

Jądra podwójnie magiczne

9 października 2017

Wnikliwe badania jąder atomów ołowiu 208 ujawniają ich zaskakujące właściwości.

Jądra atomowe na ogół wyobrażamy sobie jako mniej lub bardziej kuliste, ale zawsze dość chaotyczne zlepki protonów i neutronów. Eksperymenty w Argonne National Laboratory, inspirowane przez fizyków z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, próbują weryfikować te naiwne wyobrażenia. Używając analogii astronomicznej można powiedzieć, że o ile większość jąder w zarysie jest podobna do obiektów skalistych, takich jak księżyce czy planetoidy o różnych kształtach, o tyle jądra ołowiu 208 w pewnych warunkach przypominają planety otoczone gęstą atmosferą, która może się przetaczać wokół sztywnego rdzenia.

Od kilkunastu lat fizycy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN) w Krakowie we współpracy z naukowcami z Argonne National Laboratory (ANL) w Illinois, USA, prowadzą badania nad własnościami jąder atomów ołowiu 208. Niedawno opublikowana analiza, podsumowująca eksperymenty przeprowadzone w ANL z użyciem nadprzewodzącego akceleratora ATLAS oraz Gammasphere, najbardziej wyrafinowanego detektora promieniowania gamma na świecie, doprowadziła do ciekawych wniosków. Okazuje się, że w pewnych warunkach w jądrach ołowiu 208 powstają nowe, stosunkowo trwałe i nieprzewidziane przez teorię stany energetyczne. Co więcej, natrafiono na wskazówki sugerujące istnienie w takich jądrach wcześniej nigdy nieobserwowanej struktury o kolektywnym charakterze.

„Jądra atomowe można wzbudzać do różnych stanów energetycznych, w tym do takich, w których będą bardzo szybko wirować. Jednak nie wszystkie jądra w takich stanach muszą się rzeczywiście obracać”, mówi prof. dr hab. Rafał Broda (IFJ PAN), pierwszy autor publikacji wyróżnionej przez redakcję

czasopisma „Physical Review C”, i wyjaśnia: „Jądro ołowiu 208 składa się z 82 protonów i 126 neutronów i z bardzo dobrym przybliżeniem może być traktowane jako kuliste. Gdy za pomocą równań mechaniki kwantowej opisujemy jądra o takim kształcie, mówienie o obrocie jądra przestaje mieć sens, ponieważ pozycje w różnych fazach obrotu są nierozróżnialne, nie ma więc zmian energii. Dlatego przyjmuje się, że jądra kuliste nie wirują, a związana z obrotem wielkość fizyczna – spin jądra – pochodzi w całości od kilku sprzężonych ze sobą nukleonów poruszających się po swoich orbitach. Tymczasem z naszych badań wynika, że w jądrach ołowiu 208 obserwuje się w szerokim zakresie wielkości spinu, aż po stany wysokospinowe, sekwencję stanów, którą można interpretować jako związaną z kolektywnym obrotem. Pytanie za milion brzmi więc: co w takim jądrze się obraca?”.

We współczesnej fizyce budowę całych atomów opisuje się za pomocą modelu powłokowego. Przyjmuje się w nim, że elektrony, niosące ujemny ładunek elektryczny, poruszają się w znacznych odległościach wokół dodatnio naładowanego, praktycznie punktowego jądra. Duże prawdopodobieństwo znalezienia elektronu jest jednak tylko w pewnych obszarach – tam, gdzie energia elektronów przyjmuje ściśle określone wartości. Jądro w atomie jest więc otoczone przez przestrzenną strukturę, utworzoną przez mniejszą lub większą liczbę powłok energetycznych. Każda powłoka ma pewną maksymalną pojemność i jeśli liczba elektronów ją przekroczy, nadmiarowe elektrony muszą się rozlokować na następnej, bardziej oddalonej od jądra powłoce.

Gdy najbardziej zewnętrzna powłoka elektronowa zapełni się elektronami, atom niechętnie wchodzi w reakcje z innymi atomami bądź cząsteczkami. W chemii takie pierwiastki nazywa się gazami szlachetnymi ze względu na ich szczególną stabilność i brak aktywności chemicznej.

Jądra atomowe to obiekty znacznie bardziej złożone od atomów traktowanych jako punktowy ładunek dodatni otoczony gromadką odległych elektronów. Nukleony, czyli tworzące jądra protony i

neutrony, mają masy tysiące razy większe niż elektron, na dodatek wszystkie cząstki znajdują się blisko siebie i wchodzi w liczne interakcje jądrowe i elektromagnetyczne. Dlatego w swoim czasie wielkim zaskoczeniem dla fizyków było odkrycie, że model powłokowy sprawdza się także w odniesieniu do jąder atomowych. Sytuacja jest tu jednak ciekawsza, bo neutrony i protony tworzą w jądrze własne powłoki, które są szczególnie stabilne dla liczb nukleonów znanych jako liczby magiczne. Jądra z całkowicie zapełnionymi powłokami protonowymi i neutronowymi fizycy nazywają podwójnie magicznymi. Ołów 208 jest w tym gronie wyjątkowy, ponieważ jest najbardziej masywnym jądrem podwójnie magicznym.

Własności jąder ołowiu 208 w stanach o małym spinie są poznane dość dobrze, natomiast w przypadku stanów wysokospinowych do niedawna było znacznie gorzej. Jądra atomowe w takich stanach wytwarza się bowiem w procesie fuzji zachodzącej w zderzeniach, do których dochodzi podczas ostrzału tarczy z odpowiednio dobranego materiału dopasowanymi cząstkami bombardującymi. Niestety, nie istnieje kombinacja cząstki-tarcza zdolna wyprodukować jądra ołowiu 208 w stanach wysokospinowych. To dlatego od trzech dekad grupa krakowska pod kierunkiem prof. Brody pracuje nad wykorzystaniem zderzeń głęboko nieelastycznych do badań jąder niedostępnych w procesach fuzji. W zderzeniach tego typu jądra bombardujące wchodzi w interakcję z jądrami tarczy, ale się z nimi nie zlewają.

„Jądro w stanie wysokospinowym – efekt zderzenia głęboko nieelastycznego – jest wzbudzone i stara się powrócić do stanu o najniższej energii. Pozbywa się jej nadmiaru w kilkunastu etapach, w każdym emitując promieniowanie gamma o charakterystycznej dla danego przeskoku energii. Analizując energie tego promieniowania jesteśmy w stanie zdobyć wiele informacji o budowie jąder atomowych i zachodzących w nich procesach”, wyjaśnia dr Łukasz Iskra (IFJ PAN).

W najnowszej analizie wykorzystano pomiary zrealizowane w ANL

wspólnie z grupą prof. Roberta Janssensa. W doświadczeniach tych tarcze z ołowiu 208 lub uranu 238 ostrzeliwano jonami ołowiu 208, selenu 82, germanu 76, niklu 64 bądź wapnia 48. Promieniowanie gamma rejestrował detektor Gammasphere, składający się ze 108 wysokiej jakości detektorów germanowych (ten spektakularny przyrząd można zobaczyć m.in. w filmie „The Hulk”).

Ku zaskoczeniu badaczy, najnowsza analiza pozwoliła wykryć w jądrach ołowiu 208 struktury i zjawiska nieprzewidziane przez dotychczasową teorię. Zaobserwowano wiele nowych stanów energetycznych, a trzy z nich okazały się stanami izomerycznymi, a więc znacznie trwalszymi niż inne. W zwykłych stanach jądro znajduje się przez pikosekundy. Tymczasem w jednym ze znalezionych stanów izomerycznych jądro przebywało nawet 60 nanosekund (miliardowych części sekundy), czyli tysiące razy dłużej.

Najciekawsze okazały się wyniki sugerujące kolektywną rotację – w jądrze, które przecież jest kuliste, a więc z punktu widzenia mechaniki kwantowej nie powinno się obracać! Badacze przypuszczają, że przy dużych spinach w jądrze ołowiu 208 tworzy się sztywny rdzeń, którym jest drugie pod względem masy podwójnie magiczne jądro, czyli cyna 132. Wydaje się, że rdzeń ten nie wiruje, za to obraca się warstwa zewnętrzna, uformowana przez pozostałe 76 nukleonów.

„Począwszy od pewnych stanów wysokospinowych, jądro ołowiu 208 przestaje być obiektem jednorodnie sztywnym, takim jak na przykład geologicznie niemal martwy Księżyc. Lepszą analogią astronomiczną byłby obiekt skalisty z bardzo gęstą atmosferą, jednak nie tak spokojną, jak na Wenus czy Tytanie. Ta atmosfera powinna się szybko przemieszczać nad powierzchnią, a zatem mogłaby mieć naturę globalnego huraganu”, mówi prof. Broda.

We współczesnej fizyce model powłokowy jest podstawowym narzędziem opisu jąder atomowych. Nowe efekty, dotychczas

niemożliwe do przewidzenia w jego ramach, a wykryte dzięki polsko-amerykańskim eksperymentom z jądrami ołowiu 208, umożliwią teoretykom uwzględnienie w nim kolejnych zjawisk i zwiększą precyzję jego przewidywań.

Instytut Fizyki Jądrowej PAN (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 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 klasyfikacji MNiSW Instytut został zaliczony do kategorii naukowej A+ w grupie nauk ścisłych i inżynierskich.

Autorstwo: Bogusław Jeznach

Źródło: NEon24.pl

BIBLIOGRAFIA

1. Informacje Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie.
2. „Doubly magic 208Pb: High-spin states, isomers, and E3 collectivity in the yrast decay”, R. Broda, R. V. F. Janssens, Ł. W. Iskra, J. Wrzesiński, B. Fornal et al. *Physical Review C* 95, 064308 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevC.95.064308.