

Badanie rozkładu mas fragmentów rozszczepienia

Niestabilność ciężkich jąder atomowych, manifestująca się między innymi w zjawisku rozszczepienia, jest konsekwencją jednego z podstawowych praw przyrody - pozwala przeprowadzić układ nukleonów w stan o minimalnej energii. Rozszczepienie jądra atomowego jest procesem prowadzącym do powstania dwóch lub trzech fragmentów, czemu towarzyszy uwolnienie sporej ilości energii.

Mimo że sam proces rozszczepienia znany jest od niemal że osiemdziesięciu lat, pełen, teoretyczny opis jego mechanizmu wciąż stanowi wyzwanie badawcze. Jądro atomowe to skomplikowany system związanych krótkozasięgowymi siłami jądrowymi obiektów kwantowych (nukleonów). Narzędzia mechaniki kwantowej, służące do opisu zjawisk i obiektów mikroświata, wymagają znajomości sił oddziaływania, które w przypadku nukleonów nie zostały w pełni poznane.

Jedną z podstawowych, mierzalnych charakterystyk rozszczepienia jest rozkład mas powstałych fragmentów. Dane te stanowią niezbędny komponent wykorzystywany do dalszych analiz w szerokim zakresie zastosowań zarówno w kontekście czysto poznawczym - opis nukleosyntezy w procesie r - jak też doskonalenia rozwiązań inżynierskich, takich jak prace nad optymalizacją cykli paliwowych w jądrowym przemyśle energetycznym, postępowanie z odpadami radioaktywnymi itp. Wiąże się to z naturalną potrzebą opracowania predyktywnej teorii, na której można by się oprzeć w obszarach eksperymentalnie niedostępnych. Jak dotąd jednak mechanizm podziału mas pomiędzy fragmenty powstałe w wyniku rozszczepienia nie został opisany teoretycznie w sposób umożliwiający odtworzenie danych eksperymentalnych z wystarczającą dokładnością.

Celem pracy było zbadanie kolektywnych mechanizmów, mających kluczowe znaczenie w procesie podziału nukleonów pomiędzy fragmenty rozszczepienia. Postawione zadanie sprowadzało się więc do odpowiedzi na następujące pytania: na ile istotny wpływ na fragmentację jądra mają czynniki makroskopowe; w jaki sposób efekty dynamiczne determinują kształty rozkładów mas oraz które stopnie swobody deformacji jądra mają znaczenie dla opisu procesu rozszczepienia w kontekście dystrybucji masy pomiędzy produkty. Za materiał badawczy posłużyły izotopy, reprezentujące dwa obserwowane w przyrodzie typy rozszczepienia ze względu na sposób podziału masy pomiędzy fragmenty: ^{252}Cf , ^{256}Fm , ^{180}Hg (rozkład mas asymetryczny) oraz ^{258}Fm (bimodalny). Podstawowym narzędziem badań wykorzystanym w tej pracy jest model Hartree'go-Focka-Bogoliubowa (HFB), traktujący jądro atomu w sposób mikroskopowy, omówiony dokładniej w podrozdziale 2.1.

Podrozdział 1.2. zawiera wprowadzenie do podjętej problematyki badawczej. Znajduje się w nim krótki rys historyczny dotyczący odkrycia zjawiska rozszczepienia, a także motywacja do prowadzenia badań teoretycznych nad tym procesem oraz mechanizmem podziału mas pomiędzy produkty. Na końcu zebrane zostały i krótko omówione ważniejsze modele, służące do przewidywania rozkładów mas fragmentów rozszczepienia.

Rozdział 2. obejmuje wyniki przeprowadzonych analiz punktów przedrozszczepieniowych - ostatniej konfiguracji związanej jądra, leżącej na końcu preferowanej ścieżki rozszczepieniowej, wyznaczonej metodą minimalizacji energii. Odpowiadające tym kształtom rozkłady gęstości przestrzennej nukleonów pozwoliły wyciągnąć wnioski dotyczące formujących się na tym etapie zrębów struktur jąder pochodnych, a tym samym określić wstępnie masy najbardziej prawdopodobnych fragmentów. Pokazane zostało również, że na podstawie tych profili można wstępnie wnioskować na temat kształtu rozkładu mas produktów rozszczepienia, poprzez powiązanie prawdopodobieństwa zaobserwowania danego podziału masowego z prawdopodobieństwem rozerwania szyjki nuklidu w miejscu odpowiadającym takiej fragmentacji. Otrzymane dystrybucje mas porównane zostały z eksperymentalnymi.

Rozdział 3. poświęcony jest dynamicznemu opisowi procesu rozszczepienia. Ewolucja w czasie pakietu falowego, odpowiadającego stanowi początkowemu rozszczepiającego się jądra, przeprowadzona została w dwuwymiarowej przestrzeni konfiguracyjnej. Szczegółowo przebadany pod tym kątem zo-

stał izotop ^{252}Cf . Dyskutowany jest wpływ warunków początkowych na otrzymane rozkłady mas fragmentów. Zaprezentowano i porównano z eksperymentem wyniki uzyskane dla nuklidów ^{252}Cf , ^{256}Fm , ^{258}Fm .

W oparciu o uzyskane wyniki można stwierdzić, że udało się - przynajmniej po części - zrozumieć istotę mechanizmów kolektywnych, odpowiedzialnych za sposób podziału nukleonów pomiędzy fragmenty rozszczepienia. Rezultaty badań statycznych pokazały, że nawet sama analiza konfiguracji poprzedzającej rozerwanie jądra dostarcza istotnych informacji o fizyce procesu rozszczepienia. Rozpatrując rozkłady gęstości przestrzennych nukleonów w tej zaawansowanej fazie deformacji można wyciągnąć wnioski odnośnie struktury wewnętrznej, kształtu, jak i mas najbardziej prawdopodobnych produktów, a tym samym wstępnie określić typ rozszczepienia (symetryczny lub asymetryczny). Rozkłady mas fragmentów obliczone przy wykorzystaniu makroskopowej metody Brosy odtwarzają z dość dobrą dokładnością masy najbardziej prawdopodobnych jąder pochodnych - ciężkiego i lekkiego - obserwowane w eksperymencie. Tym samym wykazane zostało, że w procesie podziału nukleonów istotne znaczenie mają też hydrodynamiczne efekty makroskopowe, związane z energią powierzchniową rozszczepiającego się izotopu. Uzyskana niedostateczna szerokość rozkładów teoretycznych jest zaś wynikiem pominięcia efektów powłokowych oraz dynamicznych.

Wyniki rachunków dynamicznych pokazały, że kształt dystrybucji w niewielkim stopniu zależy od parzystości pakietu falowego, jego energii wzbudzenia czy też - dla stanów będących kombinacją liniową stanów własnych - wyboru statystycznej metody ich mieszania. Badania nad izotopem ^{256}Fm pokazały natomiast, że w przypadku stanów o parzystości dodatniej leżących powyżej bariery na rozszczepienie, wraz ze wzrostem energii poziomu, w otrzymanym rozkładzie mas wzrasta prawdopodobieństwo zaobserwowania symetrycznej fragmentacji, co jest zgodne z eksperymentem. Ostatecznie należy zauważyć, że rozkłady mas uzyskane w ujęciu dynamicznym połączonym z metodą Brosy podziału jądra są w lepszej zgodności z danymi eksperymentalnymi w porównaniu do dystrybucji wynikających z samych tylko makroskopowych analiz. Tym samym udowodniono, że efekty dynamiczne stanowią aspekt nie do pominięcia dla zrozumienia mechanizmu podziału mas w akcie rozszczepienia.

9.05.2018.

Anna Zdełk