



Kraków, 5 lutego 2025

Splątanie wewnątrz protonu „prześwietlone” narzędziami kwantowej informacji

W ostatnich latach wewnątrz protonu próbowano opisywać za pomocą pojęć i narzędzi teoretycznych związanych z kwantową informacją, co zaowocowało częściowymi sukcesami. Odkryto na przykład, że kwantowe splątanie w protonie jest maksymalne, a jego głównymi źródłami są nieustannie się „gotujące” morza wirtualnych gluonów i kwarków. We właśnie przedstawionej odświeżonej formie nowy formalizm stał się już tak uniwersalny, że po raz pierwszy poprawnie odtwarza wszystkie obecnie dostępne dane eksperymentalne.

Trudno sobie wyobrazić świat bardziej dynamiczny i zarazem bardziej niedostępny od wnętrza protonu. Złożone interakcje tworzących go kwarków, gluonów i ustawicznie „kipiącego” morza cząstek wirtualnych udało się obecnie spójnie opisać dzięki umiejętnemu użyciu narzędzi kwantowej teorii informacji i zjawisku kwantowego splątania. Nowy, bardziej od dotychczasowego uniwersalny formalizm pozwolił po raz pierwszy wytłumaczyć dane ze wszystkich dostępnych pomiarów związanych z rozpraszaniem się cząstek wtórnych produkowanych w trakcie głęboko nieelastycznych zderzeń elektronów z protonami. W skład zespołu odpowiedzialnego za osiągnięcie wchodzi teoretycy z Brookhaven National Laboratory (BNL) i Stony Brook University (SBU) w Nowym Jorku, meksykańskiego Universidad de las Americas Puebla (UDLAP) oraz Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie.

„Jeśli chcemy poznać zjawiska zachodzące wewnątrz protonu, najpierw musimy jakoś się tam dostać. Obecnie najlepszym sposobem są zderzenia protonów z elektronami, ponieważ te ostatnie nie tylko mają rozmiary znacznie mniejsze od protonów, ale przede wszystkim są cząstkami elementarnymi, mamy więc gwarancję, że same na nic się nie rozpadną”, wprowadza w tematykę prof. dr hab. Krzysztof Kutak (IFJ PAN), jeden z autorów artykułu opublikowanego w czasopiśmie „Reports on Progress in Physics”.

Proton nie jest cząstką elementarną. W najprostszym ujęciu przyjmuje się, że składa się on z trzech kwarków walencyjnych (dwóch górnych i jednego dolnego) „sklejanych” za pomocą gluonów, czyli cząstek przenoszących oddziaływanie silne. Oddziaływanie te są tak potężne, że we wnętrzu protonu ustawicznie pojawiają się i znikają pary wirtualnych kwarków i antykwarków (nawet tak masywnych jak powabne) oraz pary wirtualnych gluonów (co jest możliwe, ponieważ cząstki te są dla siebie antycząstkami).

W opisywanych badaniach kluczowe było założenie, że mimo ekstremalnie małych rozmiarów protonu tworzące go kwarki i gluony – wspólnie nazywane partonami – są kwantowo splątane. O splątaniu między obiektami kwantowymi mówimy wtedy, gdy wartości jakiejś cechy jednego obiektu reagują na jej zmiany w innym mimo faktu, że informacja o zmianie nie miała czasu, by zostać między nimi przesłana za pomocą jakiegokolwiek nośnika transportowanego przez przestrzeń.

„W przypadku wnętrza protonu splątanie występuje na trudnych do wyobrażenia odległościach rzędu jednej biliardowej metra i mniejszych i jest cechą kolektywną. Jak wykazaliśmy w swoich wcześniejszych publikacjach, dotyczy ono nie kilku, lecz wszystkich partonów w protonie”, mówi prof. Martin Hentschinski (UDLAP).

Gdy próbując poznać maksymalnie splątane wewnątrz protonu uderzamy w niego elektronem, między obu cząstkami dochodzi do oddziaływania elektromagnetycznego, którego nośnikiem jest foton. W zderzeniach głęboko nieelastycznych energia wymienianego fotonu jest tak duża, że związana z nim fala elektromagnetyczna zaczyna się „mieścić” w protonie i „dostrzegać” detale jego wewnętrznej struktury. Wskutek interakcji z fotonem proton może się następnie rozpaść produkując liczne cząstki wtórne. Splątanie przejawia się tu w fakcie, że liczba cząstek pochodnych wyprodukowanych w trakcie zderzenia jest wielkością zdeterminowaną jedynie przez próbkowany obszar protonu.

„Tak dochodzimy do pojęcia entropii, szczególnie istotnego w badaniach układów o dużej złożoności oraz w informacji kwantowej. Gdybyśmy dzięki zderzeniom głęboko nieelastycznym mieli dostęp do pełnej informacji o splątaniu w protonie, moglibyśmy mówić o entropii splątania równej zero. Jednak foton penetrujący wewnątrz protonu 'widzi' tylko część wnętrza protonu, pozostała część pozostaje dla niego ukryta – a to oznacza, że entropia splątania jest niezerowa. Mamy zatem do dyspozycji wygodną miarę ilości splątania w protonie”, tłumaczy prof. Dmitri Kharzeev (SBU, BNL).

W omawianym artykule międzynarodowy zespół fizyków dowiódł, że na podstawie entropii splątania można przewidzieć entropię cząstek wtórnych wyprodukowanych w zderzeniu elektronu z protonem. W rezultacie przy maksymalnym splątaniu kwarków i gluonów w protonie należy się spodziewać dużej entropii cząstek pochodnych, przejawiającej się m.in. w niemożliwości określenia, ile cząstek zostanie wyprodukowanych w konkretnym zderzeniu. Przewidywania te obecnie zweryfikowano dla wszystkich wariantów pomiarów przeprowadzonych w latach 2006-2007 w ramach eksperymentu H1 przy akceleratorze HERA w ośrodku DESY w Hamburgu, gdzie pojedyncze protony zderzały się z pozytonami, czyli antycząstkami elektronów.

„Splątaniem wewnątrz protonu zajmujemy się już od kilku lat. O ile nasze wcześniejsze prace teoretyczne weryfikowaliśmy poprzez konfrontację z pomiarami z konkretnych sesji pomiarowych, o tyle teraz w ramach jednego, uniwersalnego formalizmu zdołaliśmy opisać wszystkie dotychczasowe dane doświadczalne, które można wiązać z entropią splątania w protonie”, podkreśla dr Zhoudunming Tu (BNL).

Zespół fizyków zaangażowanych w projekt przewiduje, że właśnie uogólniony formalizm umożliwi łatwiejszą i dokładniejszą interpretację pomiarów z przyszłych zderzaczy, takich jak Electron-Ion Collider (EIC), który na początku przyszłej dekady zostanie uruchomiony w laboratorium w Brookhaven. Elektrony będą się tu zderzały nie z pojedynczymi protonami, lecz z jonami, czyli kompleksami protonów i neutronów. W połączeniu z nowymi danymi eksperymentalnymi, zaproponowane podejście teoretyczne powinno wówczas pomóc w rozwikłaniu istotnych problemów współczesnej fizyki jądrowej.

„Dzisiaj dysponujemy silną przesłanką, że nasz nowy formalizm uwzględniający entropię splątania nie jest przypadkowo skorelowany z jakimś konkretnym sposobem pomiaru zjawisk jądrowych, lecz ma rzeczywistą zdolność tłumaczenia natury obserwowanych zdarzeń. Jesteśmy przekonani, że dzięki badaniom entropii splątania będziemy w stanie lepiej zrozumieć, jak oddziaływania silne wiążą kwarki i gluony w protonach czy odpowiedzieć na pytanie, jak przynależność do większego jądra atomowego wpływa na właściwości pojedynczego protonu”, podsumowuje prof. Kutak.

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:

dr hab. **Krzysztof Kutak**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628312
email: krzysztof.kutak@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„QCD evolution of entanglement entropy”
M. Hentschinski, D. E. Kharzeev, K. Kutak, Z. Tu
Reports on Progress in Physics 2024, 87, 120501
DOI: [10.1088/1361-6633/ad910b](https://doi.org/10.1088/1361-6633/ad910b)

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:

IFJ250205b_fot01s.jpg

HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2025/02/05/IFJ250205b_fot01.jpg

Podczas głęboko nieelastycznego zderzenia z protonem elektron poruszający się z prędkością bliską prędkości światła (wyróżniony kolorem niebieskim) może wyemitować wysokoenergetyczny foton (tu fioletowy), który wleci do wnętrza protonu, gdzie „zauważy” tylko część splątanych kwarków, gluonów i cząstek wirtualnych. Wzbudzony proton rozpada się później w kaskadach cząstek wtórnych. (Źródło: IFJ PAN, jch)