



Kraków, 17 marca 2022

Wnętrze protonu jest maksymalnie splątane

Fragmenty wnętrza protonu są ze sobą kwantowo splątane, na dodatek w maksymalny sposób, wykazali naukowcy z Meksyku i Polski. Odkrycie, już skonfrontowane z danymi doświadczalnymi, pozwala przypuszczać, że pod pewnymi względami fizyka wnętrza protonu może mieć wiele wspólnego nie tylko z dobrze znanymi zjawiskami termodynamicznymi, ale nawet z fizyką... czarnych dziur.

Różne części wnętrza protonu muszą być ze sobą maksymalnie splątane, w przeciwnym razie przewidywania teoretyczne nie zgadzałyby się z danymi zebranymi w eksperymentach, wykazano na łamach czasopisma „*European Physical Journal C*”. Z zaprezentowanego tam modelu teoretycznego (będącego rozszerzeniem wcześniejszej konstrukcji Dimitriego Kharzeeva i Eugene’a Levina) wynika, że wbrew obecnemu przekonaniu fizyka działająca we wnętrzu protonów może mieć związek z takimi pojęciami jak entropia czy temperatura, co z kolei może ją wiązać z tak egzotycznymi tworam jak czarne dziury. Autorami odkrycia są dr Martin Hentschinski z meksykańskiego Universidad de las Americas Puebla oraz dr hab. Krzysztof Kutak z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie.

Meksykańsko-polski zespół analizował od strony teoretycznej sytuację, w której protony są ostrzeliwane elektronami. Gdy nadlatujący elektron, niosący ujemny ładunek elektryczny, zbliża się do dodatnio naładowanego protonu, oddziałuje z nim elektromagnetycznie i odchyła swój tor ruchu – tym bardziej, im silniejsza była interakcja. Oddziaływanie elektromagnetyczne oznacza, że między elektronem a protonem doszło do wymiany fotonu. Im silniejsze było to oddziaływanie, tym większa była zmiana pędu fotonu, a zatem tym krótsza była związana z nim fala elektromagnetyczna.

„Jeśli foton jest dostatecznie 'krótki', by 'zmieścić' się w protonie, zaczyna 'wyczuwać' detale jego budowy wewnętrznej. Wskutek oddziaływania z takim fotonem proton może się rozpaść na cząstki pochodne. My wykazaliśmy, że między obu sytuacjami występuje splątanie: jeśli obserwacja przez foton części wnętrza protonu doprowadziła do jego rozpadu na pewną liczbę cząstek pochodnych, dajmy na to trzy, to liczba cząstek pochodzących z nieobserwowanej części protonu jest zdeterminowana przez liczbę cząstek zauważonych w obserwowanej części protonu”, wyjaśnia dr Kutak.

O kwantowym splątaniu można mówić wtedy, gdy w różnych obiektach kwantowych wartości pewnej cechy są ze sobą powiązane. Klasyczną analogię zjawiska można przedstawić za pomocą rzutu monetą. Przyjmijmy, że jeden obiekt to jedna strona monety, a drugi obiekt to jej druga strona. Jeśli rzucamy jedną monetą, z tym samym prawdopodobieństwem moneta może upaść do góry orłem lub reszką. Jeśli wypadnie orzeł, wiemy z pewnością, że po drugiej stronie musiała być reszka. Możemy wtedy mówić o maksymalnym splątaniu, ponieważ prawdopodobieństwo określające wartość cechy obiektu nie faworyzuje żadnej możliwej wartości: mamy 50% szans na reszkę i tyle samo na orła. Splątanie mniejsze od maksymalnego pojawia się wtedy, gdy prawdopodobieństwo zaczyna mniej lub bardziej faworyzować któryś z możliwych wyników.

„Z naszych badań wynika, że wnętrza protonu zauważone przez przelatujący foton musi być splątane z częścią niedostrzeżoną właśnie w sposób maksymalny. W praktyce oznacza to, że nie

mamy żadnych szans przewidzieć, czy wskutek oddziaływania z fotonem proton rozpadnie się na trzy, cztery czy na inną liczbę cząstek pochodnych”, tłumaczy dr Hentschinski.

Przewidywania teoretyczne obu fizyków zostały już zweryfikowane. Gdyby splątanie we wnętrzu protonu nie było maksymalne, pojawiłyby się rozbieżności w stosunku do wyników eksperymentu H1 przy akceleratorze HERA w ośrodku DESY w Hamburgu, gdzie do 2007 roku zderzano z protonami pozytony (czyli antycząstki elektronów). Takich rozbieżności nie zauważono.

Sukces meksykańsko-polskiego tandemu wynika z faktu, że badaczom udało się poprawnie zidentyfikować czynniki odpowiedzialne za maksymalne splątanie wnętrza protonu.

W szkolnym, naiwnym ujęciu proton jest zlepkiem trzech cząstek elementarnych: dwóch kwarków górnych i jednego dolnego. Jednak oddziaływania silne między tymi kwarkami, przenoszone przez gluony, mogą być tak potężne, że prowadzą do powstawania wirtualnych par cząstka-antycząstka. Mogą to być nie tylko pary wirtualnych gluonów (które są własnymi antycząstkami), ale również pary zbudowane z jakiegoś kwarka i odpowiadającego mu antykwarka (nawet tak masywnego jak powabny). Wszystko to powoduje, że wewnątrz protonu oprócz trzech kwarków walencyjnych znajdują się ciągle „wrzące” morza wirtualnych gluonów oraz wirtualnych kwarków i antykwarków.

„We wcześniejszych publikacjach zajmujący się tematyką specjaliści zakładali, że źródłem splątania powinno być morze gluonów. Później próbowano pokazać, że dominującym źródłem splątania są kwarki i antykwarki, lecz i tu zaproponowane metody opisu nie wytrzymały próby czasu. Tymczasem zgodnie z naszym modelem, zweryfikowanym przez konfrontację z danymi eksperymentalnymi, morze wirtualnych gluonów odpowiada za mniej więcej 80% splątania, podczas gdy morze wirtualnych kwarków i antykwarków za pozostałe 20%”, podkreśla dr Kutak.

Od niedawna fizycy kwantowi wiążą ze stanem we wnętrzu protonu entropię. Jest to wielkość dobrze znana z klasycznej termodynamiki, gdzie służy do mierzenia stopnia nieuporządkowania ruchu cząstek analizowanego układu. Przyjmuje się, że gdy układ jest nieuporządkowany, to ma dużą entropię, podczas gdy układ uporządkowany ma ją małą. Niedawno wykazano, że w przypadku protonu z powodzeniem można mówić o entropii splątania. Jednak wielu fizyków uznawało proton za stan kwantowo czysty, w którym w ogóle nie powinno się mówić o entropii. Zgodność polsko-meksykańskiego modelu z doświadczeniem to silny argument za tym, że w odniesieniu do splątania we wnętrzu protonu wprowadzenie pojęcia entropii przez poprzedników (Kharzeeva i Levina) jednak ma rację bytu. A ponieważ entropię splątania wiąże się także z takimi pojęciami jak powierzchnia czarnych dziur, najnowszy wynik otwiera ciekawe pole do dalszych badań.

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 kategoryzacji MNIŚW Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w grupie nauk ścisłych i inżynierskich.

KONTAKT:

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

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Evidence for the maximally entangled low x proton in Deep Inelastic Scattering from H1 data”
M. Hentschinski, K. Kutak
European Physical Journal C, 82, 111 (2022)
DOI: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10056-y>

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:

IFJ220317b_fot01_PLS.jpg

HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2022/03/17/IFJ220317b_fot01_PL.jpg

Jeśli foton niesie za mało energii, nie mieści się wewnątrz protonu (po lewej). Foton o dostatecznie dużej energii jest tak mały, że wlatuje do wnętrza protonu, gdzie zauważa jego część (po prawej). Między obszarami „zauważonym” a „niezauważonym” staje się wtedy widoczne maksymalne splątanie. (Źródło: IFJ PAN)