



Kraków, 30 grudnia 2020 r.

Mapa deformacji jąder atomowych przypomina swym kształtem górski krajobraz

Do niedawna uważano, że jedynie jądra bardzo masywnych pierwiastków mogą posiadać wzbudzone stany ze spinem zerowym o zwiększonej stabilności, w których przyjmują kształt znacznie różniący się od ich kształtu normalnego. Tymczasem międzynarodowy zespół badaczy z Rumunii, Francji, Włoch, USA i Polski w swej najnowszej pracy wykazał, że stany takie istnieją również w dużo lżejszych jądrach niklu. Pozytywna weryfikacja uwzględnionego w tych doświadczeniach modelu teoretycznego pozwala na opisywanie właściwości układów jądrowych niedostępnych w ziemskich laboratoriach.

Jądro atomowe stanowi ponad 99,9% masy atomu, choć jego objętość jest ponad bilion razy mniejsza od objętości całego atomu. Wynika stąd, iż ma ono zdumiewającą gęstość około 150 milionów ton na centymetr sześcienny, czyli jedna łyżka stołowa materii jądrowej waży niemal tyle, co kilometr sześcienny wody. Pomimo bardzo małych rozmiarów i niewyobrażalnej gęstości, jądra atomowe są złożonymi strukturami zbudowanymi z protonów i neutronów. Można by się spodziewać, że tak niesamowicie gęste obiekty będą miały kulisty kształt. W rzeczywistości wygląda to jednak nieco inaczej: większość jąder jest zdeformowana – są spłaszczone lub wydłużone wzdłuż jednej lub nawet dwóch osi jednocześnie. Aby znaleźć właściwy kształt danego jądra, zwykle tworzy się krajobraz energii potencjalnej jako funkcji odkształcenia. Krajobraz ten można zilustrować za pomocą mapy, na której współrzędne na płaszczyźnie są parametrami deformacji, czyli miarą wydłużenia lub spłaszczenia wzdłuż dwóch osi, a kolor oznacza ilość energii potrzebnej do nadania jądra określonego kształtu. Taka mapa stanowi odpowiednik mapy geograficznej terenu górskiego.

Jeśli w reakcji jądrowej powstanie jądro, to pojawia się ono w określonym punkcie krajobrazu, czyli posiada jakiś stopień deformacji. Następnie zaczyna się staczać (zmieniać odkształcenie) w kierunku punktu o najniższej energii (stabilnej deformacji). Jednak w pewnych okolicznościach, przed osiągnięciem stanu podstawowego, może przerwać na moment swą podróż i zatrzymać się w lokalnym minimum odgrywającym rolę pułapki, która odpowiada metastabilnemu odkształceniu. Zjawisko to w dużym stopniu przypomina zachowanie wody, która wytryskuje w postaci źródła w określonym miejscu obszaru górskiego i zaczyna spływać w dół. Zanim dotrze do najniższej doliny, może przez pewien czas pozostać uwięziona w lokalnych zagłębieniach terenu. Jeśli to miejsce jest połączone strumieniem z najniższym punktem krajobrazu, ciecz spłynie w dół. Jeśli jednak lokalna dolina jest dobrze odizolowana, woda pozostanie w zagłębieniu przez bardzo długi czas.

Dotychczas wykonane eksperymenty wykazały, że lokalne minima w krajobrazie odkształceń jąder atomowych z zerowym spinem rzeczywiście istnieją, ale tylko w masywnych jądrach o liczbie atomowej większej niż 89 (aktyn) i całkowitej liczbie protonów i neutronów znacznie przekraczającej 200. Takie jądra mogą pozostawać w owych metastabilnych minimach lokalnych odpowiadających różnym deformacjom przez czas nawet kilkadziesiąt milionów razy dłuższy niż potrzebny do przejścia w stan podstawowy bez spowolnienia przez pułapkę. Jeszcze całkiem niedawno wśród jąder lżejszych pierwiastków nie obserwowano stanu wzbudzonego o spinie zerowym związanego z metastabilną deformacją. Sytuacja uległa zmianie kilka lat temu, kiedy w niklu-66, którego jądro zbudowane jest z 28 protonów i 38 neutronów, znaleziono stan o znacznym zniekształceniu i zwiększonej stabilności. To odkrycie zostało poprzedzone rachunkami wykonanymi w ramach

modelu powłokowego przy użyciu wyrafinowanych metod Monte Carlo opracowanych przez teoretyków z Uniwersytetu Tokijskiego, które pozwoliły przewidzieć istnienie tej deformacyjnej pułapki.

„Obliczenia przeprowadzone przez naszych japońskich kolegów dały także inny nieoczekiwany wynik – mówi prof. Bogdan Fornal z IFJ PAN. – Wykazali oni, że głęboka lokalna dolina (pułapka) związana ze znaczną deformacją powinna występować również w krajobrazie energii potencjalnej niklu-64, jądra o dwóch neutronach mniej niż nikiel-66, które do tej pory uważano za mające wyłącznie minimum globalne o sferycznym kształcie. Problem polegał na tym, że w niklu-64 przewidziano lokalną dolinę przy wysokiej energii wzbudzenia – czyli na dużej wysokości w analogii krajobrazu górskiego – i niezwykle trudno było znaleźć eksperymentalną metodę umieszczenia jądra w tej pułapce”.

Podjęte badania objęły cztery uzupełniające się eksperymenty, które wspólnie wykonali eksperymetatorzy z Rumunii (IFIN-HH w Bukareszcie), Francji (Institut Laue-Langevin w Grenoble), Włoch (Uniwersytet Mediolański), USA (Uniwersytet Karoliny Północnej i TUNL) oraz Polski (Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie). Pomiar przeprowadzono w czterech różnych laboratoriach w Europie i Stanach Zjednoczonych: Institut Laue-Langevin (Grenoble, Francja), IFIN-HH Tandem Laboratory (Rumunia), Argonne National Laboratory (Chicago, USA) oraz Triangle Universities Nuclear Laboratory (TUNL, Karolina Północna, USA). Zastosowano różne mechanizmy reakcji, w tym przekaz protonów i neutronów, wychwyty neutronów termicznych, wzbudzenie kulombowskie oraz naświetlanie wiązką kwantów gamma, a wszystko to w połączeniu z najnowocześniejszymi technikami wykrywania promieniowania gamma.

Zebrane dane opracowane całościowo pozwoliły jednoznacznie wykazać istnienie nawet dwóch minimów lokalnych w krajobrazie energii potencjalnej niklu-64, odpowiadających spłaszczonym i wydłużonym kształtom elipsoidalnym, przy czym zagłębienie przyporządkowane formie wydłużonej jest głębokie i dobrze izolowane, na co wskazywało znaczne opóźnienie przejścia do globalnego minimum sferycznego.

„Czas, przez jaki jądro przebywa w minimum odpowiadającym wydłużonej postaci jądra Ni-64, nie jest tak długi, jak w przypadku ciężkich jąder, gdzie zwiększa się nawet dziesiątki milionów razy. Zarejestrowaliśmy wzrost zaledwie kilkudziesięciokrotny. Wspaniałym osiągnięciem jest jednak fakt, że wzrost ten pozostaje zbliżony do wartości przewidywanej przez nowy model teoretyczny” – stwierdza prof. Fornal.

Szczególnie cennym wynikiem tych badań jest identyfikacja nieuwzględnianej wcześniej składowej siły działającej między nukleonami w złożonych układach jądrowych, tak zwanego monopolowego oddziaływania tensorowego, które odpowiada za różnorodność krajobrazu deformacji zaobserwowaną w jądrach niklu. Przypuszcza się, że właśnie to oddziaływanie w dużej mierze kształtuje strukturę wielu jąder, które pozostają dotychczas nieodkryte.

W szerszej perspektywie, przedstawione tutaj badania pokazują, że zastosowane podejście teoretyczne, pozwalające na poprawne przewidzenie bardzo unikalnych cech jąder niklu, ma duży potencjał w opisywaniu właściwości tysięcy układów jądrowych dotychczas niedostępnych dla laboratoriów na Ziemi, ale nieustannie tworzonych w gwiazdnych reakcjach.

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.

