



Kraków, 15 października 2024

Pierwszy spójny obraz jądra atomowego z kwarków i gluonów

Jądro atomowe składa się z protonów i neutronów, cząstek istniejących dzięki interakcjom kwarków spajanych gluonami. Wydawałoby się więc, że odtworzenie za pomocą samych kwarków i gluonów wszystkich właściwości jąder atomowych obserwowanych w dotychczasowych eksperymentach jądrowych nie powinno być trudne. Sztuki tej udało się jednak dokonać dopiero teraz, przy udziale fizyków z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie.

Od odkrycia głównych składników jąder atomowych – protonów i neutronów – minął już mniej więcej wiek. Początkowo nowe cząstki uznawano za niepodzielne. W latach 60. pojawiła się jednak sugestia, że przy odpowiednio wysokich energiach protony i neutrony ujawnią swoją strukturę wewnętrzną: obecność kwarków ustawicznie sklejających się gluonami. Wkrótce potem istnienie kwarków zostało potwierdzone doświadczalnie. Zaskakujący może się więc wydać fakt, że mimo upływu wielu dekad nikt nie potrafił za pomocą modeli kwarkowo-gluonowych odtworzyć wyników eksperymentów jądrowych przy niskich energiach, gdy w jądrach atomowych widać tylko protony i neutrony. Wieloletni impas udało się przełamać dopiero teraz, w artykule opublikowanym na łamach czasopisma „Physical Review Letters”. Jego głównymi autorami są naukowcy z międzynarodowej grupy badawczej nCTEQ zajmujący się rozkładami kwarkowo-gluonowymi, m.in. z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie.

„Do tej pory istniały dwa równoległe opisy jąder atomowych: jeden bazujący na protonach i neutronach, które możemy zobaczyć przy niskich energiach, oraz drugi, dla wysokich energii, oparty na kwarkach i gluonach. W naszej pracy udało się nam połączyć te dwa dotychczas rozdzielone światy”, mówi dr hab. Aleksander Kusina, jeden z trzech teoretyków z IFJ PAN uczestniczących w badaniach.

Człowiek widzi swoje otoczenie, ponieważ za pomocą wrodzonych detektorów (oczu) rejestruje rozproszone fotony, które wcześniej oddziaływały z atomami i cząsteczkami tworzącymi obiekty naszego otoczenia. Fizycy zdobywają wiedzę o jądrach atomowych w podobny sposób: ostrzeliwiają je mniejszymi cząstkami i skrupulatnie analizują rezultaty zderzeń. Z przyczyn praktycznych używa się jednak nie elektrycznie obojętnych fotonów, lecz cząstek elementarnych niosących ładunek, zwykle elektronów. Z eksperymentów wynika wówczas, że gdy elektrony mają stosunkowo niskie energie, jądra atomowe zachowują się tak, jakby były zbudowane z nukleonów (czyli protonów oraz neutronów), podczas gdy przy wysokich energiach elektronów, wewnątrz jąder atomowych „widać” partony (czyli kwarki i gluony). Rezultaty zderzania jąder atomowych z elektronami odtwarzano dość dobrze, do opisu zderzeń niskoenergetycznych używając modeli zakładających istnienie samych nukleonów, a do zderzeń wysokoenergetycznych – samych partonów. Jednak do tej pory te dwa opisy nie dawały się połączyć w spójny obraz.

W swojej pracy fizycy z IFJ PAN wykorzystali dane dotyczące zderzeń wysokoenergetycznych, w tym zebrane za pomocą detektorów akceleratora LHC w ośrodku CERN w Genewie. Głównym celem było badanie struktury partonowej jąder atomowych przy wysokich energiach, obecnie opi-

sywanej przez funkcje rozkładu partonów (parton distribution functions – PDFs). Funkcje te są używane do odwzorowania, jak kwarki i gluony rozkładają się wewnątrz protonów i neutronów oraz w całym jądrze atomowym. Dysponując funkcjami PDF dla jądra atomowego można wyznaczać parametry mierzalne doświadczalnie, takie jak prawdopodobieństwo powstania określonej cząstki w zderzeniu elektronu lub protonu z jądrem.

Od strony teoretycznej istotą innowacji zaproponowanej w omawianym artykule było umiejętne rozbudowanie funkcji rozkładu partonów, inspirowane tymi modelami jądrowymi służącymi do opisu zderzeń niskoenergetycznych, gdzie zakładano, że protony i neutrony łączą się w silnie oddziałujące pary nukleonów: proton-neutron, proton-proton i neutron-neutron. Nowatorskie podejście pozwoliło badaczom wyznaczyć dla 18 badanych jąder atomowych funkcje rozkładu partonów w jądrach atomowych, rozkłady partonów w skorelowanych parach nukleonów, a nawet liczby takich skorelowanych par. Rezultaty potwierdziły obserwację znaną z eksperymentów niskoenergetycznych, zgodnie z którą większość skorelowanych par to pary proton-neutron (wynik ten jest szczególnie interesujący dla ciężkich jąder, np. złota czy ołowiu). Inną zaletą podejścia zaproponowanego w artykule jest lepszy opis danych doświadczalnych niż w przypadku metod tradycyjnych, standardowo stosowanych do wyznaczania rozkładów partonowych PDF w jądrach atomowych.

„W naszym modelu wprowadziliśmy modyfikacje symulujące zjawisko łączenia się pewnych nukleonów w pary. Uznaliśmy bowiem, że efekt może być istotny także na poziomie partonowym. Co ciekawe, pozwoliło to na koncepcyjne uproszczenie opisu teoretycznego, które w przyszłości powinno umożliwić nam bardziej precyzyjne badanie rozkładów partonowych dla poszczególnych jąder atomowych”, wyjaśnia dr Kusina.

Zgodność przewidywań teoretycznych z danymi eksperymentalnymi oznacza, że za pomocą modelu partonowego i danych z obszaru wysokich energii po raz pierwszy udało się odtworzyć zachowania jąder atomowych dotychczas tłumaczone wyłącznie za pomocą opisu nukleonowego i danych ze zderzeń o niskich energiach. Wyniki opisanych badań otwierają nowe perspektywy dla lepszego zrozumienia struktury jądra atomowego, unifikującego jego aspekty wysoko- i niskoenergetyczne.

Prace fizyków z IFJ PAN nad odtworzeniem struktury nukleonowej z użyciem modelu partonowego zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki.

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:

dr hab. **Aleksander Kusina**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628360
email: aleksander.kusina@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Evidence for Modified Quark-Gluon Distributions in Nuclei by Correlated Nucleon Pairs”

A. W. Denniston, T. Jezo, A. Kusina, N. Derakhshanian, P. Duwentaster, O. Hen, C. Keppel, M. Klasen, K. Kovarik, J. G. Morfin, K. F. Muzakka, F. I. Olness, E. Piasetzky, P. Risse, R. Ruiz, I. Schienbein, J. Y. Yu
Physical Review Letters 2024, 133, 152502
DOI: [10.1103/PhysRevLett.133.152502](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.152502)

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:

IFJ241015b_fot01s.jpg

HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2024/10/15/IFJ241015b_fot01.jpg

Po raz pierwszy za pomocą kwarków i gluonów udało się opisać cechy jąder atomowych dotychczas wyjaśniane istnieniem protonów i neutronów. Chwilową parę skorelowanych nukleonów wyróżniono kolorem fioletowym. (Źródło: IFJ PAN)