

Raport stiintific sintetic

privind implementarea proiectului in perioada octombrie 2011 – octombrie 2016

Sisteme nucleare binare

Scopul principal al proiectului este de a dezvolta o metoda teoretica pentru studiul proceselor binare de fisiune si fuziune. Rezultatele se concretizeaza in tabele de timp de viata de fisiune si dezintegrare alfa in procesele de fisiune, si valori ale sectiunilor eficace de fuziune pentru sinteza nucleelor supragrele. Prima parte a proiectului a constat in constructia unui model microscopic care sa descrie evolutia schemei de nivele protonice si neutronice de la un sistem compus la schemele de nivele ale celor doua fragmente, pentru fisiune, si de la doua scheme de nivele separate la o schema a nucleului sintetizat pentru fuziune. Marimile dezvoltate in aceasta perioada au fost energia macroscopica si corectiile microscopice. Suma lor reprezinta bariera de potential a proceselor binare. Primul termen a fost calculat cu modelul Yukawa-plus-exponentiala. Este folosit un potential nuclear cu raza finita de actiune, care scade exponential la suprafata nucleului. Acest termen macroscopic descrie nucleul ca fiind o picatura de lichid incarcata electric. Sarcina este data de numarul de protoni. Potentialul electrostatic de respingere este compensat de energia nucleara de suprafata, data de formula Yukawa. Suma acestor marimi rezulta in energia macroscopica de deformare.

Corectiile microscopice constituie al doilea termen in energia totala. Aceste energii sunt esentiale in stabilitatea nucleelor supragrele. Energia macroscopica de tip picatura de lichid dezvolta o bariera de potential in jur de 1 MeV in regiunea nucleara $Z \geq 110$. Aceasta bariera este insuficienta pentru a asigura stabilitatea nucleara. Daca sunt adaugate corectiile microscopice, acestea vor fi partial negative in zona deformatilor mici, si astfel asigura un minim de potential suficient pentru a acomoda o stare fundamentala. Nucleele supragrele pot fi stabile numai datorita corectiilor de paturi si imperechere. Energia macroscopica produce o bariera practic nula datorita repulsiei coulombiene puternice. In aceasta etapa a proiectului am calculat in prima parte corectiile de imperechere in cadrul unui model specializat pentru a trata microscopic procesele binare, modelul cu doua centre deformatate. Corectiile de imperechere au fost obtinute prin rezolvarea sistemului Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) tipic pentru aflarea parametrilor caracteristici fenomenului de imperechere: nivelul de energie Fermi pentru o schema de nivele cu nucleoni imperecheati, si gap-ul de energie care apare cand protonii si neutronii sunt supusi acestei interactii reziduale. Corectia totala microscopica δE este suma corectiilor de paturi E_{shell} si imperechere δP . In comparatie cu corectia de paturi E_{shell} , corectia de imperechere este in antifaza si mai mica in valoare absoluta.

A doua parte a proiectului a fost dedicata dinamicii proceselor binare. Timpii de viata pentru fisiune precum si factorii de transmisie pentru sectiunile eficace de fuziune sunt calculati cu ajutorul penetrabilitatii prin bariera de potential. Penetrabilitatea se calculeaza prin metoda Wentzel-Kramers-Brillouin. Factorul decisiv este integrala actiunii. Aceasta marime descrie dinamica procesului. De aceea, pe langa energia de deformare, este necesar calculul tensorului de masa. In acest proiect componentele tensorului de masa sunt obtinute prin modelul cranking, cel mai complet model care descrie inertia sistemului. Cranking include in componentele tensorului efectele cuantice ale schemei de nivele energetice. Tensorul contine in marimea lui probabilitatile de ocupare si neocupare cu perechi, obtinute de la calculul energiei de imperechere. In situatia in care nucleonii sunt imperecheati, acestia au o probabilitate de ocupare v_k^2 si automat de neocupare u_k^2 diferita de 1 pe fiecare nivel uniparticula. Aceste probabilitati depind de gap-ul de energie datorat imperecherei Δ precum si de noul nivel Fermi λ . Aici intervine caracterul binar specific acestui proiect: hamiltonianul uniparticula folosit, H_{DTCSM} este cel de doua centre deformatate potrivit proceselor binare. Parametrii de deformare in aceste calcule sunt: rapoartele semiaxelor celor doi elipsoizi, $\chi_1 = b_1/a_1$ si $\chi_2 = b_2/a_2$, si distanta intre centre R . In final se obtin elementele tensorului de inertie cranking specific sistemelor binare ce caracterizeaza procesele de fuziune sub-bariera.

Penetrabilitatea totala a proceselor de fisiune si fuziune sub-barierica se obtine in urma minimizarii integralei actiunii in spatiul multidimensional de deformare. Acest proiect, prin cele patru variabile independente - semiaxa mica a proiectilului sau a fragmentului emis usor, cele doua rapoarte ale semixelor sferoizilor (nucleu flica si emis, sau tinta si proiectil), si distanta intre center - foloseste cel mai complet set de parametrii care descriu configuratia sistemelor nucleare binare.

In final am obtinut timpi de viata pentru fisiunea si dezintegrarea alfa a nucleelor grele si supra-grele. Un rezultat remarcabil in studiul fisiunii nucleare a fost obtinerea unui minim de potential in emisia de nuclee usoare, la suprafata nucleara. Acest rezultat exprima probabilitatea de pre-formare a nucleului usor la suprafata nucleara, lucru care nu a mai fost demonstrat teoretic pana acum.

In domeniul fuziunii sub-barierice am studiat posibilitatea de a obtine un nucleu final intr-o stare apropiata de starea fundamentala. Acest fapt este important in zona nucleelor supragrele, unde timpul de viata este foarte scurt. Nucleele din aceasta regiune de masa se dezintegreaza alfa sau prin fisiune in timpi de ordinul msec sau mai mic. Acest fapt se datoreaza energiei relativ mari a proiectilului, pentru a creste sectiunea eficace. Ideea pe care am sustinut-o aici este o energie cinetica a proiectilului apropiata de caldura de reactie Q . In acest fel, nucleul final va avea o stare energetica apropiata de starea fundamentala, si astfel va avea un timp de viata mai lung. Am obtinut sectiuni eficace de ordinul 10 pb pentru parteneri de reactie in zona maselor simetrice, cum ar fi proiectil ^{132}Sn .

Faza 2016: Influenta energiei de imperechere asupra sectiunii eficace de fuziune sub-barierica

Nucleele supragrele se obtin in reactii de sinteza cu sectiuni eficace foarte mici. In starea finala nucleul supragreu are o durata de viata foarte scurta, cu timp de dezintegrare alfa sau de fisiune mic. Acest fapt se datoreaza in cea mai mare parte potentialului electrostatic foarte mare, din cauza numarului crescut de protoni. Pe de alta parte, nucleul compus se obtine intr-o stare excitata, datorita energiei mari a proiectilului. Ideea acestei faze a proiectului este de a prezice o stare finala a nucleului compus care sa fie mai stabila, deci mai aproape de starea fundamentala. In acest mod, desi sectiunea eficace de fuziune scade, se va ajunge la o stare a nucleului supragreu cu durata de viata mai mare. Procesul pe care il analizam pentru a atinge scopul propus este de fuziune sub-barierica. Acesta consta in tunelarea de catre nucleul proiectil a barierei de potential generata de fiecare reactie tinta-proiectil data. Bariera de fuziune este formata din energia de deformare a sistemului binar. Aceasta configuratie este obtinuta in modelul proiectului prin intersectarea a doi sferoizi (tinta si proiectilul) de-a lungul unei axe de simetrie. Energia totala de deformare se calculeaza cu metoda macroscopic-microscopica. Sectiunea eficace de fuziune pentru acest proces se obtine pronind de la formula clasica:

$$\sigma(E) = \pi\lambda^2 \cdot T(E) \quad (1)$$

unde termenul de interes este factorul de transmisie $T(E)$. De regula, acest termen este calculat considerand doar configuratia de tangenta intre cele doua nuclee. In faza acestui proiect bariera de fuziune este obtinuta mai ales din zona de suprapunere a celor doi parteneri de reactie. Datorita starii finale a nucleului compus, considerata ca starea fundamentala, factorul de transmisie este asimilat aici cu probabilitatea de tunelare P prin bariera de potential, la o energie a sistemului tinta-proiectil in centrul de masa E_{TP} :

$$T(E_{def}) = P(E_{def}, E_{TP}) \quad (2)$$

In acest fel, energia cinetica a proiectilului in CM trebuie sa fie exact diferenta intre masele despartite la infinit si masa finala a nucleului compus in starea fundamentala, deci egala cu

caldura de reactie Q_{TP} . In concluzie, bariera de potential E_b generata in sistemul cu energie incidenta Q_{TP} este:

$$E_{def} - E_{TP} = E_{def} - Q_{TP} = E_b \quad (3)$$

Penetrabilitatea P este identificata cu probabilitatea de tunelare prin bariera, obtinuta prin metoda Wentzel-Kramers-Brillouin:

$$P = \exp(S) \quad (4)$$

unde actiunea S este data de :

$$S = -\frac{2}{\hbar} \int_{(fus)} [2(\sum B_{ij} dq_i dq_j) E_b(q)]^{1/2} dq \quad (5)$$

Termenii componenti ai integralei actiunii sunt energia de deformare E_{def} si tensorul de masa B_{ij} , unde ij reprezinta toate cuplajele posibile intre parametrii liberi de deformare: semi-axa mica a proiectilului, cele doua rapoarte intre semi-axele sferoizilor (tinta si proiectil) si distanta intre centre. Formula finala a sectiunii eficace in aceasta abordare devine:

$$\sigma(E_b, TP) = \frac{\pi \hbar^2}{2\mu_{TP} Q_{TP}} \exp(S_{TP}) \quad (6)$$

Energia de deformare care formeaza bariera de potential E_b este calculata prin metoda macroscopic-microscopica binara, dezvoltata in acest proiect in cadrul celui mai complex spatiu de deformare care descrie procesele de fisiune si fuziune:

$$E_b = E_{Y+E} + E_{shell} + \delta P \quad (7)$$

unde E_{Y+E} este termenul picatura de lichid incarcata, obtinuta cu potential de tip Yukawa-plus-exponentiala. Termenii microscopici sunt energia corectiilor de paturi E_{shell} si interactia de imperechere δP . Aceste corectii microscopice se obtin pe baza modelului cu doua centre deformat dezvoltat in exclusivitate de autorii proiectului. Corectia microscopica totala δE este suma corectiilor de paturi E_{shell} si imperechere δP :

$$\delta E = E_{shell} + \delta P \quad (8)$$

Astfel energia de imperechere intervine in bariera de potential. Un exemplu semnificativ este reactia $^{132}\text{Sn} + ^{160}\text{Yb} \rightarrow ^{292}120$, prezentata in figura 1.

Se observa ca energia de imperechere coboara valoarea energiei barierei de potential cu aproximativ 1 MeV. Valoarea este semnificativa avand in vedere ca dependenta penetrabilitatii de integrala actiunii este exponentiala.

In figura 2 am prezentat comparatia intre barierele de potential in reactii folosite de grupurile de la Dubna (^{48}Ca) si Darmstadt (^{208}Pb -tinta) fata de valorile obtinute de noi pentru reactii cu simetrie de masa (ex. ^{132}Sn proiectil).

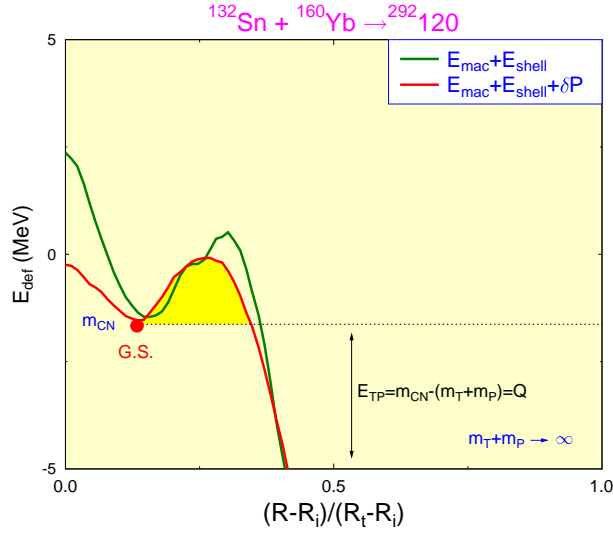


Figura 1: Fig. 1. Energiile macroscopice (sus), corectiile microscopice E_{corr} si bariera totala a penetrabilitatii pentru reactia cu proiectil ^{132}Sn .

A doua parte a influentei interactiei de imperechere asupra sectiunii eficace se manifesta in termenii componentii ai tensorului de masa. Aici am calculat acest tensor cu modelul cranking care tine cont de influenta microscopica asupra masei totale prin intermediul probabilitatilor de ocupare a unui nivel energetic cu o pereche de nucleoni. Aceste probabilitati se calculeaza prin teoria Bardeen-Cooper-Schrieffer. Este rezolvat un sistem de ecuatii BCS, din care rezulta valorile gap-ului de energie datorat imperecherii si nivelului Fermi cand interactia este considerata. Probabilitatile de ocupare si neocupare, v_k^2 si respectiv u_k^2 intervin in componentele tensorului de masa prin:

$$B_{ij} = 2\hbar^2 \sum_{kk'} \frac{\langle k' | \partial H_{DTCSM} / \partial q_i | k \rangle \langle k | \partial H_{DTCSM} / \partial q_j | k' \rangle}{(E_k + E_{k'})^3} (u_k v_{k'} + u_{k'} v_k)^2 + P_{ij} \quad (9)$$

unde derivatele partiale ale hamiltonianului se reduc la derivatele potentialului cu doua centre deformat.

Acest algoritm de calcul a fost aplicat pentru toate perechile posibile tinta-proiectil care duc la sinteza nucleului supragreu $^{292}\text{120}$. Am obtinut valori ale sectiunii eficace in jur de 10 pb pentru reactii cuasi-simetrice: proiectil ^{140}Ce , ^{136}Xe si ^{132}Sn , mai mari decat pentru proiectil ^{48}Ca si ^{90}Zr , folosite in prezent la Dubna si respectiv Darmstadt. In concluzie, predictia noastra este axata pe folosirea unor reactii cu simetrie de masa in fuziunea sub-barierica pentru sinteza nucleelor supragrele. Avantajul este obtinerea nucleelor compuse in stare finala mai stabila, neexcitata, cu posibilitatea unui timp de viata mai lung decat cele obtinute in prezent prin reactii peste bariera de potential.

Obiectivele proiectului au fost indeplinite, conform planului de realizare. Rezultatele au fost publicate in articole ISI si prezentate ca lectii invitate la conferinte internationale.

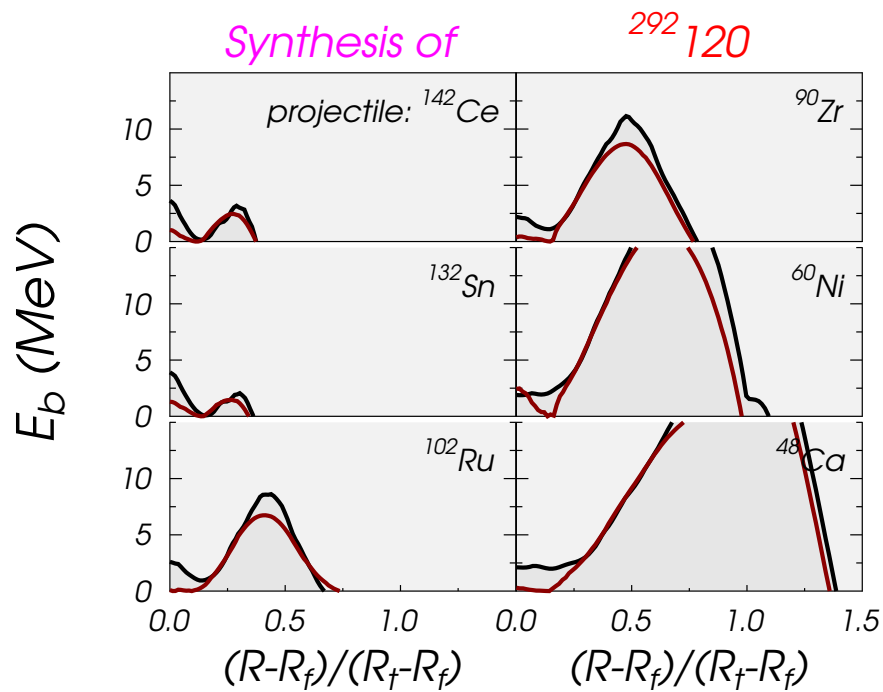


Figura 2: Fig. 2. Barierele de reactie cu si fara corectii de imperechere, pentru un domeniu larg de asimetrii de masa tinta-proiectil. Se observa barierele de inaltime mica pentru reactii cuasi-simetrice.

Director de Proiect: Dr. Radu A. Poenariu-Gherghescu

