

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr Sushila Sharma pt. Validation of spallation models.

Reakcje spalacji (w języku polskim można spotkać określenie *reakcje kruszenia*, które jednakże nie jest powszechnie przyjęte) jąder atomowych, wywołane protonami o różnych energiach, są badane od wielu lat zarówno od strony doświadczalnej jak i teoretycznej. Spalacja jest rodzajem reakcji jądrowej, w której wysokoenergetyczne cząstki wiązki padające na jądro tarczy „wybijają” z niego kilka (wg niektórych definicji więcej niż trzy) cząstek. Zainteresowanie spalacją jąder atomowych wynika m.in. z możliwości ich szerokiego wykorzystania w praktyce: terapia hadronowa, astrofizyka, techniki przyspieszania cząstek (aktywowanie detektorów i ochrona radiologiczna), możliwość transmutacji długożyciowych odpadów z reaktorów jądrowych na izotopy stabilne lub o krótkim czasie połowicznego zaniku, czy też budowa spalacyjnych źródeł neutronów. Ponadto mechanizm reakcji spalacji nie jest do końca poznany, co przejawia się w sporej liczbie modeli teoretycznych próbujących opisać ten proces. Modele te zwykle traktują spalację jako proces dwustopniowy. Proton wywołujący spalację jądra atomowego zderza się z nukleonami tarczy, co może być modelowane jako ciąg zderzeń dwuciałowych pomiędzy dwoma nukleonami. Ten pierwszy etap reakcji spalacji, nazywany kaskadą wewnątrzjądrową, pozostawia jądro końcowe w stanie wzbudzonym. W drugim etapie reakcji dochodzi do rozpadu jądra wzbudzonego. Ze zrozumiałych względów praktycznych nie jest możliwe zbadanie „wszystkich” (tzn. dla wszystkich jąder tarczy oraz dla „wszystkich wartości” energii padających protonów) reakcji spalacji mogących mieć zastosowanie praktyczne. Dlatego niezwykle istotne jest uzyskanie „brakujących” wartości przekrojów czynnych, rozkładów kątowych produktów, rozkładów ich mas i energii, czy wartości innych obserwabli na podstawie obliczeń modelowych. W przedstawionej do recenzji rozprawie doktorskiej Pan mgr Sushil Sharma podjął próbę porównania modeli spalacji jąder atomowych dla reakcji indukowanych protonami, przy czym dokonał walidacji czterech modeli (ALBA07, GEM2, GEMINI++ oraz SMM) opisujących drugi etap spalacji (rozpad jądra wzbudzonego), wybierając model INCL4.6 do opisu kaskady wewnątrzjądrowej.

Warto zauważyć, że grupa fizyków z Zakładu Fizyki Jądrowej, Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytetu Jagiellońskiego od lat zajmuje się badaniem reakcji spalacji jąder atomowych, także we współpracy z FZ Juelich. Wynikami tych badań są m.in. publikacje naukowe, a także rozprawy doktorskie.

Rozprawa doktorska Pana mgr Sushila Sharma składa się z sześciu rozdziałów, wliczając w to wstęp i podsumowanie, oraz pięciu dodatków i spisu literatury liczącego 126 pozycji. Rozprawa jest obszerna (ponad 150 stron), a jej promotorem jest Pan prof. Bogusław Kamys z Uniwersytetu Jagiellońskiego.

We wstępie autor przedstawia uzasadnienie wyboru tematu rozprawy doktorskiej. W rozdziale drugim znajdujemy krótkie omówienie czterech modeli spalacji jąder atomowych: (1) model kaskady wewnątrzjądrowej (INC), (2) model BUU (Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck) którego podstawą jest klasyczne równanie Boltzmana transportu w gazie pod wpływem siły zewnętrznej, (3) model kwantowej dynamiki molekularnej (QMD), oraz (4) model CEM, w którym uwzględnia się stan pośredni (przedrównowagowy) pomiędzy kaskadą wewnątrzjądrową i rozpadem jądra wzbudzonego, które osiągnęło stan równowagi. Rozdział ten zawiera także uzasadnienie dokonanego wyboru obserwacji wykorzystanych do walidacji modeli spalacji. Są to dane z rozpraszania protonów o trzech różnych energiach, na trzech różnych tarczach, przy czym identyfikowane były produkty reakcji o różnym ładunku (zarówno lekkie cząstki naładowane i neutrony, jak i fragmenty o pośredniej masie). Autor, do swoich badań, wybiera model kaskady wewnątrzjądrowej opracowany w Uniwersytecie w Liege (INCL model, wersja INCL4.6) i rozpatruje cztery modele (ABLA07, GEM2, GEMINI++ oraz SMM) opisujące końcowy etap spalacji jakim jest rozpad jądra wzbudzonego. Wybór modelu INCL został dokonany na podstawie testów modeli pierwszego etapu spalacji zamieszczonego przez IAEA (International Atomic Energy Agency - Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej), pozycja [82] w spisie literatury. Omówienie tych modeli jest treścią trzeciego rozdziału rozprawy. Własności statystyczne różnych czynników odchylenia użytych do walidacji modeli spalacji są dyskutowane w rozdziale czwartym. Należy podkreślić, że Pan mgr Sushil Sharma wykorzystuje nie tylko czynniki odchylenia znane z literatury, ale także definiuje dwa nowe. Obszerny, prawie 50-cio stronicowy rozdział piąty zawiera m.in. rankingi rozpatrywanych modeli, uzyskane przez porównanie przewidywań modeli z danymi, z wykorzystaniem wcześniej zdefiniowanych czynników odchylenia, przy czym ograniczono się do trzech z nich. Podsumowanie jest rozdziałem szóstym rozprawy. W dodatkach zawarto bardziej szczegółowe informacje o: (1) własnościach testu H, (2) funkcjach gęstości prawdopodobieństwa, (3) symulacjach Monte Carlo, oraz (4) widma lekkich cząstek naładowanych dla wybranych reakcji spalacji pokazane w innej skali energii.

Za najważniejsze wyniki rozprawy doktorskiej Pana mgr Sushila Sharma uważam:

1. Wykonanie systematycznej walidacji i rankingu kombinacji modeli (INCL4.6 oraz ABLA07, GEM2, GEMINI++ lub SMM) opisujących dwa etapy spalacji jąder atomowych indukowanej wysokoenergetycznymi protonami. Autor użył trzech czynników odchylenia: jednego znanego z literatury – czynnik H, oraz dwóch zaproponowanych w rozprawie – czynniki M i A. Taki był cel rozprawy i został, moim zdaniem, w pełni zrealizowany.
2. Zdefiniowanie dwóch nowych czynników odchylenia: czynnik M oraz czynnik A. Autor rozprawy uważa, że są one „*bardziej intuicyjne*” („*more intuitive*”) niż inne dotychczas stosowane czynniki odchylenia (takie zdanie znajduje się w streszczeniu rozprawy). Na str. 120 znajdujemy stwierdzenie, że czynnik odchylenia M jest „*bardziej intuicyjny*” niż czynnik H, a na str. 121, że czynnik A jest „*bardziej intuicyjny*” niż czynnik $\langle F \rangle$ używany wcześniej w literaturze. Uważam, że stwierdzenie „*bardziej intuicyjny*” jest nieprecyzyjne i moim zdaniem niepotrzebne.

Tym bardziej, że definiując czynniki odchylenia M i A w rozdziale 4.2 rozprawy Pan mgr Sushil Sharma porównuje ich własności z własnościami dotychczas wykorzystywanych czynników odchylenia.

3. Wykorzystanie, do walidacji modeli spalacji, hipotezy równości dwóch wartości oczekiwanych: jedna obliczona z modelu, a druga z danych. Wartości obserwabli wyznaczone na podstawie modeli bazujących na metodzie Monte Carlo są obarczone błędem statystycznym i dlatego postawienie i badanie powyższej hipotezy jest możliwe. Wymagało to jednak zastosowania czynników odchylenia, dla których możliwe jest znalezienie postaci funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Okazuje się, że nie jest to powszechna własność czynników odchylenia znanych z literatury. Doprowadziło to autora do zaproponowania nowych czynników odchylenia M i A.

Rozprawa doktorska Pana mgr Sushila Sharma jest napisana w języku angielskim w sposób prosty i zrozumiały. Nie mam uwag do strony językowej pracy, ale jednocześnie nie czuję się w pełni kompetentny do oceny pracy pod tym względem. Uważam, że autor w sposób przesadnie oszczędny stosuje przecinki w zdaniach złożonych, co trochę utrudniało ich „natychmiastowe” zrozumienie. Warto podkreślić bardzo wysoki poziom edytorski pracy wymagający dużego wkładu pracy i czasu. Duża liczba czytelnych rysunków oraz starannie przygotowanych tabel znakomicie uzupełnia tekst. Niektóre wzory zostały umieszczone w ramkach, a inne nie – dlaczego?

Podsumowując, uważam, że zawarte w rozprawie doktorskiej Pana mgr Sushila Sharma wyniki walidacji modeli spalacji jąder atomowych, a także ich ranking, są interesujące i oryginalne. Powinny zostać rozpowszechnione np. wysłane do IAEA, której stronę www, poświęconą testowaniu wg ustalonego wzorca (ang. *benchmark*) kilkunastu modeli spalacji jąder atomowych, autor rozprawy wielokrotnie cytuje (ref. [82]). Wyniki przedstawione w rozprawie odnoszą się do jednego modelu pierwszego etapu spalacji oraz czterech modeli drugiego etapu. Oczywiście, warto rozszerzyć badania, przedstawione w rozprawie, na inne modele.

Na podstawie przedłożonej do recenzji pracy doktorskiej Pana mgr Sushila Sharma pt. „Validation of spallation models” stwierdzam, że rozprawa spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. Jan Kisiel