

## Badanie jader atomowych

W przyrodzie występuje bardzo wiele różnych jader atomowych - od najlżejszego wodoru aż po najcięższe aktywności. Każde z nich jest złożone z nukleonów, czyli protonów i neutronów. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że to właśnie ich liczba stanowi jedyną różnicę pomiędzy poszczególnymi jądrami. Nic bardziej mylnego. Każde z nich jest unikatowym obiektem i przejawia charakterystyczne dla siebie bogactwo zjawisk. Współczesne możliwości eksperymentalne pozwalają nam na badanie jedynie niewielkiej części jader atomowych spośród wszystkich tych, które wydają się być związane. Ta niedostępność części nie jest jednak nieistotna. Wręcz przeciwnie. Słot jądra uczestniczą w procesach nukleosyntezy zachodzących w gwiazdach, przez co informacja o nich niezbędna jest do prawidłowego odtworzenia, w jaki sposób powstawała otaczająca nas materia. Obecnie jedynym sposobem na poznanie ich własności wydają się być obliczenia numeryczne w ramach modeli teoretycznych. Nie jest to jednak panaceum na wszystkie problemy, gdyż jądra atomowe jako obiekty wielociałowe wymykają się ściślemu opisowi -- analityczne rozwiązanie dla takiego układu po prostu nie istnieje. Z tego powodu teoria musi uciekać się do stosowania metod przybliżonych. Jednym z najpowszechniej stosowanych jest formalizm pola średniego, w którym każde nukleon traktujemy jako nieoddziałujące cząstki poruszające się w studni potencjału (polu średnim) wygenerowanej przez pozostałe nukleony. Przybliżenie to ułatwia intuicyjną interpretację wyników obliczeń i z dużym dokładnością opisuje wiele własności jader atomowych, takich jak masy czy promienie jądrowe, nie jest jednak wolne od pewnych ograniczeń. Najpoważniejsze z nich jest związane z faktem, że jądro atomowe, w przeciwieństwie do atomu, gdzie elektrony poruszają się w zewnętrznym potencjale kulombowskim, jest układem samowzajemnym. Prowadzi to do spontanicznego łamania fundamentalnych symetrii, np. symetrii obrotowej, co uniemożliwia dokładny opis struktury jądrowej. Mimo to przybliżenie pola średniego jest doskonałym punktem wyjścia do budowania bardziej skomplikowanych modeli, które, mimo iż przywróceniu naruszonych symetrii, umożliwiają coraz dokładniejszy opis jądra atomowego. Jednym z nich jest obecnie rozwijany przez nasz zespół model bazujący na teorii funkcjonału gęstości, który bierze udział w tym projekcie.

Jądra atomowe są układami wzajemnymi, mimo że dodatkowo naładowane protony odpychają się siłami Coulomba. Musi zatem istnieć siła, która łączy poszczególne nukleony w jeden obiekt. Jest nią silne oddziaływanie jądrowe. W ogólnym przypadku ma ono charakter przyciągający, jednak, gdy nukleony zbliżą się za bardzo do siebie, staje się ono odpychające. W przeciwieństwie do siły kulombowskiej oddziaływanie dwóch nukleonów jest krótkozasięgowe - wpływają na siebie tylko najbliżsi sąsiedzi. To właśnie z tego powodu w codziennym życiu nie widzimy przejawów oddziaływania silnego. Jego własności mogłyby być zbadane ilościowo poprzez analizę reakcji rozpraszania dwóch nukleonów, czyli badania ich wzajemnego wpływu na swoje zachowanie w próbach. Uzyskane w ten sposób informacje nie mogłyby jednak bezpośrednio wpaść w jądrowym. W materii jądrowej oddziaływanie silne jest zmodyfikowane, a co więcej pojawiają się dodatkowe zjawiska, na przykład efekty powłokowe (podobne do tych w gazach szlachetnych), co jeszcze bardziej utrudnia badanie jader atomowych. Niestety również analityczne wyprowadzenie postaci oddziaływania nukleon-nukleon z chromodynamiki kwantowej i oddziaływania kwarków, z których składają się nukleony, nie jest możliwe. Z pomocą ponownie przychodzi metoda przybliżona, w ramach której konstruuje się fenomenologiczne oddziaływanie oparte na obserwacjach do wiadczalnych. Porzucenie ogólnie nie oznacza jednak braku precyzji. Siły efektywne są rozwijane już od ponad 50 lat i coraz dokładniej opisują jądra atomowe. W tej pracy chcemy więc czyścić w ten sposób proces przyczyniający się do głębszego zrozumienia charakteru oddziaływania silnego.

## Symetria izospinowa

Jak opisano powyżej, teoretyczny opis jądra atomowego składa się z ciężkich prób uproszczenia skomplikowanych matematycznych problemów w sposób pozwalający na fizyczną interpretację wyników. Jednym z najbardziej znaczących konceptów było wprowadzenie izospinu, które zawdzięczamy Wignerowi. Zaproponował on formalizm wprowadzający pojęcie tylko jednej cząstki - nukleonu, która w zależności od liczby kwantowej związanej z izospinem w fizycznej interpretacji może być traktowana jako proton albo neutron. Jeżeli układ nukleonów nie zmienia się po zamianie protonów na neutrony i odwrotnie, to mamy do czynienia z symetrią izospinową, która znacznie upraszcza opis zagadnienia. Niestety należy dodać, że tak elegancki opis, jest równie nieczywym, jak tylko przybliżeniem. Symetria izospinowa jest łamana nie tylko przez niewielką różnicę mas protonu i neutronu, ale przede wszystkim przez oddziaływanie Coulomba, które występuje jedynie między protonami. To nie jest koniec problemów - okazuje się, że tak i oddziaływanie silne nie zachowuje izospinu.

Pierwszy raz ten fakt został zaobserwowany przy badaniu wspomnianego już rozpraszania. Badania reakcji neutron-neutron, neutron-proton i proton-proton pokazały, że siła oddziaływania jądrowego zależy od typu nukleonów. Różnice te są stosunkowo niewielkie (1-2,5%), jednak są znaczące przy precyzyjnych obliczeniach własności jądrowych. Ich nieuzasadnione pominięcie w sposób bardzo wyraźny objawiło się w pracy Nolena i Schiffera po koniec lat 60-tych. Jej celem było odtworzenie zaobserwowanych eksperymentalnie różnic pomiędzy energiami wiązania jader zwierciadlanych<sup>2</sup>. Uważano wtedy, że ten efekt jest całkowicie spowodowany oddziaływaniem Coulomba, które czyni układ z większą liczbą protonów mniej związany i jest głównym czynnikiem łamiącym symetrię izospinową. Okazało się, że mimo wielkich wysiłków i uwzględnienia wielu efektów i poprawek nie udało im się odtworzyć eksperymentalnie zmierzonych wartości. Dalsze badania ugruntowały przekonanie, że zaobserwowana anomalia może być wyjaśniona przez uwzględnienie łamania symetrii izospinowej przez oddziaływanie silne, co było celem tego projektu.

## Jądro atomowe jako laboratorium

Każde z bardzo wielu jąder atomowych można traktować jako kwantowe laboratorium. Można w nim badać nie tylko sam fizyk jąder, ale też sprawdzać fundamentalne hipotezy stawiane przez fizyków z zakresu elementarnych czy zbierać informacje niezbędne dla astrofizyki, która próbuje wyjaśnić procesy nukleosyntezy.

Nasz projekt skupia się przede wszystkim na silnym oddziaływaniu jądrowym, a w szczególności na jego cechach łamania symetrii izospinowej, która będzie uwzględniona w naszym modelu. Pierwszym sprawdzianem dla naszej metody będzie wytłumaczenie anomalii Nolen-Schiffa i sprawdzenie czy oddziaływanie Coulomba i oddziaływanie silne wystarczą do odtworzenia eksperymentalnych różnic energii wiązania jąder zwierciadlanych. Następnie planujemy dalsze badania jąder o zbliżonej liczbie protonów i neutronów, dla których łamanie symetrii izospinowej powoduje wyraźne efekty. Mamy nadzieję, że w naszej pracy uzyskamy nowe wyniki, które pozwolą rzucić nowe światło na fizyk oddziaływań jądrowych.

Nasz projekt będzie miał również duży wpływ na rozwój używanego modelu teoretycznego, który jest zaprogramowany w kodzie numerycznym HFODD. Program ten powstał w warszawskiej grupie fizyków jądrowych i stał się jego znakiem rozpoznawczym. Obecnie jest on ogólnie dostępny, przez co jest ulepszany i używany przez naukowców na całym świecie.

Bardzo dobra znajomość używanego modelu daje możliwość nie tylko badania sił jądrowych, ale również podejścia do fundamentalnych zagadnień dotyczących oddziaływania słabego. Jest ono odpowiedzialne za rozpady beta, czyli przemiany protonu w neutron i odwrotnie. Procesy te są bardzo czułe na łamanie symetrii izospinowej, dlatego te efekty powodowane przez oddziaływanie Coulomba i jądrowe silne muszą być uwzględnione niezwykle dokładnie. Gra jest warta wiecej, gdy badanie rozpadu beta z precyzyjnym uwzględnieniem łamania symetrii izospinowej pozwoli na jeszcze dokładniejszą weryfikację macierzy Cabibbo-Kobayashi-Maskawy (nagroda Nobla w 2008 roku), która opisuje jedno z kluczowych założeń Modelu Standardowego, jakim jest istnienie trzech generacji kwarków.

Co więcej, fizyka jądra dostarcza informacji niezbędnych w astrofizyce do symulacji procesów zachodzących w gwiazdach. Popyt przewidywany, że względu na to, że jądra biorące udział w nukleosyntezie są bardzo czyste poza zasięgiem możliwości eksperymentalnych. Z tego powodu ich własności, takie jak energie wiązania, muszą być wyznaczone z modeli teoretycznych. Kluczem do szybkiego wychwytu protonów, który jest odpowiedzialny za syntez ciężkich pierwiastków, przebiega przez jądra o zbliżonej liczbie protonów i neutronów. W związku z tym nasz model uwzględniający łamanie symetrii izospinowej przez oddziaływanie silne jest idealnym narzędziem do obliczania energii wiązania i innych własności dla tych nuklidów. Wyniki pomogą w dokładniejszym modelowaniu procesów gwiazdowych i wytłumaczeniu nukleosyntezy.

<sup>1</sup>Energia wiązania jest to energia potrzebna do rozłożenia jądra na pojedyncze nukleony.

<sup>2</sup>Jądra zwierciadlane to para jąder taka, że liczba protonów pierwszego jest równa liczbie neutronów drugiego, a liczba protonów drugiego jest równa liczbie neutronów pierwszego.