



Kraków, 26 czerwca 2020 r.

Natura sił jądrowych odcisnięta w fotonach

Naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk wraz ze współpracownikami z Uniwersytetu w Mediolanie oraz innych krajów potwierdzili konieczność uwzględnienia oddziaływania trójnukleonowego w opisie elektromagnetycznych przejść w jądrze atomowym ^{20}O . Istotnym elementem służącym do weryfikacji współczesnych obliczeń teoretycznych struktury jądrowej było zastosowanie najnowocześniejszych układów detektorów promieniowania gamma oraz nowo opracowanej techniki pomiaru femtosekundowych czasów życia egzotycznych jąder wytwarzanych w głęboko nieelastycznych reakcjach ciężkich jonów.

Jądra atomowe składają się z nukleonów – protonów i neutronów. Protony i neutrony są z kolei układami kwarków i gluonów związanych oddziaływaniami silnymi, czyli jądrowymi. Fizyka kwarków i gluonów opisywana jest przez chromodynamikę kwantową (QCD), można by więc oczekiwać, że także właściwości sił jądrowych będą wynikały z tej teorii. Niestety, pomimo wielu usiłowań, wyznaczenie charakterystyk oddziaływań silnych w oparciu o QCD napotyka na ogromne trudności obliczeniowe. O własnościach sił jądrowych wiadomo jednak stosunkowo dużo – wiedza ta uzyskana została na podstawie wieloletnich eksperymentów. Skonstruowano również modele teoretyczne, które potrafią odtworzyć podstawowe właściwości sił działających pomiędzy parą nukleonów – opierają się one na tak zwanych efektywnych potencjałach oddziaływania nukleon-nukleon.

Znając szczegóły interakcji pomiędzy dwójkami nukleonów, można by się spodziewać, że opis struktury dowolnego jądra atomowego nie będzie stanowić problemu. Okazuje się jednak, że gdy do układu dwóch nukleonów doda się trzeci, siła przyciągania pomiędzy dwoma pierwszymi nukleonami wzrasta. Podobnie zwiększa się siła oddziaływania pomiędzy składnikami każdej pary nukleonów znajdującej się w układzie trójciałowym – pojawia się dodatkowa siła, która nie występuje w przypadku izolowanej pary. Ten zagadkowy przyczynek nazywany jest nieredukowalną siłą trójnukleonową.

Sytuacja ta stała się inspiracją dla naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk oraz ich kolegów z Uniwersytetu w Mediolanie, którzy zorientowali się, że dobrym testem na występowanie w jądrach sił trójnukleonowych może być określenie czasów rozpadu wyselekcjonowanych stanów wzbudzonych występujących w bogatych w neutrony izotopach tlenu i węgla. W wyniku dogłębnych analiz narodził się pomysł eksperymentu, którego koordynatorami zostali prof. Silvia Leoni z Uniwersytetu Mediolańskiego oraz dr Michał Ciemała i prof. Bogdan Fornal z IFJ PAN. Do współpracy zaproszono również badaczy pracujących we francuskim laboratorium GANIL w Caen.

Celem eksperymentu było wyznaczenie czasów życia wzbudzonych stanów jądrowych dla bogatych w neutrony izotopów węgla i tlenu, ^{16}C oraz ^{20}O – wyjaśnia prof. Fornal. – To właśnie w tych jądrach występują stany wzbudzone, które wydają się być szczególnie czułe na uwzględnienie w obliczeniach również oddziaływania trójciałowego (nukleon-nukleon-nukleon – NNN) oprócz oddziaływania jądrowego dwuciałowego (nukleon-nukleon – NN). W przypadku jądra ^{20}O czas życia

drugiego stanu wzbudzonego 2+ obliczony z uwzględnieniem wyłącznie oddziaływania NN powinien wynosić 320 femtosekund, natomiast przy uwzględnieniu oddziaływań NN oraz NNN obliczenia dają wynik 200 femtosekund. Dla czasu życia drugiego stanu 2+ w ^{16}C różnica jest jeszcze większa: 370 femtosekund (NN) w porównaniu do 80 femtosekund (NN + NNN).

Eksperyment mający na celu pomiar czasów życia przeprowadzono w ośrodku badawczym GANIL znajdującym się w Caen we Francji. Wykorzystano w nim detektory promieniowania gamma (AGATA oraz PARIS) połączone ze spektrometrem magnetycznym (VAMOS). W reakcji wiązki ^{18}O z tarczą ^{181}Ta powstawały wzbudzone jądra atomowe pierwiastków B, C, N, O i F w wyniku procesów głębokiego nieelastycznego rozpraszania lub transferu nukleonów. Wzbudzone stany kwantowe w badanych poruszających się jądrach rozpadały się poprzez emisję wysokoenergetycznych fotonów, których energia była przesunięta względem energii przejść w układzie spoczynkowym. Przesunięcie to jest zależne od prędkości emitującego je jądra oraz kąta emisji. Zjawisko to opisuje relatywistyczny wzór Dopplera.

Dla czasów życia poziomów jądrowych krótszych niż czas przelotu wzbudzonego jądra przez tarczę (około 300 femtosekund) emisja kwantu gamma w większości przypadków może nastąpić, gdy jądro znajduje się jeszcze w tarczy. W opisywanym przypadku naukowcy dokonywali pomiaru prędkości jądra po przejściu przez tarczę i, używając tej prędkości do skorygowania widma energii promieniowania gamma, otrzymali linie widmowe o kształcie odpowiadającym rozkładowi Gaussa dla przypadków, gdy czas życia stanu wzbudzonego jest długi, oraz linie widmowe posiadające asymetryczną komponentę dla czasów życia z zakresu 100–200 femtosekund lub całkowicie przesunięte do mniejszych energii (dla czasu życia poniżej 100 femtosekund).

Do wyznaczenia wartości czasu życia przeprowadziliśmy symulację, których wynik porównaliśmy ze zmierzonym widmem energii promieniowania gamma – mówi dr Ciemala, autor wykorzystanej w doświadczeniu nowatorskiej koncepcji pomiaru czasu rozpadu stanów jądrowych. – W opisywanym eksperymencie po raz pierwszy zastosowano wyżej opisaną metodę do wyznaczenia czasu życia wzbudzonych stanów w jądrach wytworzonych w reakcjach głęboko nieelastycznych. Wymagało to stworzenia zaawansowanych kodów symulacyjnych Monte Carlo, uwzględniających kinematykę reakcji, a także odtwarzających zmierzone rozkłady prędkości produktów reakcji. Zastosowana metoda, w połączeniu z użytymi układami detekcyjnymi, pozwoliła uzyskać ostateczny wynik.

Dzięki opisanym pracom badawczym po raz pierwszy udało się zmierzyć czas życia rzędu dziesiątek i setek femtosekund stanu jądrowego utworzonego w reakcji głęboko nieelastycznej – w opisanym przypadku był to drugi stan 2+ w jądrze ^{20}O . Poprawność działania nowej metody wykazano przez określenie czasów życia dla stanów wzbudzonych w jądrze ^{19}O , które odpowiadały danym literaturowym. Co istotne, czas życia badanego stanu w ^{20}O zgadza się z przewidywaniami obliczeń teoretycznych tylko wtedy, gdy zostaną w nich uwzględnione jednocześnie oddziaływania dwu- i trójciałowe. Dzięki temu można użyć wielkości pomiarowych dostarczanych przez przejścia elektromagnetyczne i uzyskanych za pomocą precyzyjnej spektroskopii gamma do oceny jakości obliczeń *ab initio* struktury jądrowej.

Opracowana procedura umożliwiła prowadzenie pomiarów czasów życia stanów wzbudzonych dla bardzo egzotycznych jąder dalekich od ścieżki stabilności, możliwych do utworzenia w reakcjach głęboko nieelastycznych z zastosowaniem wiązek radioaktywnych o dużych intensywnościach, które będą niedługo dostępne na przykład w laboratorium INFN Laboratori Nazionali di Legnaro koło Padwy we Włoszech – przekonuje prof. Fornal. – Uzyskane informacje będą niezwykle istotne z punktu widzenia astrofizyki jądrowej i z pewnością przyczynią się do postępu w rozumieniu tworzenia jąder atomowych w procesie „r” zachodzącym podczas wybuchów supernowych lub łączenia się gwiazd neutronowych, które zostało ostatnio zaobserwowane za pomocą pomiaru fal grawitacyjnych w koincydencji z promieniowaniem gamma.

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie zajmuje się strukturą materii i własnościami oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po wnętrza cząstek elementarnych. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, 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. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość” o statusie Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW) na lata 2012-2017. Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. W 2017 roku 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 MNiSW Instytut został zaliczony do kategorii naukowej A+ w grupie nauk ścisłych i inżynierskich.

KONTAKT:

dr inż. Michał Ciemala
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 662 8207
e-mail: michal.ciemala@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

1. M. Ciemala, S. Ziliani, F.C.L. Crespi, S. Leoni, B. Fornal, A. Maj, P. Bednarczyk, G. Benzoni, A. Bracco, C. Boiano, S. Bottoni, S. Brambilla, M. Bast, M. Beckers, T. Braunroth, F. Camera, N. Cieplicka-Oryńczak¹, E. Clément⁵, S. Coelli, O. Dorvaux, S. Erturk, G. de France, C. Fransen, A. Goldkuhle, J. Grębosz, M.N. Harakeh, L.W. Iskra, B. Jacquot, A. Karpov, M. Kicińska-Habior, Y. Kim, M. Kmiecik, A. Lemasson, S.M. Lenzi, M. Lewitowicz, H. Li, I. Matea, K. Mazurek, C. Michelagnoli, M. Matejska-Minda, B. Million, C. Müller-Gatermann, V. Nanal, P. Napiorkowski, D.R. Napoli, R. Palit, M. Rejmund, Ch. Schmitt, M. Stanoiu, I. Stefan, E. Vardaci, B. Wasilewska, O. Wieland, M. Zieblinski, M. Zielińska²⁰, A. Ataş, D. Barrientos, B. Birkenbach, A.J. Boston, B. Cederwall, L. Charles, J. Collado, D.M. Cullen, P. Désesquelles, C. Domingo-Pardo, J. Dudouet, J. Eberth, V. González, J. Goupil, L.J. Harkness-Brennan, H. Hess, D.S. Judson, A. Jungclaus, W. Korten, M. Labiche, A. Lefevre, R. Menegazzo, D. Mengoni, J. Nyberg, R.M. Perez-Vidal, Zs. Podolyak, A. Pullia, F. Recchia, P. Reiter, F. Saillant, M.D. Salsac, E. Sanchis, O. Stezowski, Ch. Theisen, J.J. Valiente-Dobón, J.D. Holt, J. Menéndez, A. Schwenk, J. Simonis
„Testing *ab initio* nuclear structure in neutron-rich nuclei: lifetime measurements of second 2+ states in ¹⁶C and ²⁰O”
Physical Review C 101, 021303(R) (2020)
DOI: 10.1103/PhysRevC.101.021303
Otwarty dostęp: <https://arxiv.org/pdf/2002.04814.pdf>

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:

IFJ20200626_foto1s.jpg

HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2020/06/26/IFJ20200626_foto1.jpg

Dwuwymiarowa mapa powierzchni „jakości dopasowania linii gamma” (powierzchni χ^2) w funkcji jej energii przejścia E_γ i czasu życia τ badanego stanu jądrowego. Minimum powierzchni, zaznaczone krzyżem, wyznacza najlepsze wartości dopasowania E_γ i τ , a czarna linia obrazuje niepewności (błędy) tych wielkości. W tle grafiki przedstawiono trzy układy detektorów używanych podczas eksperymentu: AGATA, PARIS i VAMOS. (Źródło: IFJ PAN)