

Badanie jąder atomowych

Jądra atomowe są kwantowymi układami złożonymi z protonów i neutronów. Ich własności są istotne w symulacjach procesów astrofizycznych, a bardzo precyzyjne pomiary i obliczenia ich struktury mogą służyć do weryfikacji fundamentalnych hipotez fizyki cząstek elementarnych.

Niestety nie wszystkie interesujące nas nuklidy znajdują się w zasięgu współczesnych metod eksperymentalnych. Obecnie jedynym sposobem na poznanie własności najbardziej egzotycznych jąder są obliczenia w ramach modeli teoretycznych. Podejście to jest jednak bardzo skomplikowane, gdyż jądro atomowe, jako kwantowy układ wielu ciał, wymyka się ścisłemu opisowi, w związku z czym niezbędne jest zastosowanie metod przybliżonych. Jedną z najbardziej obiecujących stanowi metoda funkcjonału gęstości, która została zaczerpnięta z chemii kwantowej. Zamiast pojedynczych protonów czy neutronów stosuje ona odpowiadające im gęstości, co znacznie upraszcza zagadnienie, jednak w dalszym ciągu pozwala na bardzo dokładny opis nuklidów.

Jądra atomowe są układami związanymi, mimo że pomiędzy dodatnio naładowanymi protonami działa odpychające oddziaływanie Coulomba. Musi zatem istnieć siła, która łączy poszczególne nukleony w jeden obiekt. Jest to krótkozasięgowe oddziaływanie silne. Jego własności są badane, np. w eksperymentach rozpraszania nukleonów. Uzyskane w ten sposób informacje nie mogą być jednak bezpośrednio wykorzystane do obliczeń jąder atomowych. Po raz kolejny musimy posłużyć się przybliżeniem i wprowadzić efektywne oddziaływania jądrowe. Porzucenie ogólności nie oznacza jednak braku precyzji. Siły efektywne, rozwijane od ponad 50 lat, coraz dokładniej opisują jądra atomowe, przyczyniając się do głębszego zrozumienia charakteru oddziaływania silnego.

Symetria izospinowa

Wprowadzenie symetrii do opisu zjawisk fizycznych często upraszcza skomplikowany problem matematyczny i pozwala na prostą interpretację otrzymanych wyników. W fizyce jądrowej bardzo ważną rolę pełni symetria izospinowa zaproponowana przez Wignera. Opisuje ona protony i neutrony jako stany jednej cząstki – nukleonu. 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 ten elegancki koncept jest tylko kolejnym przybliżeniem, gdyż symetria izospinowa jest w sposób oczywisty łamana przez oddziaływanie Coulomba. Okazuje się jednak, że także oddziaływanie silne rozróżnia protony i neutrony.

Pierwszy raz ten fakt został zaobserwowany podczas analizy wspomnianego już rozpraszania. Okazało się, że siła oddziaływania jądrowego zależy od pary nukleonów biorącej udział w reakcji. Różnice są niewielkie, jednak manifestują się również we własnościach jąder atomowych. Pod koniec lat 60-tych pokazali to Nolen i Schiffer, którzy badali energie wiązania jąder zwierciadlanych. Spodziewano się, że to wyłącznie oddziaływanie Coulomba czyni system z większą liczbą protonów słabiej związanym, jednak nawet bardzo dokładne obliczenia dla tej siły nie wystarczyły, by odtworzyć eksperymentalnie zmierzone wartości. Dalsze badania ugruntowały przekonanie, że łamanie symetrii izospinowej w jądrach atomowych jest spowodowane również przez oddziaływanie silne.

Jądro atomowe jako laboratorium

Moja rozprawa doktorska skupia się na efektach łamania symetrii izospinowej przez oddziaływanie silne. Uwzględnienie ich w naszym modelu opartym o teorię funkcjonału gęstości i efektywne oddziaływanie nukleon-nukleon pozwoli wyjaśnić nie tylko anomalie Nolena-Schiffiera, lecz także odtworzyć inne własności jąder atomowych zależne od izospinu. Uchwycenie wielu różnych efektów w ramach jednego modelu będzie bardzo cenne i może rzucić nowe światło na charakter łamania symetrii izospinowej.

Dodatkowo nasze podejście umożliwia wykonywanie obliczeń mogących wyjaśnić fundamentalne własności oddziaływania słabego, które jest odpowiedzialne za rozpady β . Procesy te są bardzo czułe na łamanie symetrii izospinowej, zatem ich precyzyjny opis wymaga uwzględnienia zarówno siły Coulomba, jak i efektów pochodzących od oddziaływania silnego. Dokładne obliczenia poprawek do takich rozpadów pozwalają na weryfikację macierzy Cabibbo-Kobayashiego-Maskawy, która zakłada istnienie trzech generacji kwarków. Jest to jedno z kluczowych założeń Modelu Standardowego.

Ponadto rachunki fizyki jądrowej mogą pomóc w symulowaniu procesów zachodzących we wnętrzach gwiazd. Obliczenia takie wymagają wiedzy o wielu jądrach, z których duża część jest niedostępna dla obecnych metod eksperymentalnych. Własności tych nuklidów, takie jak energie wiązania mogą być jednak obliczone z użyciem modeli teoretycznych. Nasze rachunki dotyczące jąder o zbliżonej liczbie protonów i neutronów mogą być wykorzystane przy symulowaniu szybkiego wychwytu protonu, w którym uczestniczą także właśnie nuklidy. Pozwoli to na dokładniejsze zbadanie procesów astrofizycznych i zrozumienie nukleosyntezy.