



Kraków, 6 listopada 2025

Nielokalność zaklęta w naturze identycznych cząstek

U swoich najgłębszych fizycznych podstaw świat wydaje się być nielokalny: cząstki odseparowane przestrzennie zachowują się tak, jakby tworzyły nie odrębne układy kwantowe, lecz jeden. Dwójka polskich fizyków właśnie udowodniła, że nielokalność o fundamentalnej naturze – wynikającą z prostego faktu, że wszystkie cząstki tego samego typu są nierozróżnialne – można zaobserwować doświadczalnie dla praktycznie wszystkich stanów cząstek identycznych.

Wszystkie cząstki tego samego rodzaju – na przykład fotony czy elektrony – są ze sobą splątane, zarówno te obecne na Ziemi, jak i te w najdalszych zakątkach odległych galaktyk. To zaskakujące twierdzenie jest konsekwencją faktu będącego jednym z postulatów mechaniki kwantowej: cząstki tego samego typu są w swojej istocie identyczne. Czy oznacza to, że mamy na wyciągnięcie ręki uniwersalne źródło splątania odpowiedzialne za osobliwości kwantowego świata, w tym urągającą zdrowemu rozsądkowi nielokalność? Jak przechrzcić teorię kwantów, która skrzętnie strzeże dostępu do tego niezwykłego zasobu? Odpowiedzi na tak postawione pytania udzielili dwaj teoretycy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie i Instytutu Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk w Gliwicach (IITiS PAN) w artykule opublikowanym na łamach czasopisma „npj Quantum Information” renomowanej grupy wydawniczej „Nature”.

Teoretycy z IFJ PAN i IITiS PAN podjęli się analizy fundamentalnego splątania cząstek identycznych, odwołując się bezpośrednio do pojęcia nielokalności Bella. O ile splątanie to termin mocno osadzony w abstrakcyjnej teorii kwantów, o tyle pojęcie lokalności jest znacznie bardziej intuicyjne i uniwersalne. Odwołuje się do zdroworozsądkowej zasady mówiącej, że zdarzenia mają swoje przyczyny i skutki, które rozchodzą się w przestrzeni ze skończoną prędkością, nie większą niż prędkość światła. Gdy jednak takiego wyjaśnienia nie ma, wchodzimy w obszar zjawisk nielokalnych. Na tym właśnie polegała genialność odkrycia północnoirlandzkiego fizyka Johna Stewarta Bella: wskazał on eksperyment, którego nie sposób zinterpretować lokalnie. Kluczowym elementem jest w nim splątanie dwóch odrębnych układów, na których badacze – tradycyjnie nazywani Alicją i Bobem – mogą wykonywać dowolne i niezależne pomiary.

„Na pozór sprawa może wydawać się prosta: splątane układy łamią nierówność Bella, wystarczy więc zrobić dobrze zaplanowany eksperyment. Owszem, ale dotyczy to jedynie układów rozróżnialnych, które można ponumerować i wysłać do dwóch odległych laboratoriów. Z cząstkami identycznymi cała ta konstrukcja staje się nieprzydatna”, mówi dr hab. Paweł Błasiak (IFJ PAN), a następnie wyjaśnia: *„Mechanika kwantowa mówi jasno: cząstki identyczne są ze swojej natury nierozróżnialne. W praktyce więc nie wykonujemy pomiarów na ‘tej konkretnej’ cząstce, lecz na ‘jakiejś’ cząstce w danym miejscu. Fizyka kwantowa konsekwentnie broni się przed próbami nadania im indywidualnych etykietek – i właśnie dlatego klasyczny scenariusz Bella nie daje się tu zastosować”.*

Dr hab. Marcin Markiewicz (IITiS PAN), współautor artykułu, doprecyzowuje: *„Ta z pozoru subtelna różnica wprowadza nowe reguły gry w opisie świata: wymaga symetryzacji lub antysymetryzacji funkcji falowej w układach z wieloma cząstkami. To właśnie z zasady identyczności cząstek wynika podział na fermiony i bozony, czyli dwa światy, które tworzą fundament budowy atomów i ich jąder*

oraz decydują o strukturze oddziaływań. Nierozróżnialność wprowadza też zamieszanie w samym pojęciu splątania: w przypadku cząstek identycznych nie działa ono tak, jak jesteśmy do tego przyzwyczajeni – i traci część swojej użyteczności. W tym właśnie tkwi cała trudność z odpowiedzią na pytanie o nielokalność wynikającą z fundamentalnej nierozróżnialności cząstek”.

Współczesne eksperymenty ze splątaniem polegają na jego sztucznym wytwarzaniu za pomocą oddziaływań zachodzących między cząstkami wchodzącymi w skład układu kwantowego. Tymczasem mechanika kwantowa wskazuje również na inny, bardziej fundamentalny mechanizm: splątanie – a wraz z nim być może także nielokalność – jawi się jako bezpośrednia konsekwencja identyczności cząstek tego samego typu. W takim ujęciu nielokalność mogłoby ujawniać się nawet między cząstkami, które nigdy wcześniej ze sobą nie oddziaływały.

Właśnie ta pierwotna nielokalność zainteresowała fizyków z IFJ PAN i IITIS PAN. Postanowili oni sprawdzić, czy można byłoby ją zademonstrować w eksperymentach zbudowanych wyłącznie z prostych (pasywnych liniowych) elementów optycznych: luster, płytek światłodzielących i detektorów cząstek. Układy tego typu można zaprojektować tak, aby propagujące się cząstki w żadnym punkcie się nie spotykały. Jeśli jednak mimo to udałoby się w nich złamać nierówności Bella, oznaczałoby to, że obserwowana nielokalność nie jest produktem oddziaływań w eksperymencie, lecz ma charakter fundamentalny.

Badacze zadali proste, a jednocześnie bardzo ogólne pytanie: dla jakich stanów kwantowych cząstek identycznych można wskazać klasyczny układ optyczny, w którym ujawnią się nielocalne korelacje? Trudność polega na tym, że zarówno liczba możliwych konfiguracji optycznych, jak i bogactwo stanów cząstek identycznych wydają się praktycznie nieograniczone. Naukowcy okiełznali tę złożoność korzystając z całego arsenału sprytnych narzędzi: interferometru Yurke-Stolera, pomysłowej post-selekcji, koncepcji „gumki kwantowej”, indukcji matematycznej oraz doświadczenia w budowaniu modeli ze zmiennymi ukrytymi.

Polscy teoretycy w swoim artykule przedstawili kryterium pozwalające jednoznacznie rozstrzygnąć kwestię nielokalności dla dowolnego stanu z ustaloną liczbą cząstek identycznych. Wnioski są jednoznaczne: wszystkie stany fermionów i niemal wszystkie stany bozonów okazują się być zasobami nielokalnymi (w tym ostatnim przypadku poza wąską klasą tzw. stanów redukowalnych do pojedynczego modu). Warto podkreślić, że dowód jest całkowicie konstruktywny – krok po kroku pokazuje, jak zaprojektować eksperymenty optyczne ujawniające nielokalność badanego stanu.

„Z naszych badań wynika, że możemy sięgać po splątanie ukryte w fundamentalnej nierozróżnialności cząstek. Czyżby zatem nielokalność była immanentną cechą naszego świata, obecną w każdym jego zakątku? Wszystko wskazuje na to, że tak, a źródłem tej niezwyklej właściwości jest na pozór prosty postulat o identyczności cząstek tego samego typu”, konkluduje dr Błasiak, którego badania były współfinansowane ze stypendium Fulbright Senior Award 2022-23 w Institute for Quantum Studies w kalifornijskim Chapman University.

Wciąż jednak wiele pozostaje do zrozumienia, a pytania o naturę rzeczywistości oraz interpretację mechaniki kwantowej nabierają nowego sensu. Znamienne wyrazili to fizycy Charles W. Misner, John A. Wheeler oraz późniejszy noblista Kip S. Thorne, pisząc w książce „Gravitation” z 1973 roku: „Dotąd nie zaproponowano żadnego przekonującego wyjaśnienia niezwyklej identyczności cząstek tego samego typu. Nie wolno traktować jej jako błahostki – jest to bowiem centralna tajemnica fizyki”. Najpewniej to właśnie ta zagadka będzie inspirować badaczy jeszcze przez długie dekady.

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie prowadzi badania podstawowe i aplikacyjne w obszarze fizyki oraz nauk pokrewnych. Główna część działalności naukowej Instytutu koncentruje się na badaniu struktury materii, w tym własności oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po cząstki elementarne. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek, obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN prowadzi też cztery akredytowane laboratoria badawcze i pomiarowe. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fizykę fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Corocznie Instytut jest organizatorem lub współorganizatorem wielu międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych oraz szeregu seminariów i innych spotkań naukowych. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość”, któremu, na lata 2012-2017, nadany został status Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW). Wiele projektów i przedsięwzięć realizowanych przez Instytut jest wpisanych na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej (PMIB). Instytut zatrudnia ponad

pół tysiąca pracowników. Komisja Europejska przyznała IFJ PAN prestiżowe wyróżnienie „HR Excellence in Research” jako instytucji stosującej zasady „Europejskiej Karty Naukowca” i „Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych”. W kategoryzacji MEIN Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w obszarze nauk fizycznych.

KONTAKT:

dr hab. **Paweł Błasiak**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 501 746333
email: pawel.blasiak@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Identical particles as a genuine non-local resource”
P. Błasiak, M. Markiewicz
npj Quantum Information 11, 171 (2025)
DOI: [10.1038/s41534-025-01086-x](https://doi.org/10.1038/s41534-025-01086-x)

POWIĄZANE STRONY WWW:

<http://www.ifj.edu.pl/>
Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk.

<http://press.ifj.edu.pl/>
Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

MATERIAŁY GRAFICZNE:

IFJ251106b_fot01s.jpg HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2025/11/06/IFJ251106b_fot01.jpg
Nielokalność wydaje się być zakłętą w tak podstawowej właściwości naszego Wszechświata, jak nierozróżnialność cząstek kwantowych. (Źródło: IFJ PAN, AI)