

DATE NUCLEARE DE REACȚIE

Rezumat

Teza reprezintă o trecere în revistă a principalelor activități de cercetare desfășurate de autoare în domeniul datelor nucleare de reacție în ultimii 20 de ani. Este un domeniu complex și dinamic care presupune largi colaborări internaționale. Importanța datelor nucleare rezidă în faptul că reprezintă veriga care face legătura între fizica nucleară fundamentală experimentală și teoretică și aplicațiile bazate pe tehnici și metode nucleare.

Un element care se regăsește în toate activitățile și temele de cercetare prezentate în teză, în publicațiile științifice, în lucrările de licență și de dizertație coordonate, în cursurile de specializare predate, sau în seminarele și lecțiile invitate, este ansamblul modular de coduri de reacție EMPIRE. După eforturile susținute ale echipei de dezvoltatori (din care autoarea face parte), codul a ajuns la un grad de maturitate și stabilitate care îl recomandă drept unul dintre cele mai importante instrumente de lucru, atât pentru studiul și modelarea reacțiilor nucleare, cât și pentru aplicațiile acestora, dar în special pentru evaluarea datelor nucleare de reacție. Utilizatorii săi provin din centre de date nucleare, institute de cercetare și universități de pe 5 continente. Detalii despre cod, despre modelele și parametrii utilizați sunt furnizate în capitolul 2 al tezei. În codul EMPIRE sunt implementate modele care descriu principalele mecanisme prin care se produc reacțiile în domeniul energiilor incidente limitat inferior de valabilitatea ipotezelor statistice și extins până la aproximativ 200 MeV. Calculul mărimilor care se obțin direct din elementele mediate ale matricei de împrăștiere (secțiunea eficace totală și de reacție, contribuția directă la secțiunile de împrăștiere elastică și inelastică, inclusiv la distribuții unghiulare, spectre de emisie, distribuții dublu-diferentiale) se realizează cu codurile ECIS sau OPTMAN incluse în ansamblul EMPIRE, folosind modelul optic sferic, aproximația Born a undelor distorsionate, sau a canalelor cuplate. Emisia de preechilibru poate fi descrisă cu ajutorul unor modele cuantice (de tip MSD-MS), modele fenomenologice de tip excitonic, precum și prin simulare Monte-Carlo. Pentru formarea și dezintegrarea nucleului compus se folosește cunoscutul model Hauser-Feshbach cu diferite metode de calcul al corecției de fluctuații. Parametrii acestor modele (mase, scheme de nivele, potențiale optice, etc.) sunt preluați automat din RIPL (Reference Input Parameter Library). Contribuțiile personale la dezvoltarea, implementarea și actualizarea unora dintre aceste modele și parametri sunt prezentate în teză. O atenție specială este acordată modelului optic pentru fisiune și a variantelor sale extinse, care stau la baza formalismului de fisiune implementat de autoare în EMPIRE, cel mai avansat formalism folosit în prezent în practica evaluării. Detalii relevante și originale privitoare la acest model sunt prezentate în capitolul 3, iar formalismul este inclus în Anexa tezei.

Este subliniat faptul că ansamblul de coduri EMPIRE s-a dovedit a fi și un material didactic valoros. Structura sa, accesul direct la baze de date, modul de a genera informații despre incertitudini, matrice de sensibilitate, corelație și covarianță, pachetul grafic, modelele de reacție și datele de structură utilizate pentru furnizarea diferitelor observabile îl recomandă ca exemplu, sau ca instrument de lucru pentru cursuri și seminare cu teme ca: Limbaje de programare, Metode de calcul și de simulare în Fizica Nucleară, Modele de structură nucleară, reacții nucleare și fotonucleare, Spectroscopie nucleară. Codul a fost folosit de asemenea, pentru elaborarea unor teze de licență, dizertație și doctorat.

Capabilitatea de a calcula diferite tipuri de date este demonstrată prin prezentarea unor exemple relevante pentru reacții induse de neutroni, particule încărcate și fotoni. Aceste calcule au avut ca scop testarea unor modele, stabilirea unor sistematici pentru parametrii de intrare (în special pentru densități de nivele și bariere de fisiune), suportul teoretic pentru date experimentale, sau au reprezentat baza unor viitoare evaluări.

Modelarea și calculul reacțiilor induse de neutroni selectate s-au realizat în cadrul unor proiecte coordonate de AIEA (Agentia Internațională pentru Energie Atomică), sau în colaborare cu AIEA: "Nuclear Data for Th-U fuel cycle", MANREAD (Minor Actinide Neutron Reaction Data), PF7

ANDES (Accurate Nuclear Data for nuclear Energy Sustainability), PF7 CHANDA (solving CHallenges in Nuclear Data și a proiectului international CIELO (Collaborative International Evaluated Library Organisation Pilot Project) lansat de OECD/NEA. Nucleele alese sunt de mare interes pentru aplicațiile energetice, reprezentand fie elemente ale combustibilului nuclear de tip Th-U (^{232}Th , $^{231,233}\text{Pa}$) și U-Pu ($^{235,238}\text{U}$), prezentate în capitolul 4, fie elemente de structură ($^{56,57}\text{Fe}$), prezentate în capitolul 5. La acestea, a fost adăugată în capitolul 5 o analiză completă a reacțiilor induse de neutroni pe izotopii uraniului $^{232-237}\text{U}$, extrem de utilă pentru validarea modelelor, a ipotezelor privitoare la bariera tripla de fisiune, pentru stabilirea unor tendințe ale parametrilor de-a lungul unui lanț izotopic, precum și pentru evidențierea calităților și deficiențelor datelor evaluate din bibliotecile majore (ENDF/B, JEFF, JENDL) pentru aceste nuclee.

Pentru reacțiile induse de particule încărcate, în capitolul 6 au fost alese doua exemple. Primul se referă la secțiunile eficace ale proceselor $^{147,149}\text{Sm}(p,n)$ și $^{147,149}\text{Sm}(p,\gamma)$ măsurate la IFIN-HH, iar cel de-al doilea se referă la patru căi de populare a nucleului ^{230}U realizate de o echipă coordonată de Joint Research Center-ISPRA. Pentru ambele, calculele realizate cu codul EMPIRE au fost folosite ca suport teoretic. $^{230}\text{U}/^{226}\text{Th}$ a fost identificat ca un sistem de emisie a particulelor alfa în cascadă, cu caracteristici energetice și de timp de viață potrivite pentru radio-terapie. Deoarece în cele patru căi de populare studiate, $^{232}\text{Th}(p,3n)^{230}\text{Pa}(\beta^-)^{230}\text{U}$, $^{231}\text{Pa}(p,2n)^{230}\text{U}$, $^{231}\text{Pa}(d,3n)^{230}\text{U}$, $^{230}\text{Th}(^3\text{He},3n)^{230}\text{U}$, intervin și particule încărcate complexe, în EMPIRE au fost implementate modele fenomenologice pentru descrierea reacțiilor de break-up și de transfer de nucleoni. În paralel, se caută metode de implementare a unei abordări susținute teoretic a procesului de rupere a deuteronului.

Reacțiile induse de fotoni reprezintă un instrument extrem de util pentru determinarea unui număr important de parametri nucleari, datorita lipsei sarcinii electrice și a masei de repaus a fotonului, la care se adaugă selectivitatea în spin și paritate. Inițial, am folosit aceste reacții pentru validarea sau determinarea parametrilor rezonanțelor gigant dipolare din secțiuni de foto-absorbție, sau a parametrilor barierelor de fisiune din analiza secțiunilor experimentale de foto-fisiune. Realizarea ansamblului ELI-NP la Măgurele, care va deschide noi perspective și va pune bazele noului domeniu de graniță numit fizica fotonucleară, a determinat creșterea interesului pentru acest tip de reacții. Coul EMPIRE a fost folosit deja pentru suport teoretic în cadrul studiilor exploratorii realizate de colegi dela ELI-NP în SUA la Higgs și în Japonia la AIST. În capitolul 7 al tezei sunt prezentate reacțiile induse de fotoni pe ^{238}U și alte aspecte extrem de interesante și utile relevate de comportamentul acelorasi nuclee compuse populate în reacții induse de fotoni și de neutroni.

Scopul și visul oricărui membru al comunității datelor nucleare este să participe la realizarea unei evaluări care sa fie apoi adoptată de una dintre bibliotecile majore. În capitolul 8 sunt prezentate realizările din acest domeniu. Primele evaluări au fost ale reacțiilor induse de neutroni rapizi pe nucleele țintă ^{232}Th și $^{231,233}\text{Pa}$, realizate în cadrul proiectului AIEA "Nuclear Data for Th-U fuel cycle". Ele au fost adoptate de biblioteca americană ENDF/B, versiunile VII.0 (2006), VII.1 (2011), VIII.0 (2018) și de biblioteca europeană JEFF, versiunile 3.2 (2014) și 3.3 (2017). Recent, în cadrul proiectului CIELO-IAEA, au fost re-evaluate cele mai importante nuclee pentru ciclul de combustibil U-Pu și anume ^{235}U și ^{238}U . Evaluările noastre au fost adoptate de bibliotecile CIELO și ENDF/B-VIII.0 la începutul anului 2018. În teză este prezentată metodologia de evaluare, care include calculul matricelor de covarianță *a priori* pentru zona neutronilor rapizi și validarea datelor diferențiale prin compararea cu mărimi integrale experimentale.

Aspectele amintite sunt documentate în articole, comunicari științifice, rapoarte de cercetare și suporturi electronice pentru cursuri de specialitate.

Dintre planurile de viitor, în capitolul 9 sunt menționate activitățile din cadrul proiectelor de cercetare coordonate de AIEA: RIPL-4 (Recommended Input Parameter Library for Fission Cross Section Calculation) și INDEN (International Nuclear Data Evaluation Network) și al unui nou proiect EURATOM WP 2018 din cadrul H2020. De asemenea, este reiterată ideea că preocuparea de a pregăti noi generații în domeniul fizicii nucleare și de a atrage tinerii spre aceasta ramură fascinantă a științei se va pastra la fel de intensă.