



Kraków, 10 lipca 2023

## Kwantowy bilard protonowy

*Dzięki kwantowej naturze oddziaływań pomiędzy cząstkami elementarnymi, nawet z procesów tak prostych jak zderzenie elastyczne można wyciągnąć nieoczywiste wnioski. O pomiarze fundamentalnych własności oddziaływań silnych przy ultra-wysokich energiach donosi międzynarodowa grupa naukowców pracujących w eksperymencie ATLAS przy akceleratorze LHC.*

Fizyki zderzeń kul bilardowych naucza się od wczesnych lat szkolnych. Są to w dobrym przybliżeniu zderzenia elastyczne (sprężyste) i jest w nich zachowany zarówno pęd, jak i energia. Kąt rozproszenia zależy od tego jak bardzo centralne było zderzenie (mówi się o parametrze zderzenia – odległości środków bil w płaszczyźnie prostopadłej do ruchu). Przy małym parametrze zderzenia, czyli zderzeniu bardzo centralnym, kąty rozproszenia są duże. Im większy parametr zderzenia, tym mniejszy kąt rozproszenia.

Również w fizyce cząstek mamy do czynienia ze zderzeniami elastycznymi, w których dwie cząstki zderzają się i, zachowując swoją identyczność, poruszają się pod pewnym kątem do swojego pierwotnego kierunku ruchu. Tutaj też występuje zależność pomiędzy parametrem zderzenia i kątem rozproszenia. Mierząc kąty rozproszenia, poznajemy strukturę przestrzenną zderzanych cząstek i własności ich oddziaływania.

Fizycy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN, w ramach międzynarodowej Współpracy ATLAS, wykonali pomiar elastycznego rozpraszania w zderzeniach proton–proton na akceleratorze LHC przy energii w układzie środka masy równej 13 TeV. Ze względu na niezwykle małe kąty rozproszenia w takich oddziaływaniach (mniejsze niż tysięczna część stopnia), pomiary wymagały zastosowania dedykowanego układu eksperymentalnego. Jego kluczowym elementem był zestaw detektorów umieszczonych w odległości ponad 200 m od punktu zderzenia, ale mogących mierzyć rozproszone protony w odległości zaledwie kilku milimetrów od wiązki akceleratorowej. Jest to możliwe dzięki technice tak zwanych rzymskich garnków, które pozwalają na umieszczenie detektorów wewnątrz rury próżniowej akceleratora oraz na dosuwanie ich w pobliże wiązki na czas pomiaru. Ważnym wkładem grupy krakowskiej były prace nad systemem wyzwalania i akwizycji, bez którego żadne dane nie zostałyby zapisane.

Drugim istotnym elementem układu doświadczalnego było specjalne ustawienie pól w magnesach kształtujących wiązkę akceleratora LHC. W typowych pomiarach dąży się do maksymalnego skupienia wiązek, aby interesujące oddziaływania zachodziły jak najczęściej. Jednak mocno skupione wiązki mają dużą rozbieżność kątową, co praktycznie uniemożliwia pomiar rozpraszania elastycznego. Zastosowane specjalne ustawienie magnesów LHC minimalizuje tę rozbieżność i zapewnia precyzyjny pomiar.

Bezpośrednim wynikiem pomiaru opublikowanego w European Physical Journal C jest rozkład kąta rozproszenia – ściślej, rozkład zmiennej  $t$ , która jest proporcjonalna do kwadratu tego kąta. Z kształtu tego rozkładu wyciągnięto wnioski dotyczące fundamentalnych własności jądrowego oddziaływania silnego pomiędzy protonami o bardzo wysokich energiach, poruszających się praktycznie z prędkością światła. Przy wyciąganiu tych wniosków wykorzystuje się fakt, że

zderzamy nie zwykłe kule bilardowe, a protony. Wtedy bardzo istotne stają się kwantowe własności zachodzących oddziaływań.

Pierwszą z tych własności jest tak zwane twierdzenie optyczne, które jest konsekwencją zachowania prawdopodobieństwa w procesach kwantowych. Wiąże ono oddziaływania elastyczne z nieelastycznymi, to znaczy takimi, w których produkowane są dodatkowe cząstki. Ponieważ w badanych zderzeniach protony mają bardzo dużą energię, procesy nieelastyczne zdarzają się często. „*Twierdzenie optyczne umożliwiło wyznaczenie parametru zwanego całkowitym przekrojem czynnym z pomiaru jedynie oddziaływań elastycznych*” – mówi dr Rafał Staszewski, członek międzynarodowej grupy, która wykonała analizę danych eksperymentalnych.

Przekrój czynny jest wielkością używaną w fizyce cząstek na określenie szansy wystąpienia jakiejś reakcji. Całkowity przekrój czynny mówi o tym, jaka jest szansa na jakiegokolwiek zderzenie się dwóch protonów i związany jest z rozmiarem protonu. Wynik Współpracy ATLAS jest najdokładniejszym jego pomiarem przy tej energii. Tak wysoka dokładność była możliwa między innymi dzięki precyzyjnemu wyznaczeniu pozycji detektora, za co była odpowiedzialna grupa z IFJ PAN. Uzyskany wynik potwierdza ważną własność oddziaływania silnego – wzrost całkowitego przekroju czynnego wraz z rosnącą energią zderzenia. O wzroście tym można myśleć jak o zwiększaniu się rozmiaru (puchnięciu) protonów przy ich przyspieszaniu.

Dokładna znajomość całkowitego przekroju czynnego jest interesująca zarówno z punktu widzenia badań samych oddziaływań silnych, ale również w innych działach fizyki cząstek. Oddziaływania silne są istotne na przykład dla poszukiwań nowej fizyki w eksperymentach na LHC, gdzie jest ono tłem, oraz w badaniach promieniowania kosmicznego, gdzie odpowiada za rozwój wielkich pęków kosmicznych. Dokładne modelowanie tych procesów jest możliwe dzięki precyzyjnym pomiarom wielkości takich jak całkowity przekrój czynny.

W zderzeniach protonów rozpraszanie elastyczne może zachodzić na dwa sposoby: poprzez silne oddziaływanie jądrowe oraz przez oddziaływanie kulombowskie, czyli odpychanie ładunków elektrycznych. Drugą konsekwencją kwantowej natury badanego procesu jest występowanie interferencji pomiędzy nimi. Interferencja zależna jest od amplitud rozpraszania tych mechanizmów. Amplituda rozpraszania to używana w fizyce kwantowej miara prawdopodobieństwa. Od zwykłego prawdopodobieństwa różni ją to, że jej wartości nie są liczbami rzeczywistymi, a zespolonymi. Opisuje się je więc podając wartość bezwzględną i fazę albo część rzeczywistą i urojoną. Ponieważ oddziaływania kulombowskie są dobrze zrozumiane i można policzyć ich amplitudę rozpraszania, mierząc interferencję uzyskujemy wgląd zarówno w część rzeczywistą, jak i urojoną amplitudy jądrowej.

Doświadczalnie zmierzona wartość stosunku części rzeczywistej do urojonej amplitudy jądrowej okazuje się znacząco mniejsza niż wcześniejsze przewidywania modeli teoretycznych. Modele te są konsekwencją pewnych założeń dotyczących własności oddziaływań silnych. Zaobserwowana rozbieżność kwestionuje te założenia.

Pierwszym z założeń jest, że przy bardzo wysokich energiach własności zderzeń proton–antyproton są takie same jak zderzeń proton–proton i antyproton–antyproton. Choć protony składają się z kwarków i gluonów, to przy wysokich energiach zderzenia zachodzą w zasadzie jedynie pomiędzy gluonami. Ponieważ struktura gluonowa protonów i antyprotonów jest taka sama, naturalnym założeniem jest identyczność oddziaływań w różnych układach. Dopuszczenie różnicy, możliwej dzięki kwantowej naturze oddziaływań, powoduje, że modele teoretyczne zaczynają opisywać dane eksperymentalne.

Drugie założenie modeli teoretycznych dotyczy wspomnianego wcześniej puchnięcia protonu z energią. Przyjęto, że jego charakter dla energii powyżej tych mierzonych obecnie na akceleratorze LHC jest taki sam, jak obserwowany dotychczas. Jeżeli dopuści się możliwość jego spowolnienia przy wyższych energiach, modele teoretyczne zgodzą się z pomiarami.

Obie rozważane hipotezy dotyczą podstawowych własności oddziaływań silnych przy wysokich energiach. Niezależnie od tego, która z powyższych hipotez jest prawdziwa, wykonane pomiary rzucają dodatkowe światło na nasze zrozumienie oddziaływań fundamentalnych.

W obecnej chwili detektory użyte do opisanych badań są przygotowywane do kolejnych pomiarów rozpraszania elastycznego przy jeszcze wyższej energii. W IFJ PAN prowadzone są również badania innych procesów, w których istotną rolę odgrywają zarówno oddziaływania silne, jak i elektromagnetyczne. Przy tych badaniach kluczową rolę pełni technika rzymskich garnków (NCN SONATA BIS 2021/42/E/ST2/00350).

*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 medycyną, 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 **Rafał Staszewski**  
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk  
tel.: +48 12 6628361  
email: [rafal.staszewski@ifj.edu.pl](mailto:rafal.staszewski@ifj.edu.pl)

#### **PUBLIKACJE NAUKOWE:**

“Measurement of the total cross-section and  $\rho$ -parameter from elastic scattering in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”  
ATLAS Collaboration  
European Physical Journal C 83 (2023) 441  
DOI: [10.1140/epjc/s10052-023-11436-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11436-8)

#### **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:**

**IFJ230710b\_fot01s.jpg** **HR:** [http://press.ifj.edu.pl/news/2023/07/10/IFJ230710b\\_fot01.jpg](http://press.ifj.edu.pl/news/2023/07/10/IFJ230710b_fot01.jpg)  
Protony rozpędzone prawie do prędkości światła mogą zderzać się podobnie jak kule bilardowe. Ale ponieważ protony to cząstki kwantowe, z pomiaru takich zderzeń możemy dowiedzieć się nieoczywistych rzeczy o oddziaływaniach silnych. (Źródło: IFJ PAN)

**IFJ230710b\_fot02s.jpg** **HR:** [http://press.ifj.edu.pl/news/2023/07/10/IFJ230710b\\_fot02.jpg](http://press.ifj.edu.pl/news/2023/07/10/IFJ230710b_fot02.jpg)  
Okładka czasopisma European Physical Journal C, Volume 83, Issue 5, maj 2023, przedstawiająca jeden z głównych wyników opublikowanej analizy – zależność całkowitego przekroju czynnego w zderzeniach proton–proton od energii zderzenia. (Źródło: EPJ C/Springer)