distancirajo od območij, kjer bi se običajno pojavili topološki defekti. V najnovejši študiji predpostavimo različne vrednosti koncentracije molekul po površini, ki pripeljejo do novih tipov ravnovesnih oblik 2D lupin in nematičnih konfiguracij na teh lupinah.



Slika 1: Vpliv orientacijskega urejanja ukrivljenih nematskih molekul na ravnovesne oblike

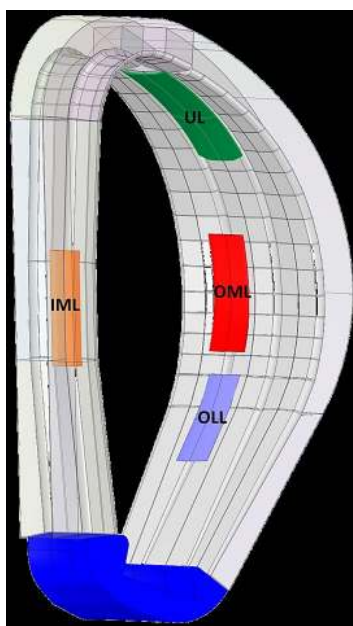
[1] L. Mesarec, W. Gózdź, V. Kralj-Iglič, S. Kralj in A. Iglič, Scientific Reports **13**, 10663 (2023)

Aktivacija limiterjev DEMO tokamaka

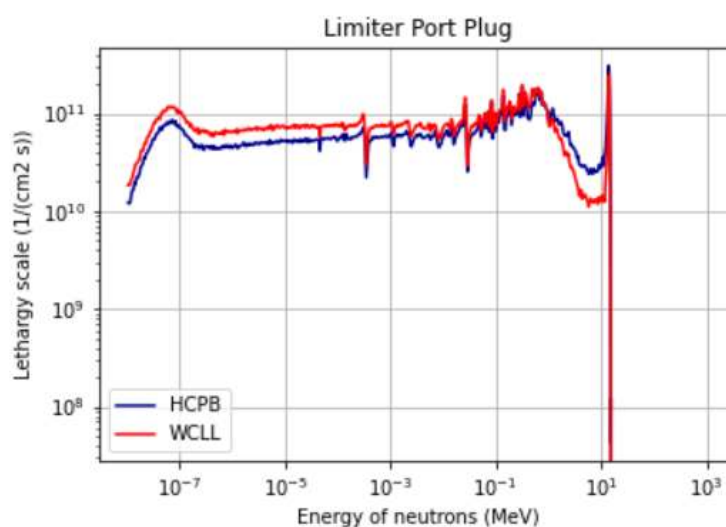
Denis Nedić¹, Igor Lengar¹

¹Odesek za reaktorsko fiziko, IJS, Ljubljana

Uporaba limiterjev se preučuje v okviru EU-DEMO (DEMONstration power plant), da bi zaščitili površine prve stene (first wall) pred nestabilnostmi plazme. Več ploščatih limiterjev je nameščenih na steni na določenih toroidalnih in poloidalnih mestih, kjer lahko pride do neposrednega stika s plazmo.



Slika 1: Limiterji



Slika 2: Spekter nevtronov v priključku

Ker so limiterji komponente, ki so plazmi najbolj izpostavljene, je analiza njihove aktivacije ključnega pomena za oceno varnosti in obvladovanja odpadkov. Pri analizi smo uporabili orodji MCNP (Monte Carlo N-particle), ki omogoča natančno modeliranje interakcij nevtronov z materiali, ter FISPACT, katerega smo uporabili za izračun aktivnosti limiterjev, ki so večino svoje življenjske dobe izpostavljeni močnemu nevtronskemu sevanju. Analizirali nismo samo limiterjev, kajti del analize je bil namenjen primerjavi dveh 'Breeder Blanketov', in sicer HCPB (Helium Cooled Pebble Bed) ter WCLL (Water Cooled Lithium Lead). Spektri v obeh analiziranih primerih so si podobni, pri čemer lahko iz grafov razberemo, da so skupni fluksi nevtronov v WCLL blanketu nekoliko višji, medtem ko je fluks hitrih nevtronov višji v HCPB.

Izvor ojačitve dielektrične nastavljivosti v antiferoelektrični PNZST keramiki

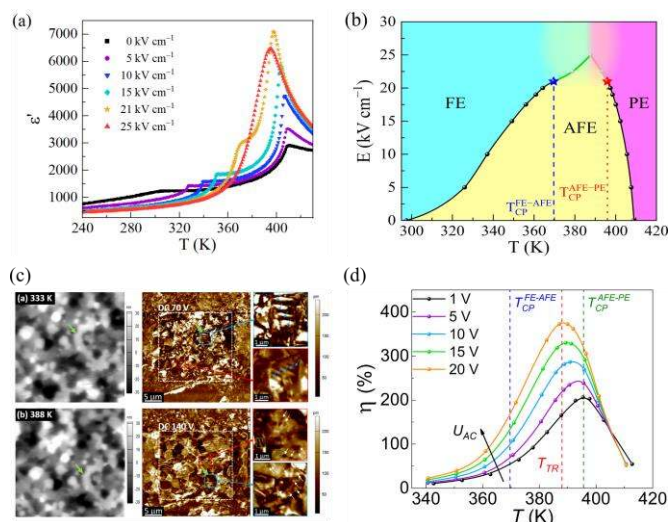
Vida Jurečič¹, Tadej Rojac², Vid Bobnar¹ in Nikola Novak¹

1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

2. Odsek za elektronsko keramiko, IJS, Ljubljana

Kondenzatorji so ključni elementi v visokozmogljivih elektronskih napravah, ki se uporabljajo v elektromotornih aplikacijah, obnovljivih virih energije, medicinski opremi in orožnih platformah. Za te kondenzatorje so značilne zahteve po visoki kapacitivnosti, ki narašča z enosmerno napetostjo, nizkih izgubah pri visokih frekvencah, visoki delovni temperaturi in neomejeni hitrosti spremembe napetosti. Antiferoelektrična keramika izpolnjuje te zahteve in je zato obetaven kandidat za razvoj novih kondenzatorjev.

V naši raziskavi [1] smo se osredotočili na antiferoelektrično keramiko s kemijsko formulo $\text{Pb}_{0.99}\text{Nb}_{0.02}[(\text{Zr}_{0.57}\text{Sn}_{0.43})_{0.92}\text{Ti}_{0.08}]_{0.98}\text{O}_3$ in izvedli in-situ dielektrične in toplotne meritve. Ugotovili smo, da je pri nizkem AC merilnem signalu dielektrična nastavljivost doseže maksimum v bližini kritične točke prehoda iz antiferoelektrične v paraelektrično fazo, kar je verjetno posledica intrinzičnega odziva materiala [2]. Ob povečanju AC merilnega signala pa je v bližini trojne točke dielektrična nastavljivost zrasla na 375 %, kar pripisujemo večjemu nelinearnemu prispevku dielektričnega odziva zaradi zmanjšanja domenskih struktur v bližini trojne točke. To smo tudi potrdili z Rayleighovo analizo dielektričnega odziva in opazovanjem domenske strukture s piezoelektričnim modulom nadgrajenega mikroskopa na atomsko silo (PFM).



Slika 1: a) Temperaturna odvisnost dielektričnega doziva pod različnimi električnimi polji. b) Električno polje-temperaturni fazni diagram PNZST keramike. c) PFM slika domenske strukture. d) Temperaturna odvisnost dielektrične nastavljivosti pri različnih AC napetostih.

[1] V. Jurečič, T. Rojac, V. Bobnar in N. Novak, *Advanced Functional Materials* (v tisku), 2412739 (2024).

[2] V. Jurečič, L. Fulanović, J. Koruza, V. Bobnar in N. Novak, *Physical Review Materials* **7**, 114407, (2023).

Strukturna in kemijska analiza Na-ionskih baterij z rentgensko Ramansko spektroskopijo

Ava Rajh^{1,2}, Matej Gabrijelčič^{1,3}, Alen Vizintin³, Klemen Bučar^{1,2}, Iztok Arčon^{2,4}, Marko Petric^{2,5}, Robert Dominko³ in Matjaž Kavčič^{1,2}

1. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Matematiko in Fiziko, Ljubljana, Slovenija
2. Inštitut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija
3. Kemijski inštitut, Ljubljana, Slovenija
4. Univerza v Novi Gorici, Nova Gorica, Slovenija
5. Univerza v Zagrebu, Fakulteta za Geotehnično inženirstvo, Varaždin, Hrvaška

Natrij-ionske baterije (NIB) predstavljajo okolju prijazno alternativo široko dostopnim litij-ionskim baterijam. Njihove prednosti so predvsem večja varnost, visoka energijska gostota in dostopnost materialov [1]. Za stabilno delovanje baterije je ključnega pomena izbira anodnega materiala in trdi ogljiki (Hard Carbons), zaradi visoke kapacitete za shranjevanje Na ionov in nizkih stroškov proizvodnje, veljajo za eno najboljših izbir. Temperatura, pri kateri se karbonizira organski material med proizvodnjo trdih ogljikov, vpliva na razmerje sp^2/sp^3 hibridiziranih ogljikovih atomov v materialu, kar posledično vpliva na mehanizme in reverzibilnost prehoda natrija v anodo [2].

V raziskavi smo opazovali strukturne spremembe v anodnih materialih, ki so bili karbonizirani pri različnih temperaturah, in spremljali, kako te vplivajo na mehanizme prehoda Na v anodo. Za meritve smo uporabili rentgensko Ramansko spektroskopijo (XRS), ki omogoča uporabo trde rentgenske svetlobe za meritve absorpcijskih spektrov elementov z majhnim atomskim številom v razsežnih vzorcih.

Meritve smo izvedli na undulatorski sinhrotronski žarkovni liniji P01 sinhrotrona PETRA III. Izmerili smo absorpcijske spektre C in Na v anodah, ki so bile predhodno ustavljene na različnih točkah baterijskega cikla. Z analizo spektrov smo karakterizirali strukturne spremembe globoko v materialu, ki so posledica vstavljanja natrija v C mrežo, hkrati pa smo sledili prisotnim natrijevim spojinam v vzorcih [3].

[1] Fei Xie *et al.*, Prog. Energy **2**, 042002 (2020)

[2] Tratnik, B. *et al.*, ACS Appl. Energy Mater., **5**, 9, 10667–10679 (2022)

[3] Rajh, A. *et al.* Carbon, **228**, 119398 (2024)

Fizika mehkih snovi in fotonika

Miha Ravnik^{1,2}

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

2. Odsek za fiziko trdnih snovi, IJS, Ljubljana

Fizika mehkih snovi se ukvarja s preučevanjem materialov, ki imajo lastnosti med trdnimi in tekočimi snovmi. To vključuje tekoče kristale, koloide, polimere, elastomere in biološke materiale. Materiali so lahko aktivni, to pomeni, da stalno črpajo oziroma porabljajo energijo iz okolice za premikanje, vrtenje in različne druge oblike neravnovesne dinamike. Raziskave na tem področju se osredotočajo na razumevanje strukture, dinamike in lastnosti teh snovi ter njihove uporabe v različnih tehnologijah, kot so optika, fotonika in medicina. Na tem plakatu bom predstavil izbrane aktivnosti naše raziskovalne Skupine za fiziko mehkih in delno urejenih snovi na UL FMF (<https://softmatter.fmf.uni-lj.si/>), kot so topološka mehka snov, aktivni nematiki, biofizikalne simulacije proteinov, uporabo pristopov umetne inteligence v mehki snovi, načrtovanje svetlobe in svetlobnih načinov na nivoju valovne dolžine, napredni 3D optični hologrami in pristope topološke optimizacije.

Nastanek in transport vode na luni

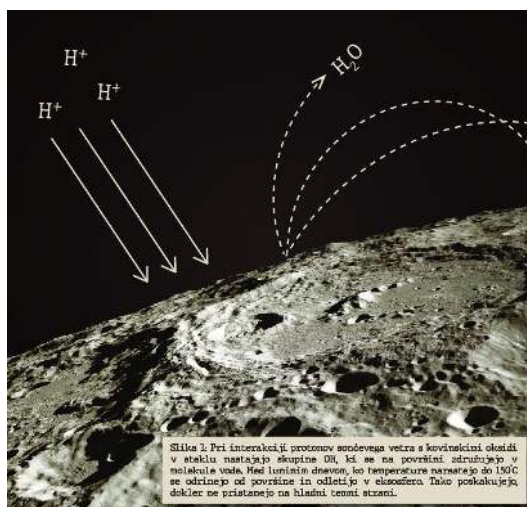
Jurij Simčič¹

1. Odsek za fiziko nizkih in srednjih energij - F2, IJS, Ljubljana

Nastanek in transport vode na Luni sta bila predmet številnih študij v zadnjih nekaj desetletjih [1]. Kljub temu ostaja veliko vprašanj neodgovorjenih, zlasti odsotnost rezervoarja podzemne vode, ki ga napovedujejo mnogi modeli, ki bi omogočil zaznavo vodnih molekul v lunini eksosferi [2]. Nedavne analize steklenih kroglic, nastalih ob udarcih meteoritov v lunino površje, ki jih je na Zemljo pripeljala kitajska sonda Chang'e 5, nakazujejo, da je ta material, ki je raztresen po vsej površini Lune, ob interakciji s sončnim vetrom, sposoben proizvesti in shraniti zaznavne količine vode [3]. Iz kroglic vodne molekule lahko pobegnejo, ko se med luninim dnevom temperature dvignejo do 150C, kar potrjuje zamisel, da so steklene kroglice manjkajoči rezervoar, ki oskrbuje eksosfero na Luni z vodnimi molekulami.

Predstavili bomo sklop laboratorijskih poskusov, s katerimi bomo izmerili karakteristike steklenih kroglic za proizvodnjo in akumulacijo vode ter merjenja difuzijske in ekstrakcijske hitrosti v temperaturnem okolju, ki ga določa lunin dnevni cikel. V naših laboratorijskih poskusih bomo uporabili zemeljske približke lunarnih steklenih kroglic, kot sta tektit in olivin, in steklo izdelano v vakuumski peči, ki po sestavi ustreza tistemu na Luni. Vzorce bomo, namesto sončevemu vetru, izpostavili obsevanju z devterijem, čemur bodo sledili pulzi infrardeče laserske svetlobe kot nadomestilo za udarce mikrometeoritov. Z uporabo analitskih metod s pospešenimi ioni, kot so Nuclear Reaction Analysis (NRA), Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA) in Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS) bomo določili, kako v vzorcih nastajajo vodne molekule in kako na njihov globinski profil in koncentracijo vplivajo zunanje temperature.

Rezultati teh meritev nam bodo omogočili dopolnitev teoretičnih modelov, ki opisujejo dinamiko vodnih molekul od njihovega nastanka v luninem regolitu do pobega v eksosfero.



[1] N. Schörghofer et al., Space Science Reviews (2021) 217:74

[2] M. Benna et al., Nature Geoscience **12** (2019)

[3] H. He et al., Nature Geoscience **16** (2023)

Adsorpcija surfaktantov na ukrivljenih površinah

Fabio Staniscia, Matej Kanduč

Inštitut Jožef Stefan, SI-1000 Ljubljana, Slovenia

Površinsko aktivne snovi so molekule, ki se zlahka adsorbirajo na površine tekočin in zmanjšujejo površinsko napetost. Igrajo ključno vlogo v številnih naravnih in tehnoloških procesih, zaradi česar so že skoraj stoletje predmet znanstvenih raziskav. Medtem njihovo obnašanje na ravnih površinah dokaj dobro razumemo, pa so njihove interakcije z majhnimi, ukrivljenimi površinami, kot denimo v kapljicah in mehurčkih, še vedno v veliki meri neraziskane zaradi izzivov pri neposrednem eksperimentalnem opazovanju. Da bi osvetlili ta vidik, smo uporabili simulacije molekularne dinamike za preučevanje, kako ukrivljenost vpliva na adsorpcijo kratkoverižnih surfaktantov na površinah med vodo in paro. Rezultati kažejo sistematično odvisnost adsorpcije od ukrivljenosti: adsorpcija se poveča na kapljicah, vendar zmanjša na mehurčkih, pri čemer postane ta učinek bolj izrazit pri surfaktantih z daljšimi hidrofobnimi repi. To obnašanje, odvisno od ukrivljenosti, lahko pripišemo dvema ključnima mehanizmoma: Laplaceovemu tlaku in krivinsko odvisni površinski napetosti. Razčlenitev teh prispevkov nam je omogočila razviti preprost teoretični model, ki ponuja kvantitativno razumevanje teh mehanizmov in napoveduje vpliv ukrivljenosti na adsorpcijo. Ta spoznanja imajo široke implikacije na različnih področjih, od nastajanja oblakov in podnebne modeliranja do stabilnosti in reaktivnosti nanokapljic in nanomehurčkov, kar je ključnega pomena za napredek v nanotehnologiji.

Kavitacija v vodi: Vpliv nepolarnih nečistoč

Marin Šako^{1,2}, Roland R. Netz³ in Matej Kanduč¹

1. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

3. Fachbereich Physik, Freie Universität Berlin, Berlin, Nemčija

Vodo lahko natezno obremenimo in v njej ustvarimo negativni tlak, ne da bi se pojavili parni mehurčki. Ta oblika metastabilnosti je star problem v fiziki, znan od 17. stoletja [1] in ostaja predmet raziskav še danes. Vendar obstaja neskladnost med eksperimentalnimi opažanji in teoretičnimi napovedmi, prav tako pa tudi nekonsistentnost pri različnih eksperimentih. Medtem ko teorija napoveduje, da bi morala biti voda izjemno stabilna proti kavitaciji, eksperimenti kažejo ravno nasprotno. [1,2]

V tem prispevku predstavim naše delo o kavitaciji v vodnih medijih. Razpravljam o tem, kako na natezno trdnost vode, oziroma njen kavitacijski tlak, vplivajo netopni ogljikovodiki, ki tvorijo kapljice olja. Pri proučevanju združimo klasično teorijo nukleacije s simulacijami molekularne dinamike. Naše ugotovitve kažejo, da je čista voda dejansko izjemno stabilna proti kavitaciji, vendar prisotne netopne nečistoče korenito zmanjšajo njeno natezno trdnost na eksperimentalno izmerjene nižje vrednosti. Natančneje, ene sama oljna kapljica s polmerom okoli 1 nm v makroskopskem volumnu vode je dovolj, da destabilizira celoten sistem. Glede na to, da se je nemogoče znebiti prav vseh nanoskopskih nečistoč tudi v najbolj prečiščeni vodi z uporabo današnjih tehnologij, je teoretično vrednost natezne trdnosti vode praktično nemogoče doseči.

[1] Caupin, F.; Herbert, E. Cavitation in water: a review. *Comptes Rendus Physique* 2006, 7, 1000–1017.

[2] Caupin, F.; Stroock, A. D. The stability limit and other open questions on water at negative pressure. *Liquid Polymorphism* 2013, 152, 51–80.

Kvantni spomin z vročimi atomi

Alenka Pipuš^{1,2}, Bor Luka Urlep^{1,2}, Matevž Vaupotič^{1,2}, Katja Gosar^{1,2}, Jure Pirman^{1,2}, Erik Zupanič¹ in Peter Jeglič¹

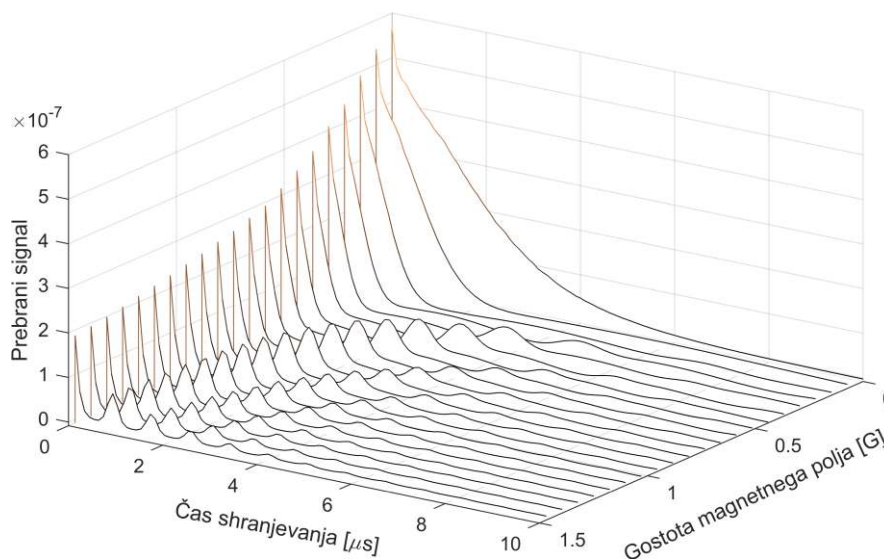
1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Kvantni spomin je z vidika pospešenega razvoja kvantnih omrežij in kvantnega računalništva predmet povečanega znanstvenega in tehnološkega zanimanja. V naboru možnih izvedb kvantnega spomina velja elektromagnetno inducirana transparentnost (EIT) za obetavnejšo [1]. EIT na vročih atomih predstavlja tehnološko relativno enostavno implementacijo kvantnega spomina.

V našem eksperimentu obravnavamo EIT na cezijevi pari pri sobni temperaturi, kjer osnovno, vzbujeno in *spominsko* (angl. *storage*) stanje cezijevih atomov tvorijo 3-nivojski sistem Λ . Sistem krmilimo z dvema laserjema – signalnim in kontrolnim. Signalni žarek sklaplja osnovno in vzbujeno stanje, medtem ko kontrolni žarek sklaplja *spominsko* in vzbujeno stanje [2]. Pri tem je direktni prehod med osnovnim in *spominskim* stanjem prepovedan in mogoč samo posredno preko vzbujenega stanja, kar nadzorujemo s kontrolnim žarkom.

Sekvenca shranjevanja fotonov se začne z vklopom in izklopom obeh žarkov (zapisovanje), čemur po izbranem časovnem presledku (čas shranjevanja) sledi pulz kontrolnega žarka (branje), ki povzroči izsevanje shranjenih fotonov, pri čemer prebrani signal eksponentno pojema s časom shranjevanja. Ko v sistem uvedemo homogeno magnetno polje, spinski valovi med seboj interferirajo na način, ki se v prebranem signalu izrazi kot dušeno nihanje [Slika 1]. Frekvenca takšnih periodičnih *obuditev* (angl. *revivals*) in kolapsov prebranega signala je sorazmerna z velikostjo magnetnega polja. Glavna procesa, ki vplivata na razpadanje informacije sta difuzija in trki med atomi. Efektivni čas shranjevanja podaljšujemo z dodajanjem inertnega plina v cezijevo celico, kar upočasni difuzijo, in z optimizacijo širine žarkov.



Slika 1: Prikaz prebranega signala v odvisnosti od gostote magnetnega polja vzdolž optične osi.

[1] L. Ma, O. Slattery in X. Tang. Optical quantum memory based on electromagnetically induced transparency. *Journal of Optics* 19, 043001 (2017).

[2] K. 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, 03692 (2023).

Uporaba nevronske mreže za prepoznavanje elastičnih konstant in struktur tekočih kristalov iz optičnih meritev

Jaka Zaplotnik^{1,2}, Jaka Pišljari^{2,1}, Miha Škarabot², Miha Ravnik^{1,2}

1. *Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana*

2. *Institut Jožef Stefan, Ljubljana*

Pri preučevanju materialov se pogosto soočimo z reševanjem netrivialnih inverznih problemov, na primer za določanje neznanih materialnih parametrov ali struktur. Zadostna količina merljivih podatkov iz eksperimentov ali simulacij pa lahko omogoči, da neznane količine rekonstruiramo z metodami nadzorovanega strojnega učenja nevronske mreže. V tem prispevku pokažemo, da z nekaj tisoč numeričnimi simulacijami dinamike tekočega kristala in propagacije svetlobe skozenj pri različnih naključnih elastičnih konstantah ustvarimo dovolj bogato učno množico za učenje nevronske mreže, ki potem lahko v obratni smeri iz časovne odvisnosti prepuščene svetlobe prepozna neznane elastične konstante. Čeprav model učimo s podatki iz numeričnih simulacij, ga nazadnje uporabimo tudi za prepoznavanje elastičnih konstant realnih vzorcev iz eksperimentalnih meritev [1]. Na podoben način razvijamo tudi konvolucijske nevronske mreže, ki bi lahko postale preprosta alternativa fluorescenčni konfokalni polarizacijski mikroskopiji (FCPM) [2,3] ali naprednim tomografskim pristopom [4] za rekonstrukcijo nematskih direktorskih polj. Nevronske mreže učimo na učnih množicah, ki vsebujejo več tisoč učnih parov naključno generiranih nematskih struktur in ustreznih simuliranih slik prepuščene svetlobe. Pokažemo, katere konfiguracije osvetlitve in polarizatorjev omogočajo prepoznavanje direktorskih polj tekočih kristalov v različno kompleksnih geometrijah.

[1] J. Zaplotnik, J. Pišljari, M. Škarabot, M. Ravnik, *Sci. Rep.* 13, 6028, (2023).

[2] O. Lavrentovich, *Pramana* 61, 373–384 (2003).

[3] G. Posnjak, *Topological Formations in Chiral Nematic Droplets*, 41–51 (2018).

[4] S. Shin, J. Eun, S. S. Lee, C. Lee, H. Hugonnet, D. K. Yoon, S.-H. Kim, J. Jeong, Y. K. Park, *Nat. Mater.* 21, 317–324 (2022).

Mehanika celičnih agregatov kot modelov tumorjev

U. Železnik,^{1,2} T. Sarkar,¹ and M. Krajnc¹

¹ Institut "Jožef Stefan", Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Jadranska ulica 19, 1000 Ljubljana, Slovenija

e-mail: urban.zeleznik@ijs.si

Ogliščni model je zanesljiv pripomoček za modeliranje dvorazsežnih bioloških epitelijskih tkiv, v trirazsežnih sistemih pa se pokažejo nekatere njegove pomanjkljivosti zaradi računske zahtevnosti problemov. Ta izhaja predvsem iz zapletenosti topoloških sprememb, ki se dogajajo v aktivnih tkivih. Grafični ogliščni model nam omogoča modeliranje trirazsežnih epitelijskih tkiv kot so tumorji in tumorski sferoidi, kjer epitelijske celice predstavimo kot poliedre. Model nam nudi preprostejšo implementacijo topoloških transformacij tkiva: celičnih preureditev (T1 topoloških prehodov v dvorazsežni upodobitvi) in celičnih delitev. Grafični ogliščni model obenem posploši topološke transformacije v dveh in treh dimenzijah. Tu predstavimo tumorje s prostimi robnimi pogoji, ki rastejo zaradi delitev celic na zunanji plasti tumorja. Na oblike rastočih tumorjev vplivajo fluktuacije robov med celicami, frekvenca celičnih delitev in mehanska napetost med odmrlim jedrom tumorja in zunanjo plastjo delečih se celic.

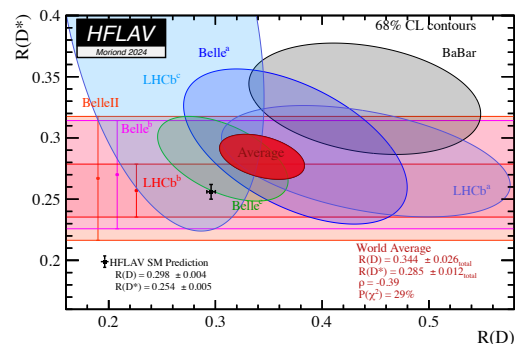
Iskanje razpada $B^0 \rightarrow \pi^- \tau^+ \nu_\tau$ na eksperimentu Belle II

Anja Novosel¹, Peter Križan^{1,2}, Luka Šantelj^{1,2}, Paul Feichtinger¹

1. Odsek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Iskanje efektov nove fizike na obzorju natančnosti na eksperimentu Belle II [1] temelji na zelo natančnih meritvah količin, ki vsebujejo redke procese znotraj standardnega modela. Semileptonski razpadi mezonov B so še posebej zanimivi zaradi vztrajnih namigov o kršitvi univerzalnosti leptonovih okusov v $b \rightarrow c \tau \nu_\tau$ prehodih [2], z težkim leptonom τ v končnem stanju, kar je vidno iz meritev razmerja razvejitenih razmerij (R) med semitauonskimi razpadi mezona B in semileptonskimi razpadi mezona B z lahкими leptoni (e, μ) v končnem stanju. Ker so prehodi $b \rightarrow c$ bolj pogosti od prehodov $b \rightarrow u$, ki nastopajo pri razpadu $B^0 \rightarrow \pi^- \tau^+ \nu_\tau$, je bila v zadnjem desetletju objavljena množica meritev razpadov mezona B , kjer so v končnem stanju mezoni, ki vsebujejo kvark c , obstaja le en poskus meritve $b \rightarrow u \tau \nu_\tau$ na eksperimentu Belle [3]. V nasprotju z elektroni in mioni, ki jih v detektorju neposredno znamo, je merjenje semitauonskih razpadov mezona B zahtevnejše, saj moramo lepton τ rekonstruirati iz njegovih razpadnih produktov, kjer je vedno prisoten nevtrino, ki ga v detektorju ne znamo. Poleg omenjenega nevtrina pri rekonstrukciji teh razpadov velik izziv predstavlja tudi identifikacija nabitih delcev v končnem stanju, saj so ti tipično zelo počasni. Izboljšava identifikacije delcev z nizkimi gibalnimi količinami je mogoča z uporabo metod strojnega učenja (odločevalna drevesa in nevronske mreže) na podlagi informacij iz elektromagnetnega kalorimetra. Z boljšim teoretičnim opisom semileptonskih razpadov in izboljšanimi eksperimentalnimi metodami na večjih podatkovnih setih, lahko postane tudi $B^0 \rightarrow \pi^- \tau^+ \nu_\tau$ merljiv, kar bo omogočilo drugačen zorni kot na obtoječo uganko kršitve univerzalnosti leptonskega okusa.



Slika 1: Odstopanje meritev $R(D)$ in $R(D^*)$ od napovedi standardnega modela [2].

[1] E. Kou et al., The Belle II Physics Book, PTEP, Volume 2019, Issue 12, 123C01 (2019), [808.10567 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1808.10567)

[2] HFLAV, Preliminary average of $R(D)$ and $R(D^*)$ for Moriond 2024, hflav-eos.web.cern.ch (23. 10. 2024)

[3] P. Hamer et al., (Belle Collaboration), Search for $B^0 \rightarrow \pi^- \tau^+ \nu_\tau$ with hadronic tagging at Belle, Phys. Rev. D 93, 032007 (2016), [1509.06521 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1509.06521)

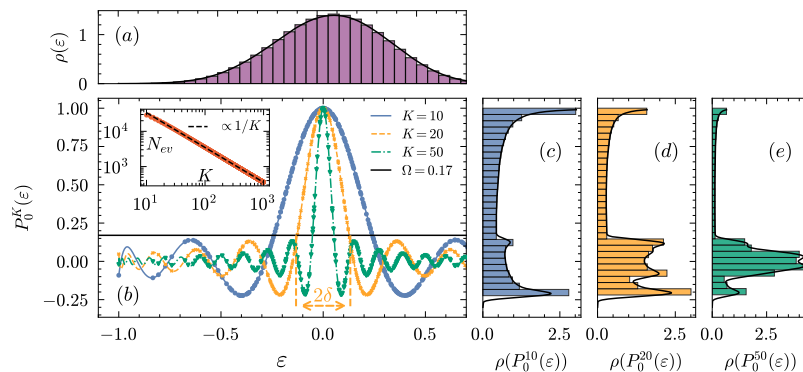
Polinomsko filtrirana natančna diagonalizacija v kvantnih mnogodelčnih sistemih

Rok Pintar^{1,2} in Lev Vidmar^{1,2}

1. Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Polinomsko filtrirana natančna diagonalizacija (ang. *Polynomially Filtered Exact Diagonalization*, POLFED) je časovno in spominsko učinkovita numerična metoda, namenjena pridobivanju spektra pri ciljni energiji. Natančna diagonalizacija postane izziv za sisteme, večje od $L=18$ mest, kjer nam pomaga Lanczosova metoda, pogosto uporabljena za ciljanje lastnih vrednosti v zgornjih in spodnjih delih spektra. Da bi premagali omenjene ovire, je bila razvita metoda premika in inverzije (*shift-and-invert*), ki izpostavi lastne vrednosti v okolici ciljne energije. Polfed predstavlja njeno izboljšavo, saj ohranja redkost Hamiltoniane, pri čimer zmanjšuje porabo pomnilnika in omogoča enostavno uporabo. S Polfedom lahko dosežemo sisteme velikosti do $L=24$, medtem ko na skromnem prenosniku lahko pridemo do $L=20$ mest v spinski verigi. Metoda je bila razvita v delu [1] in temelji na transformaciji Hamiltonke po Chebysjevih polinomih.



Raziskovanje termalizacijskih lastnosti sistemov je lahko zahtevno, saj je ta definirana v termodinamičnem limitu, v mnogodelčnem Hilbertovem prostoru pa so nam dosegljive simulacije do 18 mest. Vendar Polfed omogoča dostop do večjih velikosti sistema. Poleg tega indikatorji kaosa običajno potrebujejo lastnosti lastnih vrednosti le iz sredine spektra, kjer se Polfed dobro odreže, saj omogoča targetiranje poljubnega dele spektra.

- [1] Piotr Sierant, Maciej Lewenstein, and Jakub Zakrzewski. Polynomially filtered exact diagonalization approach to many-body localization. *Physical Review Letters*, 125(15), October 2020
- [2] Francesca Pietracaprina, Nicolas Macé, David J. Luitz, and Fabien Alet. Shift-invert diagonalization of large many-body localizing spin chains. *SciPost Physics*, 5(5), November 2018.
- [3] J. Jaklič and P. Prelovšek. Finite-temperature properties of doped antiferromagnets. *Advances in Physics*, 49(1):1–92, 2000
- [4] J. Jaklič and P. Prelovšek. Lanczos method for the calculation of finite-temperature quantities in correlated systems. *Phys. Rev. B*, 49:5065–5068, Feb 1994.

Nadgradnja slovenskega eksperimenta s hladnimi atomi

Jure Pirman^{1,2}, Katja Gosar^{1,2}, Tadej Mežnaršič¹, Erik Zupanič¹ in Peter Jeglič¹

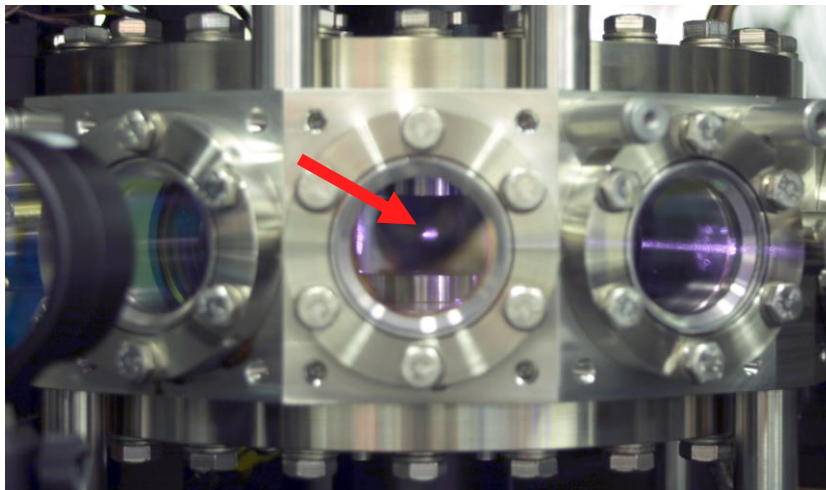
1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Od začetka delovanja slovenskega eksperimenta s hladnimi atomi je minilo približno deset let. Po uspešni Bose-Einsteinovi kondenzaciji cezija leta 2017 smo v laboratoriju raziskovali predvsem fiziko BEC v enodimenzionalnih potencialih[1,2], testirali pa smo tudi uporabo optične pincete za eksperimente s hladnimi atomi[3]. Tekom tega obdobja se je znanost hladnih atomov precej razvila, hkrati pa se je zgodil precejšen napredek na tehnologijah, ki omogočajo te eksperimente. Posebej zanimivo in hitro razvijajoče področje je fizika Rydbergovih atomov, ki lahko služijo kot osnovni gradnik kvantnega računalnika ali simulatorja. Ti eksperimenti pa skoraj v vseh primerih vključujejo tudi optično pinceto. Zaradi tega smo v drugi polovici leta 2023 začeli večjo nadgradnjo eksperimenta.

Osrednji del nadgradnje je par objektivov, ki nam omogočajo izboljšanje ločljivosti slikanja in optične pincete. Objektivna smo sami konstruirali in sestavili, tako da omogočata slikanje s približno mikrometrsko ločljivostjo. Prehod na nove objektivne je zahteval veliko sprememb.

Za vzbujanje atomov v Rydbergova stanja smo v sistem dodali še dodatni laser in ultra stabilno referenčno optično votlino na katero lahko stabiliziramo več laserjev. Z nadgradnjo sistema bomo lahko hladne atome manipulirali v eni ali dveh dimenzijah. Z uporabo novih objektivov bo ločljivost ter učinkovitost optične pincete boljša, kar bi lahko potencialno omogočilo delo v limiti posameznih atomov.



Slika 1: Atomi ujeti v magnetooptični pasti.

[1] Tadej Mežnaršič, Tina Arh, Jure Brence, Jaka Pišljarič, Katja Gosar, Žiga Gosar, Rok Žitko, Erik Zupanič, in Peter Jeglič, Phys. Rev. A 99, 033625 (2019)

[2] Tadej Mežnaršič, Rok Žitko, Tina Arh, Katja Gosar, Erik Zupanič, in Peter Jeglič, Phys. Rev. A 101, 031601(R) (2020)

[3] Katja Gosar, Vesna Pirc Jevšenak, Tadej Mežnaršič, Dušan Babič, Igor Poberaj, Erik Zupanič, in Peter Jeglič, Phys. Rev. A 106, 022604 (2022)

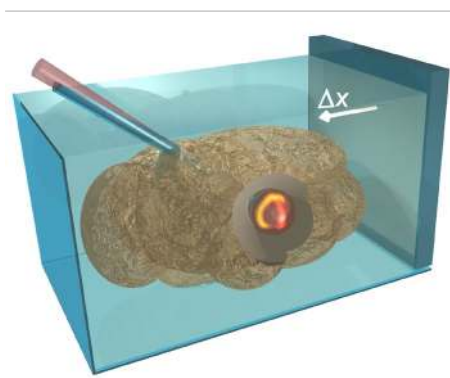
Kapljični mikroresonatorji za preučevanje mehkih in bioloških materialov

Gregor Pirnat^{1,2}, Matevž Marinčič^{1,2}, Miha Ravnik^{2,1} in Matjaž Humar^{1,2,3}

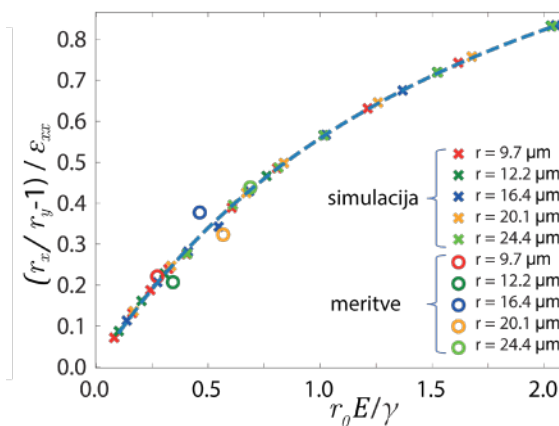
1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
 2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
 3. CENN Nanocenter, Ljubljana

Kapljični mikroresonatorji lahko ob osvetlitvi podpirajo "whispering gallery mode" (WGM) optične resonance, ki so močno odvisne od velikosti in oblike kapljice. Tudi najmanjše spremembe teh dveh parametrov povzročijo znatne spremembe v WGM spektru kapljice, kar je osnova za natančno optomehansko sensoriko. Kapljice, vstavljene v mehko matriko so s svojo okolico sklopljene preko elastokapilarnosti, kar vpliva na odziv spremembe oblike kapljice ob deformaciji matrike.

Za matriko so bili uporabljeni hidrogeli iz želatine in različna mišja tkiva v katera so bili vstavljeni kapljični mikroresonatorji. Matrika je bila nadzorovano deformirana, odziv kapljic pa je bil merjen preko WGM resonanc, kar je omogočilo določitev lokalnih anizotropnih napetosti, ki so lahko velikostnega reda le nekaj pikonewtonov. Poleg tega razvita metoda omogoča določanje Youngovega modula matrike v območju 1 Pa–35 kPa, kar zajema večino mehkih tkiv pri ljudeh.



Slika 1: Shema vstavitev kapljičnega mikroresonatorja v tkivo s pomočjo mikrokapilare in vzbuditev WGM resonanc.



Slika 2: Meritve in simulacije deformacije kapljic in matrike v odvisnosti od velikosti kapljic, površinske napetosti med kapljico in matriko ter Youngovim modulom z prilagajajočim se konstitutivnim modelom [1].

[1] G. Pirnat, M. Marinčič, M. Ravnik in M. Humar, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **121**, e231488121 (2024)

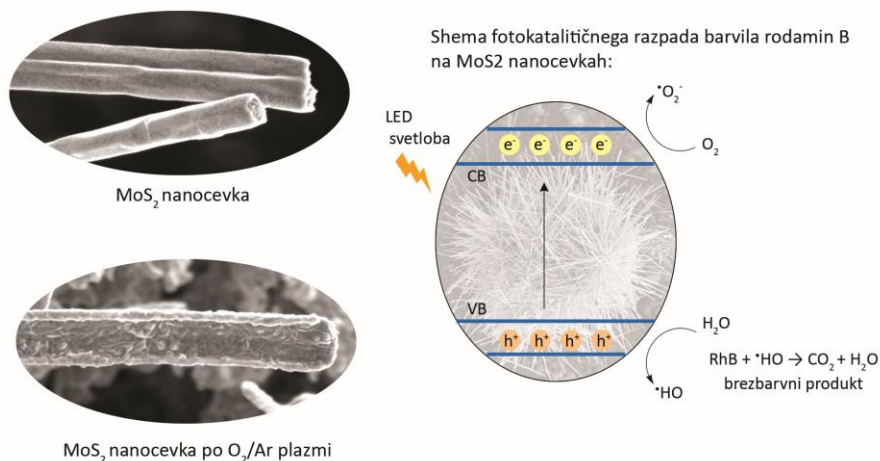
Aktivacija površine MoS₂ nanocevk za fotokatalitično razgradnjo organskih onesneževalcev voda

Anja Pogačnik Krajnc^{1,2}, Gregor Filipič¹, Vitjan Lin Zupan², Srečo D Škapin³ in Maja Remškar¹

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

Uporaba sintetičnih organskih barvil je razširjena v številnih industrijskih panogah, kot so kozmetika, farmacija in papirna industrija. Kontaminacija odpadnih voda z barvili škodljivo vpliva na zdravje ljudi in ekosisteme. Fotokatalitična degradacija barvil ponuja rešitev problema, saj barvila razpadejo v netoksične produkte brez nastajanja sekundarnih odpadkov.

V delu raziščemo potencialno uporabo MoS₂ nanocevk (NC), ki smo jih sintetizirali s kemijskim transportom (CVT) [1]. Visoka specifična površina, ugodna energijska vrzel za razpad z vidno svetlobo in žveplove vrzeli so nas spodbudili, da smo opravili teste degradacije barvila rodamin B. Uspešnost ni bila zadovoljiva. Kisik-argonova plazma je bila uporabljena za jedkanje inertnih S-Mo-S plasti in vnos dodatnih katalitsko aktivnih mest, pri čemer je neizogiben nastanek Mo-O vezi. Modifikacija površine je bila potrjena z UV-Vis in Ramansko spektroskopijo ter različnimi metodami mikroskopije (SEM, Kelvinovo tipalno mikroskopijo, STM...). Poročamo o več kot 90 % uspešnosti katalizatorja pri razpadu rodamina B za MoS₂ NC tretiranih 10 min v kisik-argonovi plazmi, pri čemer je večino barvila razpadlo že v prvih 15 min po začetku obsevanja z LED lučjo.



Slika 1: Opazne spremembe na površini MoS₂ nanocevk po O₂/Ar plazmi. Uspešnost aktivacije površine je bila preverjena s fotokatalitičnim razpadom barvila rodamin B.

[1] Višić, et al. *Nanoscale Res Lett* **6**, 593 (2011)

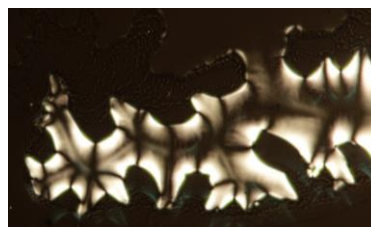
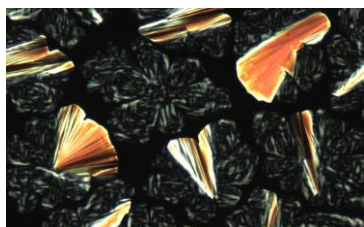
Spontano urejanje zaporedij $d(G_4C_2)$: od DNK-kvadrupleksov do tekočokristalnih faz

Melani Potrč^{1,2}, Elena Čokor¹, Irena Drevenšek-Olenik^{3,2} in Lea Spindler^{4,2}

1. *Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru, Maribor*
2. *Odsek za kompleksne snovi, Institut Jožef Stefan, Ljubljana*
3. *Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana*
4. *Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, Maribor*

Z gvaninom bogate DNK sekvence imajo sposobnost spontanega urejanja v stabilne strukture, imenovane G-kvadrupleksi. Osnovna enota G-kvadrupleksa je G-tetrada. Sestavljena je iz štirih gvaninov, ki so med seboj povezani s Hoogsteenovimi vodikovimi vezmi. V naši raziskavi smo preučevali tvorbo DNK-kvadrupleksov zaporedij $d(G_4C_2)_n$, kjer je $n = 1, 2, 3$ in 4 . Ta zaporedja so povezana z nekaterimi neozdravljivimi nevrološki motnjami, zlasti z amiotrofično lateralno sklerozo (ALS) in frontotemporalno demenco (FTD) [1, 2].

Za proučevanje spontanega urejanja DNK zaporedij smo uporabili različne metode. Z dinamičnim sipanjem svetlobe smo določili vrednosti difuzijskih koeficientov in izračunali dolžine agregatov G-kvadrupleksov v raztopinah omenjenih zaporedij. Ugotovili smo, da vse sekvence tvorijo daljše strukture, kot je bilo prej poročano [3]. Zaporedje $d(G_4C_2)$ tvori izjemno dolge kvadrupleksne agregate z dolžinami nad 80 nm. Zaporedje $d(G_4C_2)_2$ tvori agregate, sestavljene iz dveh zloženih dimernih kvadrupleksov, medtem ko $d(G_4C_2)_3$ in $d(G_4C_2)_4$ tvorita multimere, ki ustrezajo sedmim zloženim intramolekularnim kvadrupleksom. Preučili smo tudi odvisnost $d(G_4C_2)_n$ od koncentracije in ugotovili, da na dinamiko $d(G_4C_2)_n$ sekvenc v raztopinah močno vpliva njihova polielektrolitska narava. V visoko koncentriranih vodnih raztopinah ($c > 50$ mM) so vse sekvence pokazale obsežno orientacijsko urejenost kvadrupleksnih struktur in tvorbo kolumnarnih tekočokristalnih (TK) faz. Polarizacijska optična mikroskopija je razkrila širok spekter tekstur TK (Slika 1), ki segajo od tistih, ki so jih prej opazili pri kratkih dupleksih DNK, do nekaterih, ki so značilne za kratke kvadruplekse [4]. Poleg tega je bila ugotovljena povezava med različnimi TK fazami in dolžino agregatov. Slednje je značilnost za kromonične TK sisteme, kjer tvorbo nadzira ne le temperatura, ampak tudi koncentracija raztopine in obseg interakcij zlaganja.



Slika 1: Kolumnarna tekočokristalna faza DNK zaporedja $d(G_4C_2)$ (levo) in $d(G_4C_2)_4$ (desno), vizualizirana s polarizacijsko optično mikroskopijo pri prekrizanih polarizatorjih.

- [1] DeJesus-Hernandez, M.; et al.; *Neuron* **72**, 245-256 (2011).
- [2] Renton, A. E. et al.; *Neuron* **72**, 257-268 (2011).
- [3] Potrč, M. et al.; *Int. J. Mol. Sci.* **22**, 4532 (2021).
- [4] Nakata, M. et al.; *Science* **318**, 1276-1279 (2007).

Uporaba metode fizijskih matrik za izračun transporta nevtronov v jedrskem reaktorju

Anže Pungerčič¹ in Luka Snoj^{1,2}

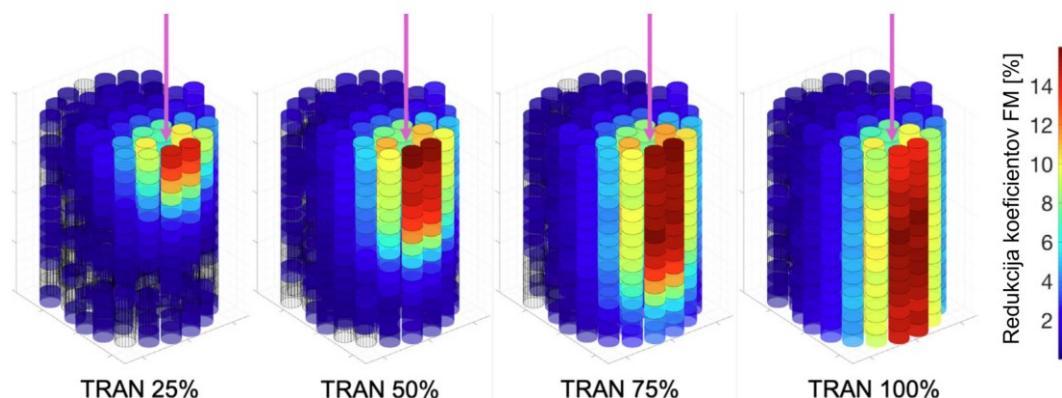
1. Odsek za reaktorsko fiziko, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Poznavanje fizikalnih parametrov delovanja jedrskega reaktorja je ključno za zagotavljanje varnega in učinkovitega obratovanja. Za izračun le-teh uporabljamo različne programe, ki stohastično ali numerično rešujejo transportno enačbo za nevtrone. Reševanje slednje je kljub redukciji problema (diskretizacija po prostoru, energiji, časovno neodvisne simulacije) izjemno računsko zahtevno. Razviti sta dve veji transportnih preračunov: reševanje sistema enačb reduciranega in diskretiziranega faznega prostora (t.i. deterministične metode) in metode za transport delcev Monte Carlo, ki bazirajo na statističnih metodah, pri čemer so podvržene negotovosti rezultatov [1]. Nobena od metodologij ne omogoča izračuna oz. posodabljanja teh parametrov z visoko ločljivostjo in natančnostjo na časovni skali sekund.

Z razvojem računskih zmogljivosti in Monte Carlo metode, je bila omogočena uporaba metode fizijskih matrik [1], ki problem razdeli na dva dela. V prvem delu se z upoštevanjem natančne geometrije izvede Monte Carlo transport delcev za določitev sklopitve med cepitvenimi regijami (t.i. koeficienti fizijske matrike). V drugem delu se v zelo hitrem času izvede izračun linearnega seta enačb fizijske matrike, kar privede do zmožnosti 3D preračunov v nekaj sekundah. Metoda omogoča izračun fluksa in spektra nevtronov, reakcijske hitrosti fisije, konične faktorje, kinetičnih parametrov reaktorja in zgorelosti goriva.

Metoda fizijskih matrik je bila v zadnjih letih validirana na več eksperimentih opravljenih na raziskovalnem reaktorju TRIGA, Inštituta Jožef Stefan (IJS) [2,3]. Poleg izračunov prerazporeditve nevtronskega fluksa pri vstavljanju kontrolnih palic (Slika 1), je bila metoda uporabljena za 3D izračun kinetičnih parametrov reaktorja in določitev zgorelosti gorivnih elementov. Rezultati nakazujejo ohranjanje natančnosti Monte Carlo metode s pohitritvami izračunov za faktor 100.



Slika 1: Redukcija koeficientov FM pri vstavljanju tranzientne (TRAN) kontrolne palice v raziskovalni reaktor TRIGA na IJS [2].

[1] Haghghat, Alireza. *Monte Carlo methods for particle transport*. Crc Press, 2020.

[2] Mascolino, Valerio, et al. *Annals of Nuclear Energy* 166 (2022): 108711.

[3] Pungerčič, Anže, et al. *Nuclear Engineering and Technology* 55.10 (2023): 3732-3753.

Naslednja generacija hitrega pozitronskega tomografa s časom preleta

Gašper Razdevšek¹, Rok Dolenc^{1,2}, Matic Orehar² in Rok Pestotnik¹

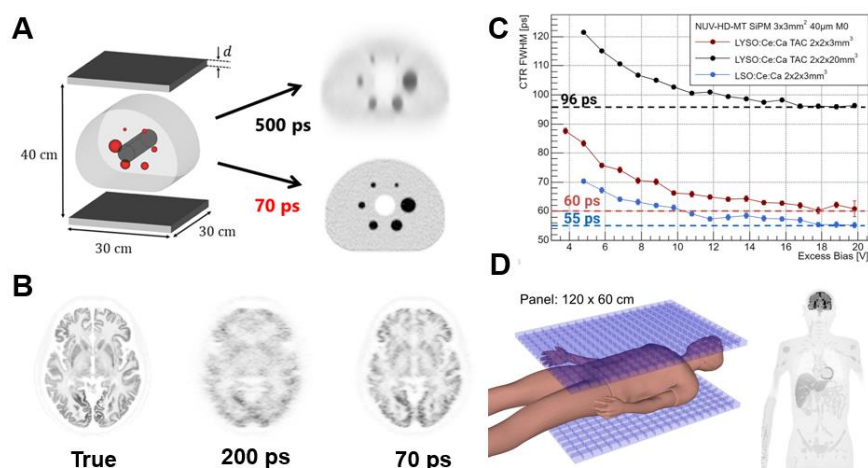
1. Eksperimentalna fizika osnovnih delcev F9, IJS, Ljubljana

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Med molekularnimi slikovnimi tehnikami za neinvazivno študijo fiziologije, metabolizma in molekularnih poti pri ljudeh je pozitronska emisijska tomografija (PET) najbolj občutljiva in specifična. Pri PET preiskavi se v telo pacienta vbrizga radiofarmak, ki razpade z oddajanjem pozitronov. Tehnika PET slikanja temelji na zaznavanju dveh koincidenčnih, nasprotno potujočih visokoenergijskih (511 keV) fotonov, ki nastaneta pri anihilaciji pozitrona z elektroni v telesu. Zaznavanje teh fotonov PET-u omogoča natančno določanje koncentracije radiofarmaka v različnih delih telesa. PET je ključna klinična preiskava v onkologiji, kardiologiji in nevrologiji.

Na IJS F9 nam je uspelo pridobiti projekt Evropskega sveta za inovacije Pathfinder Open. Gre za petletni projekt v vrednosti 3,4 milijona evrov, katerega cilj je razvoj naslednje generacije hitrega pozitronskega tomografa s časom preleta, imenovanega PetVision. V okviru projekta razvijamo izjemno hitre PET detektorje, katerih cilj je doseči koincidenčno časovno ločljivost približno 70 ps (Slika 1), kar je znatno bolje od najboljših kliničnih skenerjev, ki dosegajo približno 200 ps. Izboljšana časovna ločljivost izboljšuje razmerje signal-šum, poleg tega pa omogoča rekonstrukcijo brez artefaktov ali popačenja slike, tudi kadar ne zajamemo projekcij iz vseh smeri oziroma pri polnem kotnem pokritju [1].

Razvijamo napravo z nepolnim kotnim pokritjem, sestavljeno iz panelnih detektorjev (Slika 1). Glavna prednost panelnih detektorjev je njihova prilagodljivost in modularnost, kar omogoča sestavo stroškovno učinkovitih skenerjev z dolgim aksialnim vidnim poljem s kombinacijo več panelov [2]. Ta prilagodljivost, skupaj z mobilnostjo, odpira nove možnosti uporabe, kot je slikanje v sedečem ali stoječem položaju, kar omogoča večje udobje med preiskavami in izboljšuje dostopnost za bolnike z omejeno gibljivostjo. Poleg tega odprta geometrija omogoča dostop do pacienta, kar je še posebej uporabno pri biopsiji ali protonski terapiji ter pri slikanju v enotah intenzivne nege.



Slika 1: (A) Odlična koincidenčna časovna ločljivost omogoča slikanje s panelnimi detektorji. (B) Monte Carlo simulacija vpliva časovne ločljivosti na kvaliteto slike. (C) Eksperimentalna meritev časovne ločljivosti z različnimi kristali. (D) Panelni detektorji lahko odprejo pot do cenovno dostopnih skenerjev z dolgim aksialnim vidnim poljem.

[1] G. Razdevšek et al., IEEE TRPMS 6(6), 721 (2022)

[2] M. Orehar et al., Diagnostics, 14(17), 1976 (2024)

Vloga medceličnega trenja pri kolektivnem gibanju celic

Jan Rozman¹, Chaithanya K. V. S.², Julia M. Yeomans¹ in Rastko Sknepnek^{2,3}

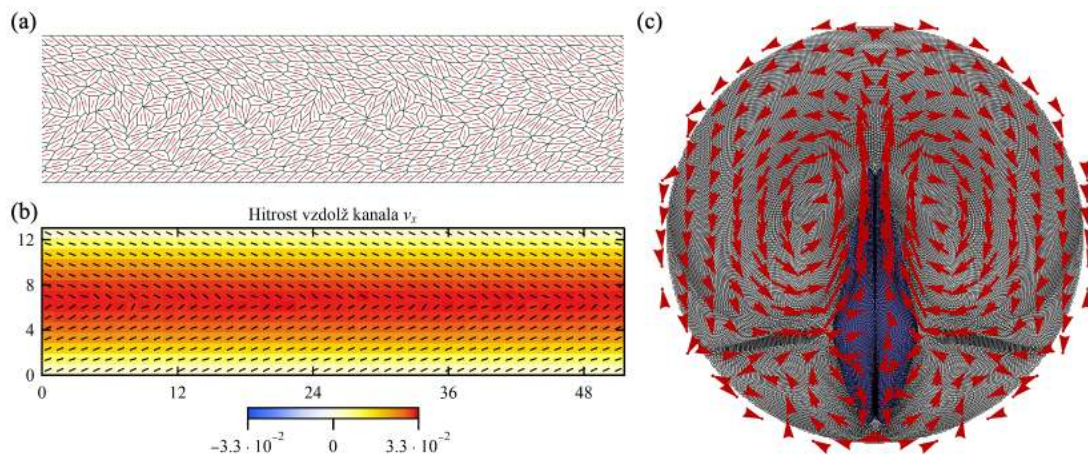
1. Rudolf Peierls Centre for Theoretical Physics, University of Oxford, Oxford, Združeno kraljestvo

2. School of Life Sciences, University of Dundee, Dundee, Združeno kraljestvo

3. School of Science and Engineering, University of Dundee, Dundee, Združeno kraljestvo

Kolektivno gibanje celic preko razdalj, mnogo daljših od velikosti posamezne celice, ima ključno vlogo v mnogih bioloških procesih. Med razvojem piščančjega zarodka je npr. bistven dogodek nastanek dveh vrtničastih tokov, ki vključujeta skoraj celoten zarodek z okoli 100 000 celicami. Hkrati je vse več dokazov, da imata nematski red in nematska aktivnost celic pomembno vlogo pri dinamiki epiteljskih tkiv [1,2].

Tu se posvetimo ogliščnemu modelu epiteljskega tkiva v kanalu, ki vključuje tudi nematsko aktivnost celic [3]. Dinamika teoretičnih mehanskih modelov tkiv, ki razločijo posamezne celice, skoraj vedno izvira iz ravnovesja med trenjem s podlago in ostalimi silami. Pokažemo, da je za kolektivno gibanje vzdolž kanala ključno redko upoštevano medcelično trenje, ki omogoči nastanek korelacij dolgega dosega v tkivu, medtem ko trenje s podlago takšne korelacije uniči in s tem prepreči kolektivno gibanje (slika 1a,b) [4]. Naposled na osnovi medceličnega trenja in nematske aktivnosti oblikujemo mehanski model zgodnjega razvoja piščančjega zarodka (slika 1c).



Slika 1: (a) Ogliščni model epitelija v kanalu. (b) Povprečna hitrost celic vzdolž kanala. (c) Mehanski model zgodnjega razvoja piščančjega zarodka.

[1] T. B. Saw *et al.*, Nature **544**, 212 (2017).

[2] L. Balasubramaniam *et al.*, Nat. Mater. **20**, 1156 (2021).

[3] S.-Z. Lin, M. Merkel in J.-F. Rupprecht, Phys. Rev. Lett. **130**, 058202 (2023).

[4] J. Rozman, Chaithanya K. V. S., J. M. Yeomans in R. Sknepnek, arXiv:2312.11756 (2023).

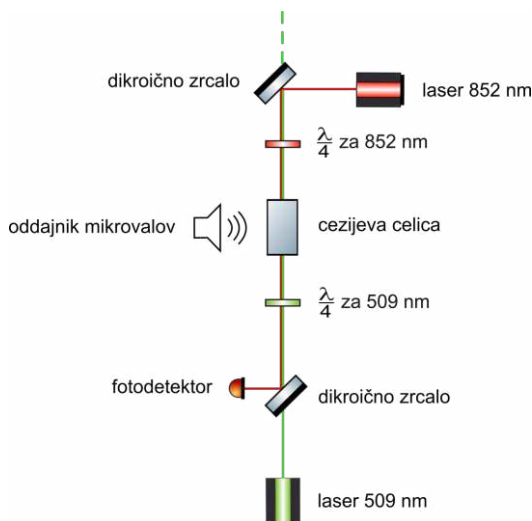
Spektroskopija Rydbergovih atomov

Ema Stopar^{1,2}, Katja Gosar^{1,2}, Jure Pirman^{1,2}, Erik Zupanič¹ in Peter Jeglič¹

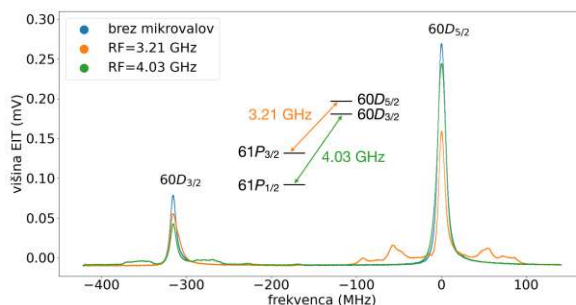
1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

Rydbergovi atomi imajo zunanji elektron vzbujen v stanje z visokim glavnim kvantnim številom n . Ta stanja imajo relativno dolge življenjske čase (reda mikrosekund) in so hkrati občutljiva na elektromagnetna polja. Zaradi teh lastnosti imajo velik potencial za uporabo v kvantnih senzorjih, prav tako pa zaradi dolgega doseg medsebojnih interakcij predstavljajo pomembno platformo za kvantne simulatorje.

Za spektroskopijo Rydbergovih stanj uporabljamo celico s cezijevo paro pri sobni temperaturi in laserska snopa valovnih dolžin 852 nm (signalni žarek) in 509 nm (kontrolni žarek). Visoko vzbujena elektronska stanja detektiramo z metodo elektromagnetno inducirane transparentnosti (EIT), pri čemer merimo prepustnost signalnega žarka skozi celico v odvisnosti od frekvence kontrolnega žarka. Transparentnost (t. j. višina EIT vrha) je odvisna od morebitne prisotnosti in lastnosti mikrovalov, kar lahko izkoristimo za njihovo zaznavanje. Izmerili smo višino EIT vrha v odvisnosti od frekvence mikrovalov in opazili, da se ta najbolj zmanjša, ko frekvenca mikrovalov ustreza frekvencam prehodov v sosednja Rydbergova stanja. Tako obnašanje je mogoče izkoristiti za razvoj občutljivih detektorjev mikrovalov.



Slika 1: Shema postavitve eksperimenta.



Slika 2: Prepuštnost signalnega žarka v odvisnosti od frekvence kontrolnega žarka za tri primere: brez mikrovalov, z mikrovalovi s frekvenco 3.21 GHz in z mikrovalovi s frekvenco 4.03 GHz. Vrh, ki ustreza EIT na stanju $60D_{5/2}$, se zmanjša in spremeni obliko pri frekvenci mikrovalov, ki ustreza prehodu iz stanja $60D_{5/2}$ v stanje $61P_{3/2}$. Podobno se spremeni vrh, ki pripada stanju $60D_{3/2}$, pri frekvenci mikrovalov, ki ustreza prehodu iz stanja $60D_{3/2}$ v stanje $61P_{1/2}$.

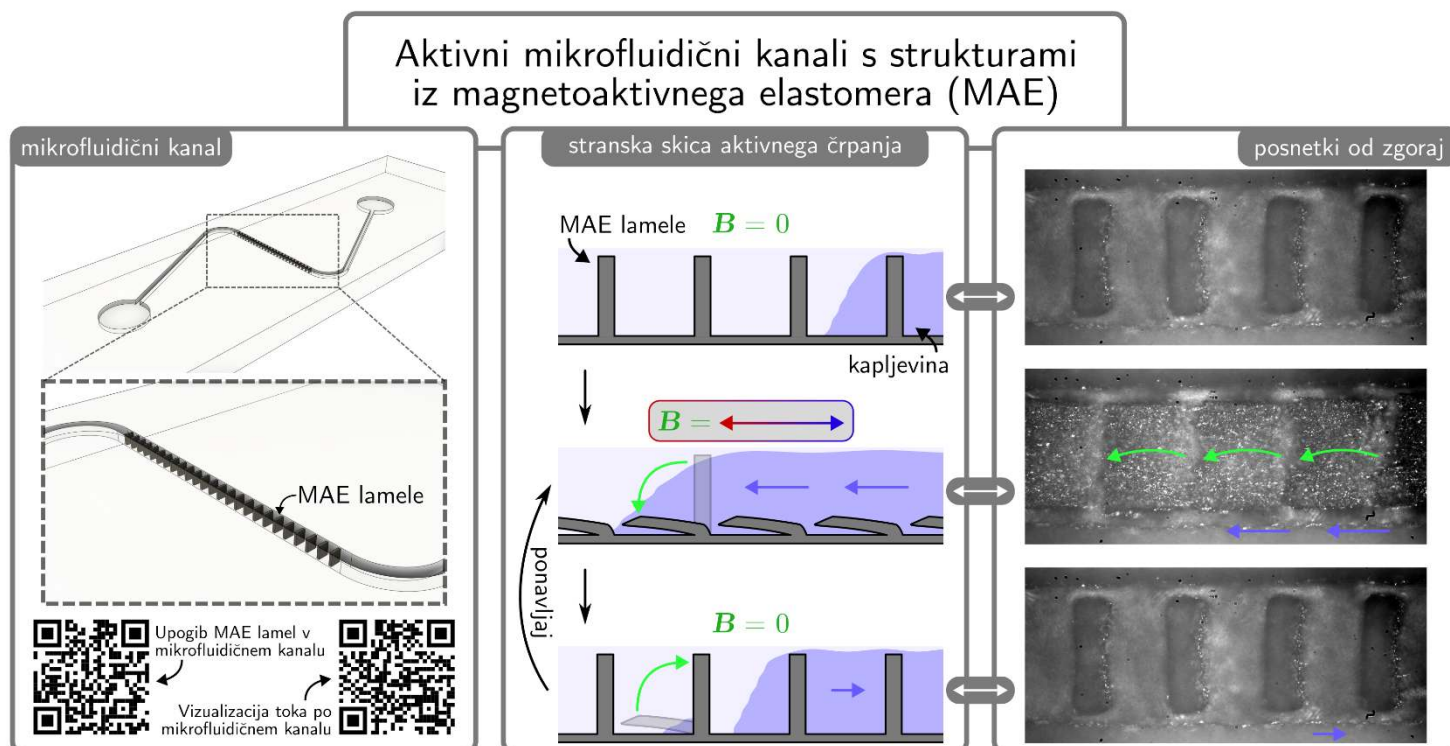
Aktivni mikrofluidični kanali s komponentami iz magnetoaktivnega elastomera (MAE)

Izidor Straus¹, Gašper Kokot¹, Vasja Ilijaš¹, Gaia Kravanja², Luka Hribar², Raphael Kriegl³, Matija Jezeršek², Mikhail Shamonin³, Irena Drevenšek Olenik^{1,4}

1. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
2. Fakulteta za strojništvo, UL, Ljubljana
3. East Bavarian Centre for Intelligent Materials (EBACIM), OTH, Regensburg
4. Institut Jožef Stefan, Odsek za kompleksne snovi F7, Ljubljana

Mikrofluidika omogoča natančno manipulacijo majhnih količin tekočin v mikrometrskih kanalih, kar je ključno za napredne aplikacije, kot so medicinska diagnostika, biokemijske analize in razvoj novih materialov. Pomemben izziv na tem področju je zasnova prilagodljivih, nadzorovanih mikrofluidičnih komponent, ki omogočajo natančno krmiljenje in doziranje tekočin.

Naša raziskava se osredotoča na mikrofluidične komponente iz magnetoaktivnih elastomerov (MAE), ki vsebujejo magnetne mikro- in nanodelce. Te elemente izdelujemo z laserskim strukturiranjem in jih krmilimo z zunanjim magnetnim poljem. MAE mikrofluidični elementi ponujajo več ključnih prednosti: med delovanjem se ne segrevajo, omogočajo transport univerzalnih tekočin brez dodanih ionov ter so skalabilni, saj jih je enostavno povečati ali celo pomanjšati z laserji visoke ločljivosti. Trenutno razvijamo aktivne mikrofluidične kanale, ki s pomočjo magnetnih pulzov in upogibanjem MAE lamel, generirajo tokove brez zunanje tlačne razlike.



Slika 1: Magnetoaktiven elastomer je vnešen v mikrofluidične kanale iz PDMS-ja in nato strukturiran z nanosekundnim pulznim laserjem. Lamelarne strukture se upogibajo v magnetnem polju in generirajo tokove znotraj kanala.

Ultrahitro optično preklapljanje magnetne anizotropije v heterostrukturi Pt/Co/H₂Pc

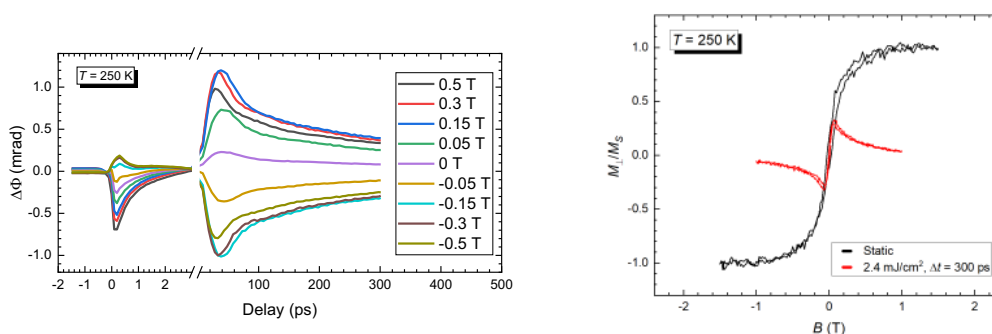
Jaka Strohsack¹, Servet Ozdemir², Hari Babu Vasili², Oscar Cespedes², Tomaž Mertelj^{1,3}

1. Odsek za kompleksno snov, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana
2. School of Physics and Astronomy, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, United Kingdom
3. Center odličnosti nanoznanosti in nanotehnologije, Jamova 39, 1000 Ljubljana

Stiki 3d feromagnetnih kovin (Fe, Co, Ni) z organskimi molekularnimi polprevodniki so iz aplikativnega vidika zanimivi zaradi njihove potencialne rabe v spintroniki. Hibridizacija orbital p organskih molekul z orbitalami d feromagneta, močno spremeni magnetne in elektronske lastnosti molekul in kovine na stiku. Zelo izrazita je sprememba magnetne anizotropije [1]. Ta sprememba je močno odvisna od temperature, kar smo opazovali v heterostrukturi Pt/Co/H₂Pc. Poleg stika z molekulami (H₂Pc - ftalocianin), je v tej heterostrukturi kobalt v stiku tudi s platino (Pt), ki zaradi močne sklopitve spin-tir poveča pravokotno magnetno anizotropijo kobalta [2]. Zaradi različne temperaturne odvisnosti vplivov, je lahko ob primerni izbiri debeline kobalta, smer lahke osi anizotropije (magnetizacije) v kobaltu (v ravnini filma oz. pravokotno nanjo) temperaturno odvisna.

Raziskovali smo heterostrukturo Pt (4 nm)/Co (1.4 nm)/ H₂Pc (20 nm)/Cu (15 nm). Z meritvami magneto-optičnega Kerrovega pojava smo merili temperaturno odvisnost odvisnosti pravokotne komponente magnetizacije od jakosti zunanega magnetnega polja. Merili smo tudi dinamiko magnetizacije v časovni domeni s časovno ločljivo magneto-optično Kerrovo spektroskopijo.

Opazovali smo dinamiko magnetizacije pri temperaturah v bližini njenega prehoda iz ravninske v pravokotno ($T = 200 \text{ K} - 300 \text{ K}$). V tem temperaturnem območju smo opazili, da se po vzbuditvi sistema z ultrakratkim ($\sim 50 \text{ fs}$) laserskim sunkom magnetizacija najprej zmanjša na časovni skali $\sim 1 \text{ ps}$, nato pa se njena pravokotna komponenta povečuje na skali 50-500 ps. Največja opažena sprememba je bila izmerjena pri $T = 250 \text{ K}$, kjer znašala $\sim 34 \%$ saturirane magnetizacije.



Slika 1: Časovna odvisnost rotacije magnetizacije po vzbujevalnem sunku pri $T = 250 \text{ K}$ in različnih zunanjih magnetnih poljih (levo). Odvisnost pravokotne komponente magnetizacije in njena največja sprememba (desno).

[1] M. Benini *et al.*, *Advanced Materials Interfaces* 9, 2201394 (2022)

[2] T. Sugimoto *et al.*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 104–107, 1845 (1992)

Izvor prepletenih fotonov na osnovi nelinearnega kristala

Gaja Šalamun^{1,2}, Izidor Benedičič¹, Peter Lekše^{1,2}, Tilen Knaflič¹, Adrian Udovičič²,
Žiga Pušavec², Lara Ulčakar^{2,3}, Rainer Kaltenbaek², Erik Zupanič¹ in Peter Jeglič¹

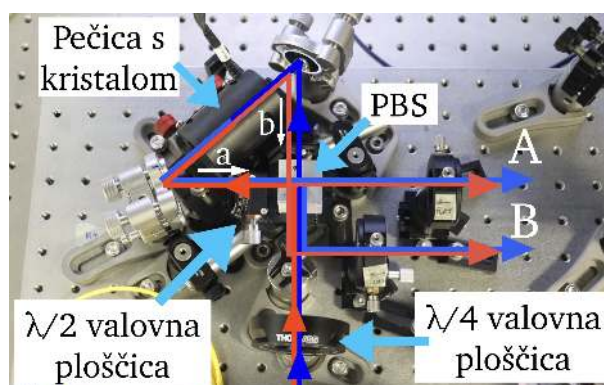
¹Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

²Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

³Odsek za teoretično fiziko, IJS, Ljubljana

Kvantna komunikacija uporablja kubite, zapisane v fotonih, za prenos informacij preko dolgih razdalj, pri čemer izkorišča njihovo sposobnost ohranjanja stanja superpozicije in majhnih izgub v optičnih vlaknih. Ponuja nam varen prenos podatkov preko protokolov, kot sta kvantna distribucija ključev in teleportacija kvantnega stanja, saj načela kvantne mehanike preprečujejo dostop do njene informacije ali njeno kloniranje, ne da bi posegli v kvantno stanje. Stanja lahko zapišemo v polarizaciji fotona, katera kasneje povežemo s klasičnimi biti 0 in 1 [1].

Za izvor prepletenih fotonov lahko uporabimo Sagnacov interferometer, v katerega postavimo nelinearni kristal, skozi katerega pošljamo laserski žarek z valovno dolžino $\lambda = 780$ nm (slika 1). Po vstopu fotona v nelinearen kristal, v katerem pri danih pogojih poteka proces SPDC tipa 2, lahko na izhodu dobimo dva fotona z manjšima energijama, katerih vsota je zaradi ohranitve energije enaka energiji prvotnega fotona, in z med seboj pravokotno polarizacijo [1]. Do prepletenega stanja pridemo tako, da laserski žarek, ki je koherentna superpozicija horizontalne $|H\rangle$ in vertikalne $|V\rangle$ polarizacije, razdelimo na polarizacijskem delilniku svetlobe (PBS). Veji svetlobe gresta skozi kristal v nasprotnih smereh (a in b), kjer nastaneta dva para različno polariziranih fotonov, ki se po končani zanki srečajo v PBS-u. Na izhodih A in B dobimo maksimalno prepletena Bellova stanja, na primer $|\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_A |V\rangle_B - |V\rangle_A |H\rangle_B)$ [2]. Postavitev izvora prepletenih fotonov je del aktivnosti na projektu SiQUID, katerega namen je postavitve eksperimentalne mreže med IJS in FMF za kvantno izmenjavo ključa in testiranje novih protokolov za kvantne komunikacije (<https://siquid.fmf.uni-lj.si/>).



Slika 1: Fotografija postavitev izvora. Modra črta predstavlja fotone s polarizacijo $|H\rangle$, ki se v kristalu spremenijo v pare $|H\rangle_1$ in $|V\rangle_1$, ki se nato ločijo na PBS-u. Rdeča črta predstavlja fotone s polarizaciji $|V\rangle$, ki jih $\lambda/2$ valovna ploščica najprej spremeni v $|H\rangle$. Ti se v kristalu spremenijo v pare fotonov s polarizacijo $|H\rangle_2$ in $|V\rangle_2$, ki jih PBS na koncu loči.

[1] M. Hajdjušek in R. Van Meter, *Quantum Communications*, arXiv:2311.02367v1, 2023.

[2] D. R. Hamel, *Realization of novel entangled photon source using periodically poled materials*. Master's thesis. University of Waterloo, 2010.

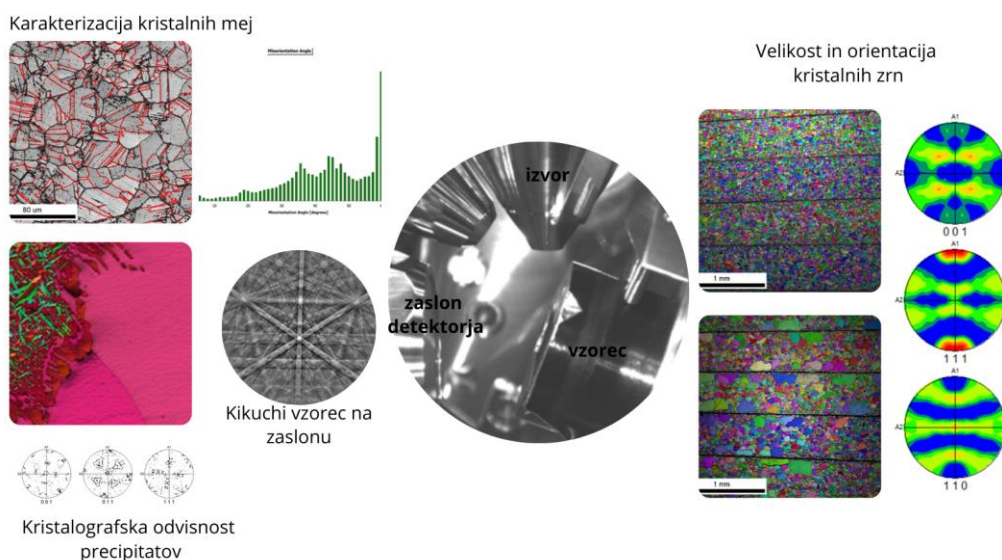
Uklon povratno sipanih elektronov (EBSD Electron Backscatter Diffraction) v preiskavah kovinskih materialov

Barbara Šetina Batič¹

1. Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, IMT, Ljubljana

Uklon povratno sipanih elektronov (EBSD, electron backscatter diffraction) je eksperimentalna metoda, ki se uporablja v vrstičnem elektronskem mikroskopu (SEM) za preučevanje kristalnih lastnosti materialov. Pri tej analizi se med interakcijo vzorca in fokusiranega elektronskega snopa generirajo povratno sipani elektroni, ki se pod določenimi geometrijskimi pogoji uklanjajo in formirajo difrakcijski vzorec, t.i. Kikuchi vzorec, ki ga zajamemo na zaslonu. Z avtomatski postopki indeksiranja tega vzorca (običajno jih zagotavljajo proizvajalci opreme) lahko tako določimo kristalno fazo in orientacijo v posameznem delu vzorca. Ker med postopkom elektronski snop skeniramo po površini, dobimo sliko kristalnih orientacij in posameznih kristalnih faz. Z računskimi postopki pa lahko določimo med drugimi tudi nepravilnosti v kristalni strukturi, porazdelitev orientacij (kristalno teksturo), karakteristike mej med zrn, velikost in obliko kristalnih zrn, deformacije v kristalni strukturi, stopnjo rekristaliziranosti in še mnogo drugih značilnosti.

Na primerih, med katerimi bodo študija oksidne plasti na jeklu, preiskave deformacije avstenitnega nerjavnega jekla med valjanjem in analiza kristalne teksture elektroplöčevine, bom predstavila uporabo metode v preiskavah raznih kovinskih materialov.



Slika 1: Shematski prikaz analize EBSD.

Frustrirane dipolne rešetke v ograjeni plasti nematika

Uroš Tkalec^{1,2,3}, Simon Čopar⁴, Ufuoma Kara⁵, Boyuan Chen⁵ in Xiaoguang Wang⁵

¹ Inštitut za biofiziko, Medicinska fakulteta, UL, Ljubljana

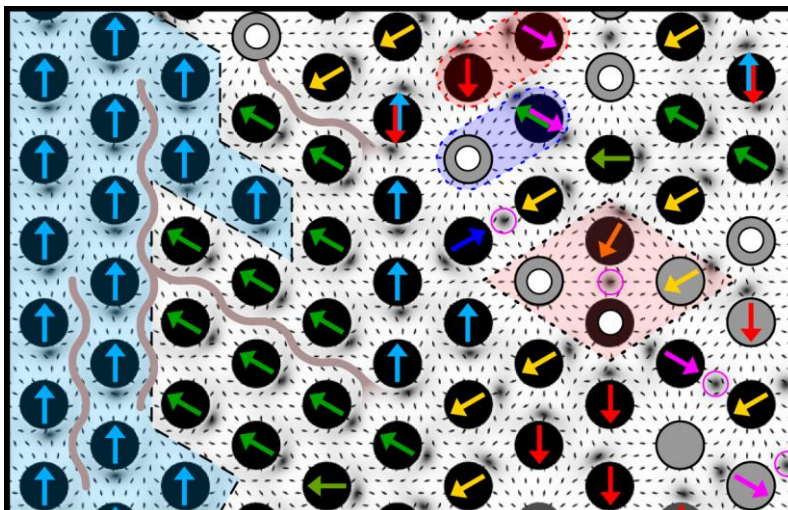
² Fakulteta za naravoslovje in matematiko, UM, Maribor

³ Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

⁴ Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

⁵ The Ohio State University, Columbus, ZDA

Predstavil bom rezultate raziskave o geometrijsko omejeni tanki plasti nematskega tekočega kristala, znotraj katere heksagonalna razporeditev mikrometrskih stebričkov iz silicija s pravokotnim sidranjem povzroči nastanek elastičnih dipolnih defektov. Ti defekti se pod tanko plastjo vode naključno orientirajo in tvorijo vzorce, ki zaradi inducirane polarne simetrije spominjajo na spinsko steklo. Premikanje kapljice vode na stiku z nematikom v omenjeni ogradi tvori povzroči reorientacijo elastičnih dipolov pod vplivom strižnih sil, kar omogoča shranjevanje informacij o smeri premikov kapljice. Tako v nematiku nastanejo urejene domenske strukture, podobne tistim, ki se na različnih prostorskih skalah pojavljajo v sistemih s polarnim redom, kot so feromagnetni, aktivne snovi in metamateriali. Posebnost tega večstabilnega sistema je odsotnost energijsko najugodnejših konfiguracij, ki jih je zaradi kolektivnih dipolnih interakcij kratkega doseganja težko doseči. Dobljeni rezultati odpirajo nove možnosti za razvoj naprednih mehkih materialov, ki lahko s pomočjo optičnih posnetkov polarnih tekstur zaznavajo in spremljajo tokovne profile na mikroskali. Teoretična analiza takih sistemov je bila nedavno objavljena [1], eksperimentalna študija pa je v pripravi za objavo [2].



Slika 1: Elastični dipoli v nematskem tekočem kristalu, ki ga ograjuje heksagonalna mreža stebričkov. Dipol tvorita stebriček (črni ali sivi krožci) in pripadajoči topološki defekt (siva točka v direktorskem polju), njegovo orientacijo v ravnini pa označuje barvna puščica. Nekateri stebrički so brez defektov (beli krožci), drugi pa imajo zaradi ohranitve topološkega naboja ob strani kar dva defekta.

[1] S. Čopar, Ž. Kos, *Soft Matter* **20**, 6894 (2024).

[2] U. I. Kara, B. Chen, S. Čopar, S. Li, R. Mamtani, X. Yang, E. Boerner, Z. Yang, A. H. Weible, Y. Yao, R. L. B. Selinger, U. Tkalec, X. Wang, *bo objavljeno*.

Samoojačevanje spontane emisije iz dvojno vzbujenih helijevih atomov

Janez Turnšek¹, Špela Krušič¹, Andrej Mihelič¹, Klemen Bučar¹, Emiliano Principi³, Michele Di Fraia³, Kevin Charles Prince³, Marcello Coreno³, Carlo Callegari³, Oksana Plekan³, Andrei Benediktovitch⁴, Laurent Mercadier⁵, Caterina Vozzi⁶, Rebeca Martinez Vazquez⁶, Anna Gabriella Ciriolo⁷ in Matjaž Žitnik^{1,2}

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

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana

3. Elettra Sincrotrone Trieste ScpA, Trst, Italija

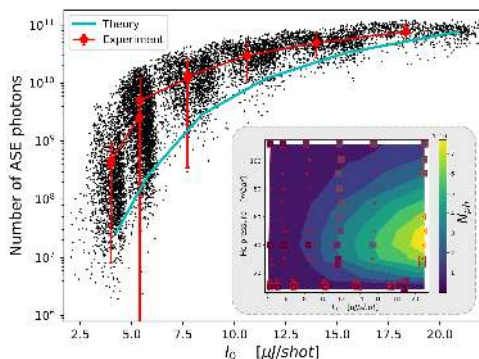
4. Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Nemčija

5. European XFEL GmbH, Schenefeld, Nemčija

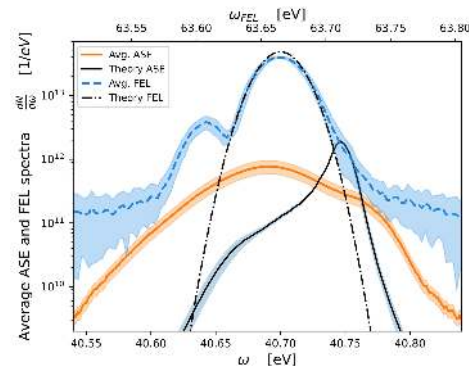
6. CNR - Institute for Photonics and Nanotechnologies, Rim, Italija

7. Politecnico di Milano - Dipartimento di Fisica, Milano, Italija

Na žarkovni liniji EIS-TIMEX na Fermi FEL v Bazovici pri Trstu smo izvedli prvo meritev ojačane spontane emisije (ASE) iz atomov helija v dvojno vzbujenem stanju. Helij v osnovnem stanju smo z močnimi, 50 fs dolgimi sunki svetlobe z valovno dolžino 19.475 nm resonančno dvigovali v dvojno vzbujeno stanje $3^+ 1P^o$, ki leži nad prvim pragom za ionizacijo in ima življenjski čas 80 fs [2]. Daleč največji delež tako vzbujenih atomov razpade z avtoionizacijo, se pravi z emisijo elektrona, razvejitevno razmerje za spontani fluorescenčni razpad pa je zgolj $6 \cdot 10^{-4}$. To močno oteži sposobnost za samoojačanje tega signala v helijevem plinu preko procesa stimulirane emisije. Kljub temu smo ASE signal iz prehoda $3^+ 1P^o \rightarrow 1s3s 1S^e$, uspešno zaznali. Energija fotonov ASE je bila 40.74 eV, kar ustreza valovni dolžini 30.4 nm. Dovolj visoko gostoto plina smo zagotovili s posebno mikrofluidno celico z odprtima koncema, ki je omogočila neoviran prehod vzbujevalnega in ASE žarka skozi 7 mm dolgo homogeno območje helija s tlakom, ki smo ga lahko navili do 115 mbar. Za opis eksperimenta je bil razvit tudi teoretični model izseva ASE [3]. Pri 40 mbar helija smo v povprečju izmerili $(4.1 \pm 1)\%$ učinkovitost pretvorbe vpadne svetlobe v ASE. Poleg meritve ASE izseva smo opazovali tudi v prečni smeri izsevano fluorescenco v vidnem področju, pri kateri smo prav tako opazili zanimive posledice močnega vzbujanja.



Slika 1: Odvisnost ASE izseva od energije vpadnega sunka svetlobe.



Slika 2: Primerjava spektrov ASE in FEL s teorijo.

[1] E. Allaria et. al., Nature Photonics **6**, 699 (2012)

[2] J. Söderström et. al., Physical review A **77**, 012514 (2018)

[3] Š. Krušič et. al., Physical review A **107**, 013113 (2023)

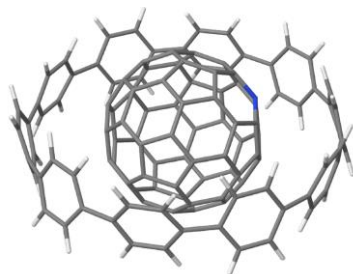
Preučevanje inkapsulacije azafulerenskih radikalov z vrstičnim tunelskim mikroskopom

Marion A. van Midden Mavrič¹, Yuri Tanuma^{1,2}, Gregor Kladnik^{3,4}, Luca Schio⁴, Gregor Bavdek^{4,5}, Erik Zupanič¹, Bastien Anézo^{1,6}, Ioanna K. Sideri⁷, Nikos Tagmatarchis⁷, Jannis Volkmann^{8,9}, Hermann A. Wegner^{8,9}, Andrea Goldoni¹⁰, Chris Ewels², Alberto Morgante^{4,11}, Luca Floreano⁴, Denis Arçon^{1,3}, Dean Cvetko^{1,3,4}

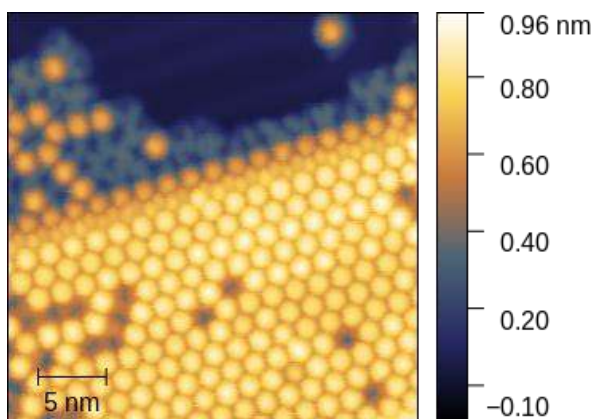
1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana
2. CAREM, Hokkaido University, Sapporo, Japonska
3. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana
4. CNR-IOM, Trst, Italija
5. Pedagoška fakulteta, UL, Ljubljana
6. IMN, Nantes University, Nantes, France
7. Theoretical and Physical Chemistry Institute, Atene, Grčija
8. Center for Materials research, Giessen, Nemčija
9. Institute of Organic Chemistry, Justus Liebig University, Giessen, Nemčija
10. Sinhrotron Elettra, Trst, Italija
11. Physics Department, University of Trieste, Italija

Spin prostega elektrona organskega radikala bi lahko uporabili kot qubit. Ker je možno relativno enostavno sintetizirati veliko število enakih molekul, te pa se na ustrezni površini samourejajo, imajo taki sistemi potencial, da bi lahko z njimi dosegli večja števila qubitov urejenih v mreže. Glavna težava je nestabilnost molekulskih radikalov, saj so običajno izjemno reaktivni. Ena od možnosti za stabilizacijo molekulskih radikalov na površini je tudi izbira ustreznih molekul s katerimi zaščitimo prosti elektron.

Primer obetavnih molekulskih radikalov so azafulereni C59N[•]. Pokazali smo že, da lahko v vakuumu na površino naparimo posamezne molekulske radikale, ter s pomočjo izračunov določili spektroskopski odtis radikalnega stanja C59N[•] na površini Au(111) [1]. V prispevku bomo predstavili kako lahko s pomočjo inkapsulacije molekul C59N[•] v nano-obroče [10]-CPP spin prostega elektrona dodatno zaščitimo ter pokazali, da lahko prek samourejanja nano-obročev dobimo velika urejena območja supramolekularnih kompleksov C59N[•]@[10]CPP [2].



Slika 1: Model inkapsuliranega azafulereana C59N[•] v nanoobroču [10]CPP.



Slika 2: Slika površine Au(111) na kateri se samourejajo nanoobroči [10]CPP z inkapsuliranimi radikali C59N[•].

[1] Y. Tanuma et al., ACS Nano 17 (24), 2023.

[2] G. Kladnik, L.Schio, G. Bavdek et al., poslano v objavo, 2024.

Liha viskoznost v aktivnih tekočinah

Andrej Vilfan¹, Yuto Hosaka² in Ramin Golestanian²

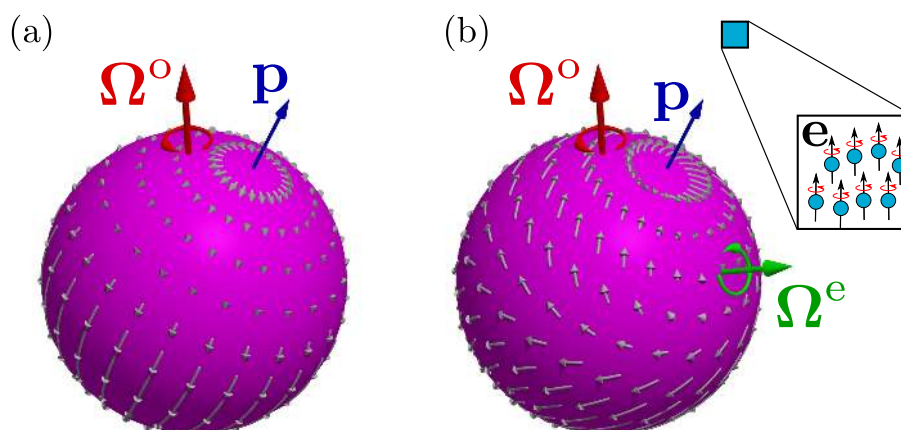
1. Odsek za fiziko trdne snovi, IJS, Ljubljana

2. Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization, Göttingen, Germany

Liha viskoznost je lastnost tekočin, pri kateri npr. stisk vzdolž osi x povzroči strižno silo v smeri osi y , stisk vzdolž osi y pa strižno silo v smeri $-x$. Ker je tak odziv v nasprotju z Onsagerjevimi relacijami, je možen le v aktivnih tekočinah s stalnim zunanjim dovodom energije [1]. Primer tovrstnih aktivnih kiralnih tekočin so koloidne suspenzije z vrtečimi delci, ki jih poganja vrteče se zunanje magnetno polje.

Lorentzov teorem recipročnosti preko integralne identitete poveže dva različna hidrodinamska problema in tako pogosto omogoča indirektno rešitev enega problema ob poznavanju rešitve drugega. Tako lahko na primer gibanje aktivnega mikroplavalca določimo s pomočjo rešitve toka okoli pasivnega telesa iste oblike. Zaradi zloma časovne simetrije Lorentzov teorem v aktivnih tekočinah ne velja. Vendar smo pokazali, da ga lahko ob pravilni izbiri pomožnega problema posplošimo tudi na tekočine z liho viskoznostjo [2].

S pomočjo posplošenega Lorentzovega teorema lahko izračunamo trajektorije mikroplavalcev v tekočinah z liho viskoznostjo [3]. Izkaže se, da se objekt, ki na tekočino deluje z dipolno silo, spontano obrne v smeri osi, ki določa liho viskoznost (npr. os vrtenja magnetnega polja) ali pravokotno nanjo. Če pa je plavalec sam po sebi kiralen, se lahko obrne tudi v točno določeno smer.



Slika 1: Mikroplavalec v tekočini z liho viskoznostjo. (a) Osno simetričen plavalec. (b) Plavalec z zlomljeno kiralno simetrijo.

[1] M. Fruchart, C. Scheibner, V. Vitelli, Annual Review of Condensed Matter Physics **14**, 471 (2023)

[2] Y. Hosaka, R. Golestanian, A. Vilfan, Physical Review Letters **131**, 178303 (2023)

[3] Y. Hosaka, M. Chatzitoffi, R. Golestanian, A. Vilfan, Physical Review Research **6**, L032044 (2024)

Ujetje hitrega fotoelektrona pri razpadu vrzeli K

Matjaž Žitnik^{1,2}, Mateja Hrast^{2,3}, Andrej Mihelič^{1,2}, Klemen Bučar^{1,2},
Janez Turnšek^{1,2}, Ralph Püttner⁴, Gildas Goldsztejn⁵, Tatjana Marchenko⁵,
Renaud Guillemin⁵, Loic Journal⁵, Oksana Travnikova⁵, Ilyas Ismail⁵, Maria Novella
Piancastelli⁵, Marc Simon⁵, Denis Ceolin⁶, Matjaž Kavčič^{1,2}

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

2. Fakulteta za matematiko in fiziko, UL, Ljubljana, Slovenija

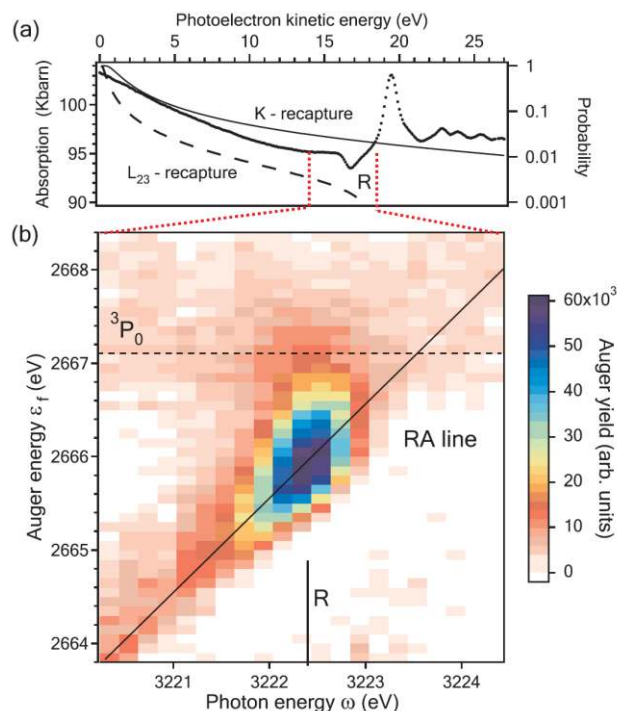
3. Institute of Science and Technology Austria, Avstrija

4. Fachbereich Physik, Freie Universität Berlin, Nemčija

5. Sorbonne Université, LCPMR, Paris, Francija

6. Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, Francija

Nedavno smo zaključili s teoretično obravnavo resonantnega Augerjevega razpada dvojno vzbujenih stanj $1s^{-1}3p^{-1}nl^n'l'$ v argonu in objavili rezultate naše raziskave. Gre za prvo podrobno obravnavo tega procesa, kjer so gornja stanja dvojno vzbujena atomska stanja, v delu pa primerjamo karakteristike nesevalnega razpada s sevalnim razpadom teh stanj, o katerem smo prvi poročali že leta 2009. Podrobnosti razsežne raziskave smo objavili v daljšem članku [1], najzanimivejše nove izsledke pa v povezanem krajšem delu [2]. Mednje gotovo sodi zgodba o ujetju fotoelektrona $1s$, v katero so vpleteni trije elektroni: poleg Augerjevega elektrona pri ujetju fotoelektrona sodeluje še elektron v zunanji lupini argona (Slika 1).



Slika 1. Izmerjeni absorpcijski spekter v okolici stanj $1s^{-1}3p^{-1}nl^n'l'$ v Ar in verjetnost za zajetje fotoelektrona $1s$ iz lupine K (polna črta) in lupine L (črtkana črta). (b) Asimetrična oblika pridelka resonantnih Augerjevih elektronov v bližini resonance $R=1s^{-1}3p^{-1}4s^2$ izdaja ujetje fotoelektrona.

[1] M. Žitnik et al., Physical Review A **108**, 053113 (2023)

[2] M. Žitnik et al., Physical Review Letters **131**, 203001 (2023)



Vabljeni, pridružite se nam

Fotona, pionir na področju medicinskih laserjev, je danes eno izmed vodilnih globalnih podjetij na področju medicinskih laserjev, z lastnimi podjetji v ZDA, Nemčiji, Franciji, na Kitajskem in Japonskem.

Kot zmagovalec nagrade Izvoznik leta in vsako leto eno od petih najbolj uspešnih podjetij v Sloveniji, Fotona svojo rast gradi na inovativnem razvoju in proizvodnji v Ljubljani. Razvojni oddelek zaposluje več kot tretjino doktorjev znanosti zelo različnih področij – fizike, strojništva, elektrotehnike, mikrobiologije in biokemije.

Vabimo vas, da se nam pridružite, če vas navdušujejo izzivi povezani z raziskavami in razvojem naprednih medicinskih naprav. Vaše znanje in ideje so ključnega pomena za izboljšanje kakovosti življenja ljudi. Bodite del naše uspešne zgodbe in skupaj soustvarjamo prihodnost medicinske tehnologije.

kadrovska@fotona.com

www.fotona.si

13. Konferenca fizikov v osnovnih raziskavah

Zbornik povzetkov

Izdala: Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Uredniki: Igor Lengar, Jošt Stergar in Primož Ziherl

Natisnjeno v tiskarni Birografika BORI v nakladi 150 izvodov

Ljubljana, 2024

Brezplačni izvod za udeležence

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

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

53(082)

KONFERENCA fizikov v osnovnih raziskavah (13 ; 2024 ; Brdo pri Kranju)

13. konferenca fizikov v osnovnih raziskavah : zbornik povzetkov : Brdo pri Kranju, 18. november 2024 / [organizatorja Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani [in] Institut Jožef Stefan ; uredniki Igor Lengar, Jošt Stergar, Primož Ziherl]. - V Ljubljani : Fakulteta za matematiko in fiziko, 2024

ISBN 978-961-6619-44-8
COBISS.SI-ID 213669635