



Kraków, 7 maja 2025

Symetria zapachowa świata wielkich energii nie działa zgodnie z oczekiwaniami

W zderzeniach jąder atomowych argonu i skandu naukowcy z międzynarodowego eksperymentu NA61/SHINE zaobserwowali wyraźną anomalię świadczącą o łamaniu jednej z najważniejszych symetrii świata kwarków: przybliżonej symetrii zapachowej między kwarkami dolnymi i górnymi. Istnienie anomalii może wynikać z dotychczas nieznanymi niedoskonałościami obecnych modeli zderzeń jądrowych, ale nie można wykluczyć jej potencjalnego związku z od dawna poszukiwaną „nową fizyką”.

Jeśli z tej samej liczby klocków drewnianych i plastikowych zmontujemy jakąś konstrukcję, po jej rozbiciu będziemy się spodziewać, że proporcje między klockami obu typów się nie zmienią. Fizycy żyli dotychczas w przekonaniu, że podobna symetria stanów początkowego i końcowego, nazywana symetrią zapachową, występuje w zderzeniach cząstek zawierających kwarki dolne i górne. Z artykułu właśnie opublikowanego na łamach prestiżowego czasopisma „Nature Communications” wyłania się jednak inny obraz rzeczywistości. Intrygującą obserwację, o dalekosiężnych konsekwencjach, przeprowadziła grupa eksperymentu NA61/SHINE, której istotną część stanowią fizycy z Polski, w tym z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie. Zespół badał zderzenia jąder argonu i skandu przyspieszanych przez akcelerator SPS – ten sam, który odpowiada także za ostatnią fazę rozpędzania protonów przed wstrzykiwaniem ich do wnętrza akceleratora LHC w CERN pod Genewą.

„Zgodnie z obecnym stanem wiedzy, dostrzegany przez nas świat materii tworzą głównie cząstki elementarne nazywane kwarkami. Występują one w sześciu odmianach, każdej mającej swój antymaterialny odpowiednik. Protony i neutrony, podstawowe składniki jąder atomowych, składają się z trójek zmieszanych kwarków dolnych i górnych, podczas gdy pary kwark-antykwar są określane mianem mezonów”, wprowadza w temat prof. dr hab. Andrzej Rybicki (IFJ PAN).

Czynnikiem odpowiedzialnym za sklejanie kwarków w protony, neutrony lub mezony są oddziaływania silne, opisywane za pomocą teorii nazywanej chromodynamiką kwantową. Z jej równań wynika, że gdyby kwarki wszystkich typów miały te same masy, oddziaływanie silne nie wyróżniałoby żadnego z nich. W rzeczywistości kwarki poszczególnych odmian (zapachów) istotnie różnią się masami, co łamie tę symetrię. Kluczowy staje się jednak fakt, że dwa najbliższe rodzaje kwarków – wspomniane już dolne i górne – niewiele się różnią masami. Oddziaływania silne traktują je więc nie idealnie tak samo, ale wystarczająco podobnie, by można mówić o istnieniu przybliżonej symetrii zapachowej. W badaniach jądrowych znaczenie tej symetrii jest niebagatelne. To właśnie dzięki niej wiadomo, że jeśli zderzenie o dużej energii, zachodzące z udziałem kwarków dolnych, produkuje z pewnym prawdopodobieństwem jakiejś cząstki wtórne, to z niemal tym samym prawdopodobieństwem inne, odpowiadające im cząstki wtórne powstałyby w zderzeniu, w którym byłyby obecne kwarki górne (i *vice versa*).

Zespół eksperymentu NA61/SHINE zajmował się badaniami mezonów *K* (kaonów), pojawiających się w różnych odmianach podczas wysokoenergetycznych zderzeń jąder atomowych argonu i skandu. Pierwotnie grupa planowała pomiary wyłącznie kaonów elektrycznie naładowanych. Co prawda było wiadomo, że w zderzeniach powstają także krótkożyjące kaony neutralne, bez ładunku elektrycznego, jednak ich mierzenie nie wydawało się warte zachodu. Z symetrii zapachowej

wynikało przecież, że po dodaniu kaonów ujemnych i kaonów dodatnich wynik powinien z dobrym przybliżeniem odpowiadać liczbie kaonów neutralnych. Ostatecznie grupa zdecydowała się jednak przeprowadzić pomiary kaonów wszystkich rodzajów – i to był strzał w dziesiątkę.

„Wyniki opublikowane przez nasz zespół okazują się statystycznie znacząco odbiegać od dotychczasowych przewidywań teoretycznych. Zwykle przyjmuje się, że rozbieżności w danych eksperymentalnych, wynikające z przybliżonego charakteru symetrii zapachowej, nie przekraczają 3 % w tym zakresie energii. My natomiast donosimy o nadprodukcji kaonów naładowanych sięgającej aż 18 %!”, mówi prof. Rybicki.

Gdy spojrzeć dokładniej, zaobserwowany efekt staje się jeszcze bardziej intrygujący. Stabilny izotop argonu ma 18 protonów i 22 neutrony, podczas gdy w przypadku skandu liczba neutronów w stabilnym jądrze przewyższa liczbę protonów o trzy. Protony to zlepek dwóch kwarków górnych i jednego dolnego, neutrony odwrotnie, zatem prosta arytmetyka dowodzi, że w badanych układach przed zderzeniami było nieco więcej kwarków dolnych.

„Skoro na początku mieliśmy więcej kwarków dolnych niż górnych, intuicyjnie oczekivalibyśmy, że jeśli wystąpią zaburzenia symetrii zapachowej, w ich wyniku powinniśmy po zderzeniu obserwować więcej kwarków dolnych. Tymczasem z naszych analiz wynika jednoznacznie: symetria zapachowa jest łamana w drugą stronę i na końcu to kwarków górnych jest więcej!”, mówi pomysłodawczyni pomiaru kaonów neutralnych, prof. dr hab. Katarzyna Grebieszkow z Politechniki Warszawskiej.

Przyczyny zaobserwowanego łamania symetrii w zderzeniach jąder atomowych argonu i skandu nie są obecnie znane. Być może w rachunkach teoretycznych inspirowanych chromodynamiką kwantową nie uwzględniono jakichś istotnych własności tych zderzeń. Jednak nie można wykluczyć i innej, bardziej spektakularnej możliwości: że zaobserwowany efekt wykracza poza dotychczasową teorię oddziaływań silnych i zbudowany za jej pomocą Model Standardowy, co oznaczałoby, że jest przejawem długo poszukiwanej „nowej fizyki”. Niezależnie od dalszego rozwoju wydarzeń, odkrycie już teraz niesie znaczące konsekwencje dla naukowców zajmujących się zderzeniami cząstek i jąder atomowych o wysokich energiach. Założenie o istnieniu omawianej symetrii było bowiem przez dekady powszechnie wykorzystywane przy modelowaniu przebiegu wielu eksperymentów jądrowych i interpretowaniu ich wyników.

„Rzecz w tym, że łamanie symetrii zapachowej odkryliśmy w zderzeniach jąder atomowych. Dziś nie potrafimy jeszcze powiedzieć, czy jest to zjawisko uniwersalne, dotyczące wszystkich oddziaływań z obecnością kwarków, czy też występuje na przykład tylko dla jąder o określonych masach, bądź dla takich, a nie innych energii zderzeń”, podkreśla prof. Rybicki i dodaje: *„Ta niewiedza w praktyce oznacza, że ponownej, uważnej weryfikacji należałoby poddać praktycznie wszystkie modele produkcji cząstek w zderzeniach wysokich energii i liczne wyniki eksperymentalne”.*

W najbliższych miesiącach naukowcy z zespołu NA61/SHINE rozpoczną prace mające na celu potwierdzenie łamania symetrii zapachowej w zderzeniach charakteryzujących się początkowo równymi liczbami kwarków dolnych i górnych.

„Na pierwszy ogień trafi kilkadziesiąt milionów już zarejestrowanych zderzeń mezonów π^+ i π^- z jądrami węgla, gdzie można mówić o pełnej symetrii zapachów przed zderzeniem. Kolejnym krokiem będzie zbadanie przebiegu zderzeń tlen-tlen i magnez-magnez, przy czym ten ostatni układ wydaje się szczególnie obiecujący z uwagi na złożoność jąder atomowych podobną do argonu i skandu, których kolizje pozwoliły na odkrycie omawianego zjawiska”, mówi dr hab. Seweryn Kowalski, prof. Uniwersytetu Śląskiego, który – wraz z prof. Ericem Zimmermanem z University of Colorado Boulder – kieruje eksperymentem NA61/SHINE.

Niestety, na najciekawsze wyniki przyjdzie wszystkim poczekać: zderzenia jąder magnezu będzie można zrealizować dopiero po mającej się wkrótce rozpocząć, a planowanej na trzy lata przerwie modernizacyjnej w działaniu akceleratora LHC.

Prace badawcze nad łamaniem przybliżonej symetrii zapachowej, możliwe dzięki wsparciu Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN, po stronie polskiej sfinansowano ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego i Narodowego Centrum Nauki.

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 klasyfikacji MEiN Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w obszarze nauk fizycznych.

KONTAKT:

prof. dr hab. **Andrzej Rybicki**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628447
email: andrzej.rybicki@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Evidence of isospin-symmetry violation in high-energy collisions of atomic nuclei”
The NA61/SHINE Collaboration, F. Giacosa, M. Gorenstein, R. Poberezhniuk, S. Samanta
Nature Communications 2025, 16, 2849
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57234-6>

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.

<https://shine.web.cern.ch/>
Strona eksperymentu NA61/SHINE.

MATERIAŁY GRAFICZNE:

IFJ250507b_fot01s.jpg **HR:** http://press.ifj.edu.pl/news/2025/05/07/IFJ250507b_fot01.jpg
Wnętrze detektora PSD (Projectile Spectator Detector) używanego w eksperymencie NA61/SHINE w CERN. (Źródło: Julien Marius Ordan, CERN-PHOTO-202011-147-2 / License: CC-BY-4.0)