

Abstract

The aim of the present work was to assess the model capabilities in describing the proton induced spallation reactions. To understand the reaction mechanism, different sets of observables must be investigated, inclusive as well as exclusive. Based on these criteria, the efforts were done to survey the scientific literature for the selection of representative data sets which fits the need. The selected data were rich in terms of production of various ejectiles: neutrons, light charged particles (LCP: p, d, t, ^3He , ^4He), intermediate mass fragments, i.e., the particles with atomic mass number ($A_{LCP} < A_{IMF} < A_{fission\ fragments}$), and target-like heavy residua. Several atomic nuclei from Al up to Pb were selected as representative for all the targets. The proton beam covered the broad range of energies from 180 MeV to 3000 MeV.

The spallation reaction was treated as a two stage process. In the first stage, the incident proton initiates the cascade of binary collisions with target nucleons leaving behind an excited remnant. The second stage consists in the decay of this excited remnant nucleus. The selection of best models to describe each of these two stages was done on the basis of previous benchmark efforts where INCL4.5 model was found to be the best to describe the first stage of the reaction. Therefore the newest version of this model - INCL4.6 was used in the present study. Four theoretical models different in approach to the reaction mechanism were chosen to realize the description of the second stage: ABLA07, GEMINI++, SMM, GEM2. Qualitative as well as quantitative comparisons of model calculations with experimental data were undertaken. To judge the quality of models the agreement in magnitude of different observables with model predictions as well as reproduction of the shape of the mass, angle and energy distributions of the cross sections were taken into account.

Various deviation factors were used for providing ranking and validation of the spallation models. The statistical properties of the test factors, i.e., their expectation value, variance and probability density function were studied carefully. Two new statistical deviation factors named M -factor and A -factor were proposed in the present work. They are equally good as the best factors used up to now in the literature but are more intuitive.

The ranking of models obtained by the application of the deviation factors were compared with the qualitative estimation of the data reproduction. It was found that all the studied models are able to reproduce the main characteristics of the data, however systematic deviations were observed and their interpretation was proposed.

Streszczenie

Celem obecnej pracy było określenie zdolności modeli do opisu reakcji spalacji wywołanych protonami. Dla zrozumienia mechanizmu reakcji muszą być badane różne *observable*, zarówno inkluzywne jak i ekskluzywne. Biorąc to pod uwagę zostały dołożone starania aby wykonać przegląd literatury naukowej dla wyboru reprezentatywnego zestawu danych, który odpowiada tym wymaganiom. Wybrany zestaw danych był zasobny w produkcję różnych produkowanych cząstek: neutronów, lekkich naładowanych cząstek: (LCP: p, d, t, ^3He , ^4He), fragmentów o masie pośredniej (IMF: $A_{LCP} < A_{IMF} < A_{\text{fragmenty rozszczepienia}}$) i tarczy-podobnych ciężkich jąder końcowych. Kilka jąder atomowych od Al do Pb zostało wybranych jako reprezentatywne dla wszystkich tarcz. Energia wiązki protonów pokrywała szeroki zakres od 180 MeV do 3000 MeV.

Reakcja spalacji była traktowana jako proces dwustopniowy. W pierwszym etapie padający proton wywołuje kaskadę binarnych zderzeń z nukleonami tarczy pozostawiając wzbudzone jądro końcowe. Drugi etap polega na rozpadzie wzbudzonego jądra końcowego. Wybór najlepszych modeli dla opisu każdego z dwu etapów został wykonany w oparciu o poprzednie starania dla określenia wzorców gdzie stwierdzono, że model INCL4.5 został uznany za najlepiej opisujący pierwszy etap reakcji. Dlatego zastosowano w obecnych badaniach najnowszą wersję tego modelu - INCL4.6. Do realizacji opisu drugiego etapu wybrano cztery modele stosujące różne podejścia do mechanizmu reakcji: ABLA07, GEMINI++, SMM, GEM2. Podjęto jakościowe i ilościowe porównania obliczeń modelowych z danymi doświadczalnymi. Dla osądzenia jakości modeli brano pod uwagę zgodność wielkości różnych *observable* z przewidywaniami modelowymi a także odtworzenie kształtu rozkładów masy, energii i kątów.

Zastosowano różne czynniki odchylenia, które zostały użyte dla zapewnienia rankingu i walidacji modeli spalacyjnych. Zbadano starannie statystyczne własności czynników testowych, t.j. ich wartości oczekiwane, wariancje i funkcje gęstości prawdopodobieństwa. W obecnej pracy zaproponowano dwa nowe czynniki odchylenia nazwane czynnikiem M i czynnikiem A. Są one równie dobre jak najlepsze czynniki używane do tej pory w literaturze ale są bardziej intuicyjne.

Rankingi modeli otrzymane przez zastosowanie czynników odchylenia zostały porównane z jakościowym oszacowaniem odtworzenia danych. Stwierdzono, że wszystkie badane modele są w stanie odtworzyć główne charakterystyki danych jednakże zaobserwowane systematyczne odchylenia i zaproponowano ich interpretację.