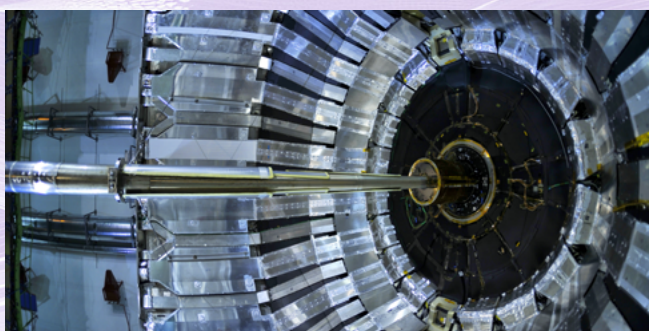




KWARTAŁ BADAŃ

Najważniejsze wyniki badań polskich fizyków



ALGORYTMY AI ZWIĘKSZAJĄ SKUTECZNOŚĆ ANALIZ W EKSPERYMENCIE ATLAS

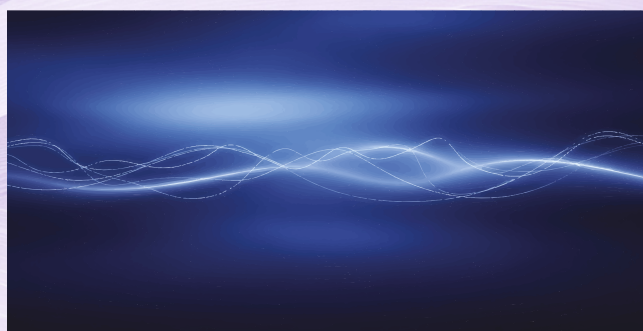
Zespół eksperymentu ATLAS opublikował w *Nature Communications* pracę prezentującą nowy algorytm GN2 do identyfikacji tzw. smaku dżetów – strumieni cząstek powstających w zderzeniach protonów w LHC. Rozróżnianie dżetów pochodzących od kwarków b i c ma kluczowe znaczenie dla badań właściwości bozonu Higgsa oraz testów Modelu Standardowego.

GN2 to model uczenia głębokiego oparty na architekturze transformer, który analizuje bezpośrednio niskopoziomowe informacje o torach cząstek w detektorze, rezygnując z klasycznego podejścia dwuetapowego. Sieć uczona jest nie tylko klasyfikacji dżetów, ale także zadań pomocniczych inspirowanych fizyką, takich jak identyfikacja wspólnych wierzchołków rozpadu i określanie pochodzenia torów. Takie podejście zwiększa skuteczność i interpretowalność algorytmu

Nowy algorytm GN2 znacząco przewyższa swoimi możliwościami poprzedni algorytm DL1d. Dla 70% efektywności identyfikacji dżetów b, odrzucenie dżetów c poprawiono 3,5-krotnie, a dżetów lekkich 1,8-krotnie. Przekłada się to na większą czułość analiz, m.in. w badaniach produkcji par bozonów Higgsa i pomiarach sprzężeń kwarków do pola Higgsa.

W prace nad algorytmem zaangażowane były polskie zespoły z: AGH w Krakowie, Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, Uniwersytetu Jagiellońskiego, Uniwersytetu Warszawskiego, Politechniki Warszawskiej oraz Politechniki Wrocławskiej.

Opracowano na podstawie publikacji:
ATLAS Collaboration, „Transforming jet flavour tagging at ATLAS”, *Nature Communications* 17, 541 (2026),
DOI: 10.1038/s41467-025-65059-6



KOLEKTYWNY TRANSPORT ELEKTRONÓW REDUKUJE SZUM ELEKTRYCZNY

Najnowsze wyniki badań nanodrutów z materiału $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$ pokazują, że prąd elektryczny może płynąć z mniejszym poziomem szumu niż w klasycznych metalach. Międzynarodowy zespół naukowców z udziałem badaczy Instytutu Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk w Warszawie opublikował pracę na ten temat w czasopiśmie *Nature Communications*.

Badany materiał należy do układów, w których elektrony tworzą tzw. falę gęstości ładunku (CDW) – specyficzny kolektywny stan elektronów sprzężonych z siecią krystaliczną. Po przekroczeniu napięcia progowego ($V_t \approx 0,08 \text{ V}$) kondensat CDW zaczyna się jakby ślizgać po sieci krystalicznej (przemieszcza się w niej spójnie fazowo), przejmując dominującą rolę w przewodzeniu prądu. W przeciwieństwie do zwykłych przewodników, gdzie znormalizowany szum niskoczęstotliwościowy ($1/f$) pozostaje stały, w badanych nanodrutach zaobserwowano, że przy dużych prądach szum maleje odwrotnie proporcjonalnie do prądu ($SI/I^2 \sim 1/I$). Co więcej, całkowity poziom szumu spada poniżej poziomu typowego dla transportu pojedynczych elektronów w metalu

Analiza teoretyczna wskazuje, że w zakresie wysokich prądów nie ujawnia się wewnętrzna granica szumu kondensatu CDW – jego wkład musi być znacznie mniejszy niż wkład zwykłych nośników, aby wyjaśnić dane eksperymentalne. Oznacza to, że kolektywny transport silnie skorelowanych elektronów może być... wyjątkowo cichy!

Opracowano na podstawie publikacji:
S. Ghosh i in., „A quieter state of charge and ultra-low-noise of the collective current in quasi-1D charge-density-wave nanowires”, *Nature Communications* 17, 116 (2026),
DOI: 10.1038/s41467-025-67567-x.



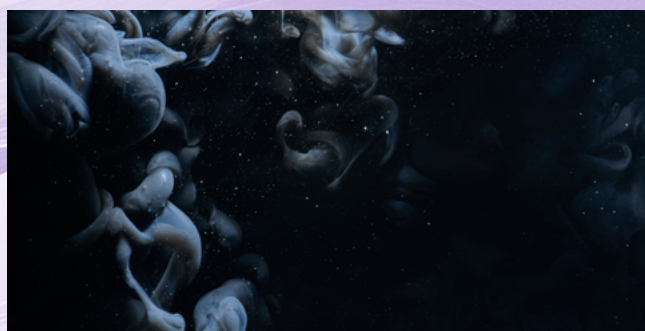


CO ZMieniło UDERZENIE SONDY DART W PODWÓJNĄ PLANETOIDĘ DIDYMOS-DIMORPHOS?

Międzynarodowy zespół z udziałem naukowców z Obserwatorium Astronomicznego Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu opublikował w *Nature Communications* analizę zmian w układzie planetoid Didymos–Dimorphos po kontrolowanym uderzeniu sondy NASA DART we wrześniu 2022 r. Misja ta skróciła czas obiegu mniejszej planetoidy (Dimorphosa) wokół większej o około 33 minuty, pokazując, że możliwe jest celowe zmienianie toru ruchu ciała niebieskiego.

Badacze wykonali serię pomiarów światła odbitego od układu około miesiąc po zderzeniu oraz dwa miesiące później, analizując jego barwę w zakresie światła widzialnego (500–900 nm). Wyniki potwierdzają, że planetoidy należą do tzw. typu S, czyli skalistych obiektów bogatych w krzemiany. Jednocześnie zauważono niewielkie zmiany barwy między październikiem a grudniem. Mogą one wynikać z ewolucji chmury pyłu wyrzuconego podczas uderzenia – drobniejsze cząstki szybciej oddalają się od układu, pozostawiając większe, które nadają światłu bardziej czerwony odcień. Inną przyczyną może być nierównomierne osadzanie się świeżo odsłoniętego materiału na powierzchni większej planetoidy.

Opracowano na podstawie publikacji:
Lazzarin M. i in., „Spectroscopic insights into the near-earth didymos-dimorphos binary system following the double asteroid redirection test (DART) mission impact”,
Nature Communications 17, 551 (2026),
DOI: 10.1038/s41467-025-67242-1



SIĘĆ KWANTOWYCH CZUJNIKÓW BADA NATURĘ CIEMNEJ MATERII

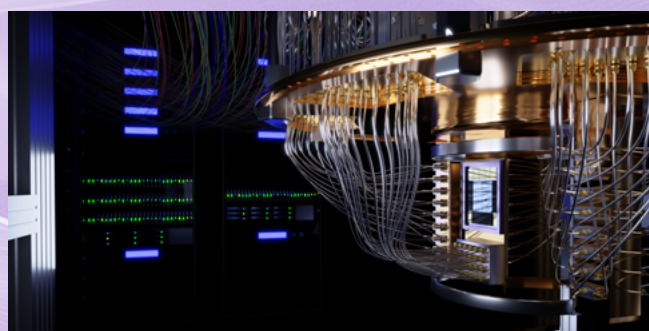
Jedne z najczulszych laboratoryjnych poszukiwań ultralekkich aksjonów – hipotetycznych cząstek będących kandydatami na ciemną materię – przeprowadził międzynarodowy zespół fizyków z udziałem przedstawicieli Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Wyniki opublikowano w czasopiśmie *Nature*.

Badacze zbudowali sieć pięciu kwantowych czujników opartych na spolaryzowanych jądrach gazów szlachetnych (^{129}Xe), rozmieszczonych w dwóch miastach oddalonych o około 320 km i zsynchronizowanych sygnałem GPS. Celem było wykrycie krótkotrwałych obrotów spinów jądrowych, które mogłyby powstać podczas przejścia przez Ziemię topologicznych defektów pola aksjonowego – makroskopowych struktur przewidywanych w niektórych modelach ciemnej materii.

Zastosowano dwa kluczowe ulepszenia: wzmacnianie sygnału w układzie spin–spin (czynniki ~ 150) oraz zoptymalizowane filtrowanie szumu, inspirowane metodami używanymi w detekcji fal grawitacyjnych. Pozwoliło to osiągnąć czułość detekcji obrotu spinów rzędu 10^{-6} rad. Analiza 739 godzin danych nie wykazała statystycznie istotnych sygnałów. Brak detekcji umożliwił jednak ustanowienie nowych, rekordowo silnych ograniczeń na sprzężenie aksjon–neutron w zakresie mas od 10 peV do 0,2 μeV . Dla masy około 84 peV uzyskano ograniczenie $f_{\text{int}} = 4,1 \times 10^{10}$ GeV, co przekracza dotychczasowe ograniczenia astrofizyczne nawet 40-krotnie.

Opisywany eksperyment, mimo że dał wynik negatywny, stanowi przykład wykorzystania kwantowych czujników do badań fundamentalnych właściwości Wszechświata.

Opracowano na podstawie publikacji:
Wang Y. i in., „Constraints on axion dark matter by distributed intercity quantum sensors”,
Nature 650, 315 (2026), DOI: 10.1038/s41586-025-10034-w.



NOWY KROK W STRONĘ ODPORNÝCH NA BŁĘDY KOMPUTERÓW KWANTOWYCH

Czasopismo *Nature Physics* opublikowało wyniki prac międzynarodowego zespołu fizyków z udziałem naukowców z Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie, którzy zademonstrowali eksperymentalnie dwa wydajne schematy korekcji błędów kwantowych na 32-kubitowym procesorze nadprzewodzącym.

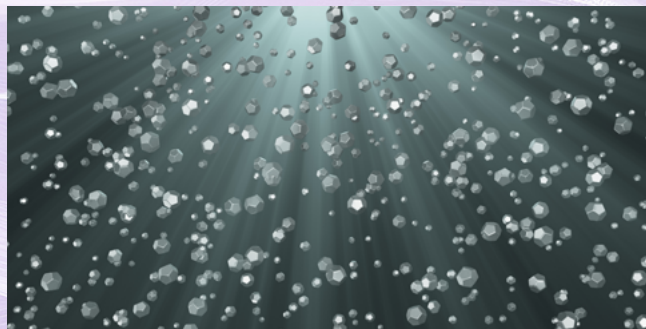
Jak wiadomo, w komputerze kwantowym informacje są wyjątkowo podatne na zakłócenia. Aby je chronić, wiele kubitów fizycznych łączy się w jeden bardziej odporny kubit logiczny. Kluczowe jest jednak, aby nie zużywać przy tym zbyt wielu zasobów. W prezentowanej pracy pokazano rozwiązania, które pozwalają kodować więcej informacji logicznej przy mniejszej liczbie kubitów fizycznych niż w dotychczas dominujących podejściach.

Eksperyment przeprowadzono na 32-kubitowym nadprzewodzącym procesorze „Kunlun”, w którym kubity są połączone dalekozasięgowymi sprzęgaczami, co umożliwia bardziej elastyczne realizowanie operacji kwantowych. W badanym urządzeniu średnia wierność operacji jedno-

kubitowych wynosi 99,95%, a dwukubitowych bramek CZ – 99,22%. Uzyskano logiczną stopę błęd rzędu 8–9% na kubit logiczny i cykl korekcji.

Choć nie osiągnięto jeszcze punktu, w którym błędy logiczne są mniejsze niż błędy pojedynczych kubitów fizycznych, symulacje pokazują, że dalsza poprawa jakości elementów sprzętowych może doprowadzić do skutecznego tłumienia błędów przy większej skali systemu. Praca stanowi istotny krok w kierunku budowy skalowalnych, odpornych na błędy komputerów kwantowych.

Opracowano na podstawie publikacji:
Wang i in. "Demonstration of low-overhead quantum error correction codes", *Nature Physics* 22, 308 (2026), DOI: 10.1038/s41567-025-03157-4



CZY SUPERRADIANCJA W NANODIAMENTACH ZOSTAŁA DOBRZE OPISANA? POLSCY FIZYCY KORYGUJĄ MODEL TEORETYCZNY

Zespół fizyków z Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu opublikował w *Nature Communications* krytyczną analizę opublikowanego w 2017 r. modelu teoretycznego, który miał wyjaśniać obserwowaną w temperaturze pokojowej superradiancję z pojedynczych nanokryształów diamentu.

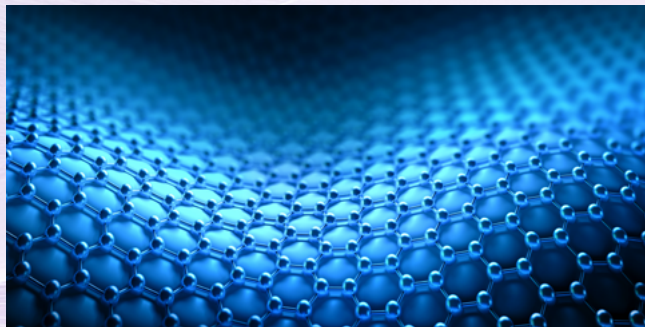
Superradiancja to zjawisko kolektywnej emisji światła przez wiele wzbudzonych emiterów, prowadzące do charakterystycznego, intensywnego impulsu fluorescencji. Autorzy wykazali jednak, że dotychczasowy model (nazwany przez nich „Modelem A”) prowadzi do wyników niezgodnych z fizyką – m.in. przewiduje ujemne natężenie fluorescencji oraz нефизyczne asymptoty czasowe.

W pracy zaproponowano poprawiony zestaw równań („Model B”) zachowujący formalizm równania Goriniego–Kossakowskiego–Lindblada–Sudarshana (GKLS), lecz eliminujący błędy matematyczne i niekonsekwencje fizyczne. Numeryczne symulacje pokazują, że nowy model daje przebiegi fluorescencji zgodne z oczekiwaniami dla emisji kolektywnej i nie generuje нефизycznych efektów.

Autorzy podkreślają, że ich analiza nie podważa wyników eksperymentalnych, lecz wskazuje na konieczność rewizji opisu teoretycznego. Praca stanowi przykład, jak istotne w fizyce kwantowej jest zachowanie spójności formalnej równań dynamiki otwartych układów.

Badania przeprowadzono w Instytucie Fizyki Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu.

Opracowano na podstawie: Borkowski J.J., Czerwiński A., Kolenderski P., "Revisiting superradiance dynamics from single diamond nanocrystals with a physically consistent model for fluorescence decay", *Nature Communications* (2026), DOI: 10.1038/s41467-025-67847-6



GEOMETRIA A MAGNETYZM: DRUKOWANE NANORURKI Z KONTROLOWANYMI ŚCIANAMI DOMENOWYMI

Międzynarodowy zespół badaczy z udziałem naukowców z Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie eksperymentalnie zrealizował magnetyczne nanorurki o złożonych, trójwymiarowych kształtach (prostych, helikalnych i zygzakowatych), łącząc druk 3D w skali nanometrowej z elektrochemicznym osadzaniem warstwy magnetycznej.

Punktem wyjścia były trójwymiarowe rusztowania z wolframu wytwarzane metodą FEBID (*Focused Electron Beam Induced Deposition*). Następnie pokryto je konforemną powłoką niklu, otrzymując strukturę typu rdzeń-powłoka o kontrolowanej średnicy wewnętrznej i grubości warstwy magnetycznej. Analiza STEM-EDS potwierdziła jednorodne pokrycie i dobrą jakość interfejsu. Konfigurację magnetyczną badano metodą mikroskopii rentgenowskiej XMCD-PEEM (w geometrii „cienia”). Dla większości struktur o odpowiedniej grubości powłoki zaobserwowano stan azymutalny, w którym namagnesowanie krąży wokół osi rurki. Symulacje mikromagnetyczne potwierdziły, że w badanym zakresie parametrów geometrycznych jest to stan energetycznie preferowany.

Kluczowy wynik dotyczy jednak struktur z wierzchołkami (geometrii zygzakowatej). W tej geometrii około 94% obserwowanych ścian domenowych lokalizowało się w pobliżu obszarów o największej krzywiznie. Symulacje wykazały, że wierzchołki tworzą lokalne minimum energii magnetostaticznej, działając jak naturalne centra zakotwiczenia.

Wyniki opublikowane w czasopiśmie *Advanced Functional Materials* pokazują, że w magnetycznych nanorurkach geometria trójwymiarowa może być narzędziem kontroli krajobrazu energetycznego i położenia ścian domenowych. Otwiera to drogę do projektowania trójwymiarowych elementów spintronicznych, w których ruch i stabilność defektów magnetycznych są kontrolowane nie tylko składem materiału, ale także kształtem struktury.

Opracowano na podstawie publikacji:
Fernández-González C. i in., "Realization of Complex-Shaped Magnetic Nanotubes with 3D Printing and Electrodeposition", *Advanced Functional Materials* 36, 4, e15722 (2026), DOI: 10.1002/adfm.202515722



EKSCYTONY UJAWNIAJĄ MAGNETYZM W CrSBr

W pracy opublikowanej w *Nature Communications* międzynarodowy zespół badaczy pod kierunkiem naukowców z Politechniki Wrocławskiej zbadał właściwości ekscytonów w warstwowym półprzewodniku magnetycznym CrSBr.

Przypomnijmy, że ekscytyny, czyli związane pary elektronu i dziury, odpowiadają między innymi za optyczne

właściwości półprzewodników i są kluczowe dla przyszłych technologii optoelektronicznych oraz spinowo-fotonicznych. W CrSBr współistnieją dwa różne typy ekscytonów: bardziej zlokalizowany ekscyton typu Frenkla (XA) oraz zdelokalizowany ekscyton typu Wanniera-Motta (XB). Takie współwystępowanie dwóch typów ekscytonów w jednym dwuwymiarowym materiale jest rzadkie i pozwala bezpośrednio porównywać dwa fundamentalne reżimy fizyki ekscytonów.

Łącząc spektroskopię magnetooptyczną w bardzo silnych polach magnetycznych (do 85 T) z obliczeniami *ab initio*, badacze wykazali, że ekscyton XB reaguje na zmiany magnetyzmu materiału nawet dziesięciokrotnie silniej niż XA. Wynika to z jego większego rozmiaru przestrzennego i silniejszego powiązania ze strukturą pasmową kryształu.

CrSBr stanowi wyjątkową platformę do analizowania sprzężenia między ekscytonami, magnetyzmem i drganiami sieci krystalicznej. Wskazują one również na to, że do opisu takich silnie skorelowanych materiałów konieczne są zaawansowane metody obliczeniowe dla wielu ciał, które wykraczają poza klasyczne modele fenomenologiczne.

Opracowano na podstawie publikacji:
Śmiertka M. i in., "Distinct magneto-optical response of Frenkel and Wannier excitons in CrSBr",
Nature Communications 17, 1777 (2026),
DOI: 10.1038/s41467-026-68482-5



AI DOPASOWUJE ELEKTRODY W BATERIACH AZIB

Międzynarodowy zespół z udziałem badaczy z Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej zaprezentował w *Nature Communications* ilościowy model doboru elektrod w wodnych bateriach cynkowo-jonowych (AZIBs).

Problem, który autorzy rozwiązują, jest fundamentalny: w architekturze *dual-intercalation*, gdzie obie elektrody magazynują jony Zn^{2+} , wydajność całego ogniwa zależy od dopasowania kinetyki transportu jonów w obu materiałach. Jeśli jedna elektroda przyjmuje jony szybciej niż druga, powstają lokalne nagromadzenia ładunku, rośnie polaryzacja i spada trwałość baterii.

Autorzy opracowali wspomagany uczeniem maszynowym model dopasowania kinetycznego, który łączy parametry strukturalne (m.in. rozstaw warstw krystalicznych) z dyfuzją jonów Zn^{2+} . Wprowadzono dwa deskryptory ilościowe – *diffusion ratio* (DR) i *composite shift index* (CSI) – pozwalające przewidzieć, czy para materiałów elektrodowych będzie pracować w sposób zsynchronizowany. Model przetestowano eksperymentalnie na układzie $Zn_3V_3O_8 \parallel NH_4V_4O_{10}$. Dobrze dopasowana konfiguracja (okno 0,2–1,8 V) osiągnęła: pojemność 310 mAh g⁻¹, ponad 12 000 cykli przy 5 A g⁻¹ oraz znaczną redukcję polaryzacji i oporu dyfuzyjnego.

Symulacje metodą elementów skończonych pokazują, że w stanie dopasowanym rozkład stężenia Zn^{2+} i pola elektrycznego w ogniwie jest jednorodny, podczas gdy w stanie niedo-

pasowanym powstają silne gradienty sprzyjające degradacji. Strategię rozszerzono także na elastyczne ogniwa hydrożelowe, uzyskując rozciągliwą baterię o pojemności powierzchniowej 1,2 mAh cm⁻² i gęstości energii 1070 μWh cm⁻².

Opracowano na podstawie publikacji:
Xie Q. i in., "Machine learning-assisted kinetic matching model for rational electrode design in aqueous zinc-ion batteries", *Nature Communications* 17, 1233 (2026),
DOI: 10.1038/s41467-025-67996-8



FERROMAGNETYZM WYWOŁANY GEOMETRIĄ SIECI

Ferromagnetyzm w materiale, który w swojej naturalnej postaci jest paramagnetycznym metalem – to główny rezultat pracy opublikowanej m.in. przez naukowców z Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie w *Advanced Functional Materials*.

Autorzy pokazali, że w cienkich warstwach SrIrO₃ można wywołać uporządkowanie magnetyczne wyłącznie poprzez zmianę struktury krystalicznej. SrIrO₃ to tlenek 5d o silnym sprzężeniu spinowo-orbitalnym. W strukturze objętościowej nie wykazuje ferromagnetyzmu. Gdy jednak warstwy SrIrO₃ wyhodowano na podłożu SrTiO₃ (111), powstała naprężona, heksagonalna nadstruktura z naprzemiennymi oktaedrami IrO₆ współdzielącymi swoje wierzchołki i ściany. Zmiana topologii sieci doprowadziła do zwiększenia gęstości stanów na poziomie Fermiego i osłabienia efektywnego sprzężenia spinowo-orbitalnego, co sprzyjało niestabilności ferromagnetycznej. Obecność uporządkowania magnetycznego potwierdzono poprzez obserwację histerezy anomalnego efektu Halla (w temperaturach poniżej kilku kelwinów), sygnału XMCD (*X-ray Magnetic Circular Dichroism*, czyli magnetycznego dichroizmu kołowego w zakresie promieniowania rentgenowskiego) na krawędzi absorpcji Ir M₅ oraz pomiary magnetooporu. Choć zmierzony moment magnetyczny jest niewielki i wynosi zaledwie 0,03 μB na atom Ir (dla porównania moment swobodnego jonu żelaza Fe³⁺ wynosi aż 5,9 μB), badany materiał wykazuje wyraźny anomalny efekt Halla. Obliczenia struktury elektronowej metodą DFT+U sugerują ponadto możliwość istnienia punktów Weyla w pobliżu poziomu Fermiego, co wskazuje na potencjalnie topologiczny charakter układu.

Odkrycie to pokazuje, że w materiałach o silnym sprzężeniu spinowo-orbitalnym magnetyzm można wywołać nie tylko przez domieszkowanie, lecz przez samą zmianę geometrii sieci krystalicznej. Otwiera to drogę do projektowania nowych materiałów spintronicznych, w których właściwości magnetyczne są kontrolowane czysto strukturalnie, bez wprowadzania chemicznego nieuporządkowania.

Opracowano na podstawie publikacji:
Lim J. S. i in., "Inducing Ferromagnetism by Structural Engineering in a Strongly Spin-Orbit Coupled Oxide",
Advanced Functional Materials (2026),
DOI: 10.1002/adfm.202600032

