

# Najvýznamnejšie výsledky vedeckej práce za rok 2024

## Základný výskum

### **Pozorovanie kvantového prepojenia v top kvarkových pároch pomocou detektora ATLAS**

**Projekty:** MŠVVaM CERN-ATLAS

**Riešitelia:** F. Sopková, P. Stríženec, J. Urbán

V práci [1] bolo publikované prvé pozorovanie kvantového prepojenia medzi dvojicou top a antitop kvarku pri ultrarelativistických energiách a v silných interakciách. Na štúdium daného javu bol vybraný kanál rozpadu, obsahujúci dva nabitú leptóny, elementárne častice, ktoré nemajú schopnosť silnej interakcie. Toto meranie ponúka nové možnosti využitia urýchľovača LHC na študovanie kvantových informácií a ďalších problémov kvantovej mechaniky. Jedinečnosť a dôležitosť tohto merania podporuje aj skutočnosť, že sa kolaborácia ATLAS rozhodla tento objav publikovať v časopise Nature, kde kolaborácia doteraz uverejnila iba jeden článok. Štandardný model elementárnych častíc obsahuje šesť kvarkov, ktoré majú schopnosť silnej (jadrovej) interakcie. V protónovo-protónových zrážkach sa top kvarky produkujú prevažne v páre s antitop kvarkom. Top kvark je extrémne ťažký a nestabilný a rozpadá sa skôr, ako stihne vytvárať viazané stavy s ostatnými kvarkami. Vlastnosti top kvarku preto možno študovať iba prostredníctvom rozpadových produktov, ktoré zachovávajú jeho vlastnosti. Dvojica častíc je kvantovo previazaná, ak kvantový stav jednej častice nie je možné popísať nezávisle od kvantového stavu druhej častice. Hoci je jav kvantového prepojenia známy a meral sa pri malých nerelativistických energiách, problém je vysoko aktuálny. Nobelovu cenu v roku 2022 udelili práve pre túto oblasť výskumu, za štúdium vlastností kvantovo previazaných fotónov. V prípade pozorovania daného efektu znamená jedinečný výsledok – prvýkrát bol jav potvrdený v silnej interakcii.

[1] ATLAS Collaboration: *Observation of quantum entanglement with top quarks at the ATLAS detector* **Nature 633 (2024) 542-547. IF = 50.5, Nature Index**

### **Supravodivosť vo vysoko entropických zliatinách**

**Projekty:** AT-SK 2023-03-15-003, APVV-18-0358, VEGA 2/0032/20, VEGA 2/0058/20

**Riešitelia:** G. Pristáš, Mat. Orendáč, J. Bačkai, J. Kačmarčík, F. Košuth, S. Gabáni, P. Szabó, K. Flachbart

Vysoko-entropické materiály sa vyznačujú mimoriadne vysokou tvrdosťou, odolnosťou voči korózii a vysokým teplotám, ktoré ich predurčujú na použitie v aplikáciách pri

extrémnych podmienkach. Pracovníci Ústavu experimentálnej fyziky SAV v Košiciach spolu s kolegami z Montanuniversität Leoben v Rakúsku uspeli v príprave vysoko-entropických zliatin TiNbMoTaW vo forme tenkých filmov [1]. Navyše sa im podarilo pomocou dopovania dusíkom výrazne zlepšiť ich supravodivé vlastnosti. Pomocou viacerých jedinečných experimentálnych techník (rezistivita, ac tepelná kapacita, mikrokontaktová spektroskopia, susceptibilita) sa im podarilo vysvetliť pôvod zlepšenia supravodivých vlastností v nitridoch (TiNbMoTaW) $N_x$ , čo otvára možnosť využiť túto metódu aj pri vysoko-entropických zliatinách s iným zložením [1]. Potenciálnymi oblasťami využitia nitridov sú elektródy pre superkapacity resp. prvky pre kvantové zariadenia, napr. ich súčasné využitie na konštrukciu jednofotónových detektorov. Práca [2] sa venuje príprave a štúdiu masívnych vysoko entropických zliatin TiZrNb a TiZrNbHf. Pomocou experimentálnej metódy mikrokontaktovej spektroskopie boli určené viaceré supravodivé parametre a bolo ukázané, že obe zliatiny vykazujú klasickú BCS supravodivosť so slabou väzbou.

[1] G. Pristáš, G.C. Gruber, Mat. Orendáč, J. Bačkai, J. Kačmarčík, F. Košuth, S. Gabáni, P. Szabó, Ch. Mitterer, K. Flachbart: *Multiple transition temperature enhancement in superconducting TiNbMoTaW high entropy alloy films through tailored N incorporation* **Acta Materialia 262 (2024) 119428, IF = 8.3, Q1P**

[2] F. Košuth, J. Cedervall, G. Ek, S. Gabáni, G. Pristáš, Mat. Orendáč, J. Bačkai, O. Onufriienko, P. Szabó, K. Flachbart: *Superconductivity in TiZrNb and TiZrNbHf bulk equimolar alloys* **Low Temperature Physics 50 (2024) 736, Q3P**

### Aplikačný výskum

## **Výskum nanofunkcionalizovaných olejov pre olejové transformátory**

**Projekty:** APVV-22-0115, VEGA 2/0029/24

**Riešitelia:** M. Rajňák, K. Paulovičová, M. Timko, P. Kopčanský

V súvislosti s rastúcou spotrebou elektrickej energie apelujú výrobcovia transformátorov na vývoj efektívnejších chladiacich a elektroizolačných médií. Cieľom nášho výskumu je zvýšiť chladiacu a elektroizolačnú schopnosť transformátorových olejov nanofunkcionalizáciou fullerénom C<sub>60</sub> a magnetickými nanočasticami. Na nanofunkcionalizovaných olejoch sme preskúmali elektrické a tepelné vlastnosti, ktoré sú kľúčové pre priemyselné aplikácie. Vybrané kvapaliny sme ponúkli výrobcovi transformátorov BEZ Transformátory a.s. Vyrobili sme 400 l C<sub>60</sub> nanokvapaliny, ktorá bola aplikovaná do 250 kVA distribučného transformátora. Na transformátore boli vykonané otepľovacie skúšky. Prítomnosť 0,01% fullerénu v oleji spôsobila pokles oteplenia o 1°C. Transformátor vyhovел aj vysokonapäťovej skúške (50 kV). Zavedenie

nanofunkcionalizovaného oleja do transformátora slovenského výrobcu sa uskutočnilo po prvýkrát. Je to historický míľnik posúvajúci náš výskum na úroveň technologickej pripravenosti TRL6..

[1] **M. Rajňák, K. Paulovičová, J. Kurimský, J. Tóthová, R. Cimbala, K. Kónyová, M. Dzida, M. Timko, P. Kopčanský:** *Comparison of physical properties of ferrofluids based on mineral transformer oil and bio-degradable gas-to-liquid oil*

**Journal of Magnetism and Magnetic Materials 589 (2024) 171628, IF = 2.5, Q2P**

[2] J. Kurimský, **M. Rajňák, M. Šárpataky, R. Cimbala, K. Paulovičová, M. Krbal, P. Kopčanský:** *Analysis of impulse withstand voltage of ester-based nanofluids*

**Surfaces and interfaces 53 (2024) 105032, IF = 5.7, Q1P**

[3] J. Kurimský, **M. Rajňák, K. Paulovičová, M. Šárpataky:** *Electric partial discharges in biodegradable oil-based ferrofluids: A study on effects of magnetic field and nanoparticle concentration*

**Heliyon 10 (2024) e29259, IF = 3.4, Q1P**

[4] P. Havran, R. Cimbala, B. Dolník, **M. Rajňák, R. Štefko, J. Király, J. Kurimský, K. Paulovičová:** *Dielectric relaxation spectroscopy of hybrid insulating nanofluids in time, distribution, and frequency domain*

**Journal of Molecular Liquids 409 (2024) 125409, IF = 5.3, Q1P**

## **Pružné mikroštruktúry a ich využitie na biomedicínske „Lab-on-chip“ aplikácie**

**Projekty:** APVV-21-0333; VEGA 2/0101/22

**Riešitelia:** Z. Tomori, J. Kubacková

Predmetom nášho záujmu je vytvorenie pružných (deformovateľných) mikroštruktúr pomocou metódy dvoj-fotónovej polymerizácie a ich využitie pri mikromanipulácii so živými bunkami a mikrореológii. Pri priamej manipulácii so živými bunkami laserovým lúčom (optickou pinzetou) hrozí ich poškodenie. Preto bola použitá nepriama manipulácia prostredníctvom elastických mikrorobotov ktoré sme navrhli a otestovali za účelom zachytenia, transportu a uvoľnenia jednotlivých živých buniek do meracieho kontajnera [1]. Mikrorobot má tvar mechanickej pinzety ktorej ramená sa rozťahnu laserovými pascami iba vo fáze uchopenia a uvoľnenia, počas transportu je už bunka držaná vďaka elastickým vlastnostiam ramien. Návrh tvaru mikrorobota je výsledkom kompromisu medzi požiadavkami a možnosťami polymerizácie pričom ako optimálnym sa ukázal systém torznej pružiny. Celkovým cieľom je usporiadať bunky v kontajneri tak, aby napodobňovali tkanivo a umožňovali štúdium šírenia signálov medzi nimi. Tieto poznatky smerujú k pochopeniu mechanizmu vzniku onkologických ochorení. V prípade mikrореológie sme overili možnosti merania viskozity použitím pružnej mikroštruktúry, ktorej jeden koniec je pevne ukotvený a druhý je vystavený vplyvu brownovských síl [2]. Meraním výchýliek voľného konca vysokorýchlostnou kamerou a následnou spektrálnou

analýzou vieme odhadnúť viskozitu tekutiny v mikrofluidnom systéme. Je to náhrada známej metódy, ktorá meria výchylky guľôčky uchytenej laserovou pascou. Keďže nie je potrebná laserová pasca, metóda je vhodná na konštrukciu cenovo nenáročného mikroviskozimetra vyžadujúceho iba malé (sub-mikrolitrové) množstvá vzorky..

[1] G.T. Ivanyi, B. Nemes, I. Grof, T. Fekete, **J. Kubackova, Z. Tomori**, G. Bano, G. Vizsnyiczai, L. Kelemen: *Optically Actuated Soft Microrobot Family for Single-Cell Manipulation* **Advanced Materials** **36** (2024) e2401115, IF = 27.4, Nature Index

[2] G.Vizsnyiczai, **J. Kubackova**, G.T. Ivanyi, C. Slaby, D. Horvath, A. Hovan, A. Strejckova, **Z. Tomori**, L. Kelemen, G. Bano: *3D-printed ultra-small Brownian viscometers* **Scientific Reports** **14** (2024) 13964, IF = 3.8, Q1

### Medzinárodná spolupráca

## **Štruktúra a vlastnosti bimagnetických „core/shell“ nanočastíc na báze magnetitu a kobaltového feritu**

**Projekty:** APVV-19-0369, VEGA 2/0148/23

**Riešitelia:** I. Škorvánek, J. Kováč

Bimagnetické „core/shell“ nanočastice priťahujú čoraz väčší záujem vďaka ich potenciálnemu využitiu v rôznych oblastiach, vrátane permanentných magnetov, záznamových médií, absorpcie mikrovln a biomedicínskych aplikácií. V našich experimentoch sme sa zamerali na dve sady „core/shell“ nanočastíc, konkrétne  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CoFe}_2\text{O}_4$  (magneticky mäkké jadro/magneticky tvrdý obal) a  $\text{CoFe}_2\text{O}_4@\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magneticky tvrdé jadro/magneticky mäkký obal). Vzorky nanočastíc boli pripravené na IMS VAST v Hanoji a charakterizácia ich magnetických vlastností bola realizovaná na ÚEF SAV. Naše výsledky ukázali, že usporiadanie vrstiev zohráva dominantnú úlohu v magnetickom správaní týchto systémov. Rozdiely medzi  $\text{CoFe}_2\text{O}_4@\text{Fe}_3\text{O}_4$  a  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanočasticami boli pozorované najmä v tvare hysteréznych slučiek a hodnotách koercivity a to napriek podobnej veľkosti jadra a hrúbky plášťa. Naša práca priniesla tiež nové poznatky o vplyve hrúbky plášťa a medzičasticových interakcií na magnetické vlastnosti študovaných vzoriek.

[1] H.M. Do, T.H.P. Le, D.T. Tran, T.N.A. Nguyen, **I. Škorvánek, J. Kováč**, P. Švec Jr., M.H. Phan: *Magnetic interaction effects in  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CoFe}_2\text{O}_4$  core/shell nanoparticles* **Journal of Science: Advanced Materials and Devices** **9** (2024) 100658, IF = 6.7, Q1P

[2] L.T.H. Phong, D.H. Manh, D.T. Tran, T.N. Bach, V.H. Ky, **I. Škorvánek, J. Kováč**, P. Švec Jr., T.L. Phan, M.H. Phan: *Contrasting shell thickness-dependent magnetic behaviors of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4@\text{Fe}_3\text{O}_4$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CoFe}_2\text{O}_4$  core/shell nanoparticles* **Journal of Alloys and Compounds** **1005** (2024) 176138, IF = 5.8, Q1

## Vôňovo-nezávislý výťažok hadrónov s veľkou priečnou hybnosťou z jadrových zrážok

**Projekty:** VEGA 2/0020/22

**Riešitelia:** J. Nemčík

Experimentálne hodnoty produkcie rôznych hadrónov s veľkou priečnou hybnosťou  $p_T$  v zrážkach ťažkých iónov naznačujú univerzalitu pozorovaného jadrového potlačenia. Naša analýza mechanizmu produkcie ukazuje dôležitú úlohu efektov farebnej priezračnosti. To spôsobuje, že pravdepodobnosť prežitia kvark-antikvarkového dipólu je nezávislá od kvarkovej vône, za predpokladu, že hadrónová vlnová funkcia je tvorená mimo jadrového prostredia. Posledná podmienka ukladá obmedzenia na rozsah  $p_T$ , ktorý by mal byť dostatočne vysoký, aby bolo jadrové potlačenie univerzálne. Zistili sme tiež, že transportný koeficient výrazne závisí od kvarkovej vône a v prípade ťažkých kvarkov sa znižuje.

[1] **J. Nemchik**, J. Óbertová: *Coherent photo- and electroproduction of charmonia on nuclear targets revisited: Green function formalism*

**Physical Review D 110 (2024) 054015, IF = 4.6, Q1P**

[2] B.Z. Kopelovich, **J. Nemchik**: *Flavor-independent yield of high- $p_T$  hadrons from nuclear collisions*

**Physical Review D 110 (2024) 014047, IF = 4.6, Q1P**

## Súťaž mladých vedeckých pracovníkov ÚEF SAV 2024

*I. miesto*

**RNDr. Miroslav Gančár, PhD.**

Advancing the potency of anti-amyloid agents

*II. miesto*

**Mgr. Filip Košuth**

Study of superconductivity in unconventional superconductors

*III. miesto*

**RNDr. Miloš Jakubčín, PhD.**

Exploring the temperature dependence of magnetic properties and magnetoimpedance effect in Co-rich microwires