



Kraków, 17 stycznia 2024

Pomerony w protonie nie niszczą maksymalnego splątania

Gdy wysokoenergetyczny foton uderza w proton, cząstki wtórne rozbiegają się w sposób wskazujący, że wewnątrz protonu jest maksymalnie splątane.

Międzynarodowy zespół fizyków z udziałem Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie właśnie wykazał, że maksymalne splątanie jest obecne w protonie nawet w tych przypadkach, gdy w zderzenia są zaangażowane pomerony.

Półtora roku temu odkryto, że różne części wnętrza protonu muszą być ze sobą kwantowo maksymalnie splątane. Wynik ten, osiągnięty przy współudziale prof. Krzysztofa Kutaka z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie oraz prof. Martina Hentschinskiego z Universidad de las Americas Puebla, był konsekwencją rozważań i obserwacji dotyczących zderzeń wysokoenergetycznych fotonów z kwarkami i gluonami w protonach i potwierdził hipotezę zaprezentowaną kilka lat wcześniej przez profesorów Dimitriego Kharzeeva oraz Eugene'a Levina.

Teraz, w artykule opublikowanym w czasopiśmie „Physical Review Letters”, międzynarodowy zespół fizyków zaprezentował dopełniającą analizę splątania, dotyczącą przypadków zderzeń fotonów z protonami, w których cząstki wtórne (hadrony) są wytwarzane w procesie nazywanym produkcją dyfrakcyjną. Główne pytanie brzmiało: czy i w tych przypadkach wśród kwarków i gluonów protonu pojawia się splątanie, a jeśli tak, czy także jest maksymalne?

O splątaniu różnych obiektów kwantowych fizycy mówią wtedy, gdy wartości jakiejś cechy tych obiektów są powiązane. Splątania kwantowego nie obserwujemy w klasycznym świecie, lecz jego istotę łatwo wytłumaczyć za pomocą rzutów dwiema monetami. Każda moneta ma dwie strony i gdy upadnie, może z tym samym prawdopodobieństwem przyjąć jedną z dwóch wzajemnie się wykluczających wartości: orła lub reszkę. Z korelacją podobną do splątania kwantowego mielibyśmy do czynienia, gdybyśmy rzucając jednocześnie dwiema monetami na końcu zawsze otrzymywali wyłącznie dwa różne stany (orła i reszkę) albo dwa identyczne (dwa orły bądź dwie reszki). Splątanie miałoby tu wartość maksymalną, ponieważ żadna wartość nie byłaby faworyzowana: prawdopodobieństwo, że dana moneta znajdzie się w stanie reszka lub orzeł nadal wynosiłoby 50%. Gdyby korelacja lub splątanie nie było maksymalne, sytuacja wyglądałaby inaczej i czasami zamiast dwóch kombinacji stanów obserwowalibyśmy także pozostałe.

„W fizyce jądrowej istnienie maksymalnego splątania widać w danych eksperymentalnych wtedy, gdy patrząc na nie wiemy, że... nic nie wiemy. Mniej żartobliwie należałoby powiedzieć, że ze stanami maksymalnie splątanymi mamy do czynienia, gdy nie potrafimy przewidzieć, ile hadronów – cząstek wtórnych oddziałujących silnie – powstanie w danym zderzeniu”, wyjaśnia prof. Kutek.

Wcześniejsze badania nad maksymalnym splątaniem wnętrza protonu miały związek z sytuacjami, gdy hadrony były wytwarzane w procesach zwanych zderzeniami głęboko nieelastycznymi. W eksperymentach łatwo te przypadki dostrzec, ponieważ cząstki wtórne rozbiegają się praktycznie we wszystkich kierunkach „do przodu” (czyli tych z udziałem pierwotnego kierunku ruchu protonu).

„Wiadomo jednak, że mniej więcej co dziesiąte zderzenie zachodzi inaczej: za punktem zderzenia w pewnych przedziałach kątowych w ogóle nie widać cząstek. Właśnie takie procesy nazywamy produkcją dyfrakcyjną i to one znalazły się w centrum naszych obecnych badań nad splątaniem kwantowym”, uzupełnia prof. Kutek.

Produkcja w procesie zderzenia głęboko nieelastycznego jest efektem interakcji fotonu z partonami (kwarkami i gluonami) w protonie. W przypadku produkcji dyfrakcyjnej foton także oddziałuje w protonie z partonem, ale takim, który jest częścią większej struktury, przez fizyków określanej mianem pomeronu.

Najważniejszą cechą kwantową gluonów jest kolor (z kolorem znanym z codzienności niemający nic wspólnego prócz nazwy). Cząstki wtórne, obserwowane w detektorach jako efekt zderzenia, są rezultatem procesów, w których kwarki i gluony w protonie wymieniają się ładunkiem koloru. Jednak gluony mogą tworzyć chwilowe kompleksy nazywane pomeronami, gdzie kolor jest wzajemnie neutralizowany. Gdy w trakcie zderzenia fotonu z partonem okaże się, że parton był częścią pomeronu, zderzenie nie doprowadzi do wyprodukowania hadronów rozbiegających się w pełnym zakresie kątowym pokrywanym przez detektory. Oznacza to, że część detektorów, teoretycznie zdolnych zobaczyć cząstki produkowane w omawianej fazie zderzenia, pozostanie milcząca.

Międzynarodowy zespół fizyków zdołał właśnie wykazać, że w trakcie zderzeń z udziałem pomeronów także tworzy się we wnętrzu protonu stan, w którym wszystkie cząstki są maksymalnie splątane. W stosunku do wcześniej analizowanych przypadków widać jednak pewną różnicę: gdy do akcji wkraczają pomery, maksymalne splątanie pojawia się nieco później.

Obecne badania są dopełnieniem dotychczasowej wiedzy o przebiegu wydarzeń podczas zderzeń fotonów z protonami. Dzięki nim można dziś powiedzieć, że maksymalne splątanie jest w tych procesach zjawiskiem uniwersalnym, obecnych w obu znanych nam mechanizmach produkcji cząstek wtórnych.

„Nasz rezultat ma znaczenie nie tylko teoretyczne, ale także praktyczne. Głębsze zrozumienie sposobu, w jaki we wnętrzu protonu formuje się stan maksymalnie splątany, pozwoli bowiem na lepszą interpretację wyników z przyszłych zderzaczy cząstek, takich jak Electron-Ion Collider”, podsumowuje prof. Kutak.

Po stronie polskiej badania zostały sfinansowane ze środków europejskiego projektu STRONG-2020 oraz grantu polsko-amerykańskiej Fundacji Kościuszkowskiej.

Institut 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:

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

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Probing the onset of maximal entanglement inside the proton in diffractive DIS”
M. Hentschinski, D. E. Kharzeev, K. Kutak, Z. Tu
Physical Review Letters, 131, 241901, 2023
DOI: [10.1103/PhysRevLett.131.241901](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.241901)

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:

IFJ240117b_fot01s.jpg

HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2024/01/17/IFJ240117b_fot01.jpg

Foton wpadający do wnętrza protonu może się zderzyć z chwilowym kompleksem gluonów, których ładunki koloru (na rysunku przedstawione na czerwono, zielono i niebiesko) mogą się sumarycznie zneutralizować. (Źródło: IFJ PAN)