

**PROJECT TITLE : HEAVY ION OPTICAL POTENTIALS
FOR EXOTIC NUCLEI IN ASTROPHYSICAL NUCLEAR
REACTIONS (TITLUL PROIECTULUI : POTENȚIALE
OPTICE DE IONI GREI PENTRU NUCLEE EXOTICE IN
REAȚII NUCLEARE DE INTERES ASTROFIZIC)**

ȘERBAN MIȘICU

*National Institute for Nuclear Physics-HH,
Bucharest-Magurele, P.O.Box MG6, Romania*

**E-mail:misicu@theor1.theory.nipne.ro*

[http://theor1.theory.nipne.ro/ misicu/](http://theor1.theory.nipne.ro/misicu/)

OBIECTIVELE ETAPEI : POTENȚIALE OPTICE DE IONI GREI
OBTINUTE DIN INTERACTII EFECTIVE FUNDAMENTALE
Enute din interacții efective fundamentale. (REPORT OBJECTIVES : HEAVY ION
OPTICAL POTENTIALS FROM FUNDAMENTAL INTERACTIONS
EFFECTIVE INTERACTIONS)

I. INTRODUCERE

Metoda integralei de dublă convoluție (DFM-double folding model) oferă un mijloc practic pentru construirea de potențiale de model optic (OMP-optical model potential). În această abordare interacția efectivă nucleon-nucleon (NN) în mediu barionic este supusa unei integrari de convolutie dubla cu densitatea proiectilului și respectiv densitatea țintei. În cele ce urmeaza raportăm principalele contribuții pe care le-am adus în obținerea unor OMP care să poata fi utilizate cu un mai mare grad de încredere în diferite tipuri de reacții care implică ținte și/sau proiectile exotice sau produse de reacție (fuziune) bogate în neutroni.

II. EVOLUȚIA BARIERELOR DE FUZIUNE CU FORȚELE NUCLEARE (CAZUL FORTELOR ARGONNE)

Rigoarea care trebuie să ghideze orice demers stiintific ne-a condus în urmă cu cațiva ani la următoarea necesitate : în cazul unor calcule de reacție nucleară în care sunt necesare date referitoare la structura nucleară a țintei și a proiectilului un anumit grad de consistența între tipul forțelor $N - N$ folosite în calculul integralei de dublă convoluție (DFM-double folding method) și cel al forțelor folosite în calculul proprietăților statice nucleare (mase, raze, densități) trebuie pastrat. Pe de alta parte forțele efective de tip M3Y au fost propuse în urma cu peste 30 de ani și ar fi de interes să se folosească forțe $N - N$ moderne care s-au dovedit de succes în diferite calcule avansate de mai multe particule. Astfel tipul de forțe Argonne [1] este un tip de interacții NN care, folosite în calcule de tip Monte-Carlo cu funcții Green (GFMC-Green functions Monte Carlo), reușesc să ofere o descriere satisfăcătoare a spectrelor nucleelor u soare. Forța de tip Argonne AV18 care este probabil cea mai realistă din această clasă de interacții a fost recent trunchiată, în sensul că a fost păstrată numai interacția Coulomb standard între protoni în timp ce termenii electromagnetici de ordin

secund au fost eliminați. La forța simplificată AV8' spre exemplu se păstrează numai 8 componente operatoriale din cele 18 ale forței AV18. Aceasta procedură de reducere sau re-proiectare a condus la obținerea unor potențiale gradual mai simple : AV6', AV4', AVX', AV2' și AV1' [1]. Astfel în forța AV4' nu mai există termenii de spin-orbită (existenți încă la AV8') iar restul potențialului este ușor ajustat pentru a reproduce energia de legătură a deuterionului. În plus se elimină componentele tensoriale. Deși multe aspecte ale împrăștierii NN sunt sacrificate, acest potențial permite diferențierea în continuare între cele 4 canale de spin-izospin (ST) posibile. Pe de altă parte în DFM este nevoie cel mult de aceeași structură operatorială a interacției efective. Prin urmare am considerat necesară încorporarea noilor forțe Argonne în programul de calcul dezvoltat anterior pentru calculul interacției DFM cu interacții efective din teoria împrăștierilor inelastice și fuziune (M3Y, Skyrme, Gogny).

În Fig.1 comparăm potențialul DFM cu diferite tipuri de forțe Argonne (de la cele mai simple AV1 la cel mai elaborat AV18) cu un potențial de tip fenomenologic pentru trei sisteme:

1. $\alpha + \alpha$ - comparăm cu potențialul Ali-Bodmer care este obținut din fitarea datelor de împrăștiere elastică. Am ales acest potențial repulsiv în loc de potențialul atractiv BFW care în plus descrie și starea rezonantă 0^+ în nucleul cuazilegat ^8Be pentru că studiile noastre anterioare de materie alfa [2] au arătat că o interacție puternic atractivă între două particule α produce un colaps nefizic al ecuației de stare.
2. $\alpha + ^{40}\text{Ca}$ - comparăm cu un potențial optic obținut dintr-un fit global [3].
3. $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ - comparăm cu un potențial DFM care a fost folosit și publicat în cadrul prezentului proiect [4], și care reușește să dea o descriere a datelor de fuziune în jurul barierii.

Se observă în toate cele trei cazuri aceeași ierarhie a potențialelor, în sensul că pe măsură ce forța este mai simplă cu atât bariera este deplasată la dreapta și devine subestimată (AV1,2,4'), în timp ce AV6' și AV8' prezintă o barieră la stânga celei experimentale și sunt sensibil repulsive în interior. Potențialul cel mai elaborat (AV18) pare să fie cel mai apropiat de potențialul fenomenologic, lucru remarcabil având în vedere că o serie de componente ale acestuia nu intră în calculul DFM.

Deasemenea se observă că pe măsura ce sistemul este mai greu cu atât potențialul care este cel mai apropiat de cel experimental devine mai repulsiv și are o barieră mai înaltă.

Concluzia acestei analize este că folosirea interacției Argonne este fezabilă și pentru aceasta trebuie construit un potențial hibrid care să interpoleze între AV8 (un pic prea repulsiv) și AV4' (un pic prea atractiv). Aparent prin înlăturarea termenilor tensoriali din AV4' potențialul de ioni grei devine prea atractiv și subestimează bariera. Se pare că dispariția cuplajului dintre canalele 3S_1 și 3D_1 și deteriorarea canalelor ${}^3P_{0,1,2}$ este responsabilă de acest fapt. Însă cel mai important ingredient care lipsește este evident absența forțelor de trei corpuri. Deocamdata în calcule folosim o renormare a interacției originale AV18.

Pe lângă forțele Argonne am mai studiat interacțiile efective (utilizate în calculul structurii nucleare) : Gogny (o lucrare este pregătită pentru a fi trimisă la publicat), Skyrme, Sprung-Banerjee, Giessen. Toate aceste forțe conțin o dependență de densitate care își are originea într-o interacție de trei corpuri. Prin urmare aceste forțe având incluse interacția de trei corpuri (deși pe ușa din spate) dau o estimare mai bună a barierelor.

III. ÎMBUNĂTĂȚIREA POTENTIALULUI LOCAL ECHIVALENT

Interacția de ioni grei este dominată de schimb. În trecut (Faza III, proiect ID-696) am efectuat o evaluare a componentei de schimb de o singură ciocnire (knock-on) pornind de la aproximațiile Slater și apoi Slater extinsă de materie nucleară folosită în dezvoltarea matricii densitate (DME-density matrix expansion) [5]. În cadrul acestei metode matricea densitate $\rho(R, s)$ se exprima ca o dezvoltare în produse de densitate $\rho(r)$ și derivatele ei, și respectiv funcții Bessel. Investigații efectuate în cadrul acestui model de materie nucleară folosind forțe de tip Gogny arată că poate fi avantajos să se folosească în loc de funcțiile Bessel, funcții Gaussiene [6]. În felul acesta în regiunea de momente Fermi mici se obține o descriere mai bună a funcțiilor care apar în DME. Pe de altă parte chiar autorii DME au sugerat acum 40 de ani că folosirea funcțiilor Bessel este satisfăcătoare pentru sisteme nucleare slab neomogene, în timp ce pentru variații de densitate rapide, cum se întâmplă la suprafața nucleară, sau chiar pentru nucleele ușoare, Gaussienele pot fi o alegere mai bună. Astfel în miezul de schimb

$$U_{\text{ex}}(\mathbf{R}, \mathbf{R}') = U_{\text{ex}}(\mathbf{R}^+, \mathbf{R}^-) \quad (1)$$

$$= \mu^3 v_{\text{ex}}(\mu R^-) \int \rho_1(\mathbf{X} + (1 - \frac{1}{A_1})\mu \mathbf{R}^-, \mathbf{X} - (1 - \frac{1}{A_1})\mu \mathbf{R}^-) \cdot \rho_2(\mathbf{X} - \mathbf{R}^+ - (1 - \frac{1}{A_2})\mu \mathbf{R}^-, \mathbf{X} - \mathbf{R}^+ + (1 - \frac{1}{A_2})\mu \mathbf{R}^-) d\mathbf{X} \quad (2)$$

se folosește pentru matricea densitate Ansatzul:

$$\rho(R, s) = \rho(R)e^{-s^2/2b^2} \quad (3)$$

Atunci miezul de schimb va avea forma unei integrale simple de convoluție

$$U_{ex}(\mathbf{R}, s) = \mu^3 v_{ex}(\mu s) e^{-(2\mu s/b)^2} \int d\mathbf{X} \rho_1(\mathbf{X}) \rho_2(\mathbf{X} - \mathbf{R}) \quad (4)$$

Se observă ca argumentele \mathbf{R} și s se separă ca în Ansatzul Perrey-Buck

$$U_{ex}(\mathbf{R}, s) = \bar{U}(R)H(s) \quad (5)$$

Atunci echivalentul local se obține prin transformarea Fourier a funcției nelocale $H(s)$, în final rezultând tot o gaussiană însa în momentul local k .

IV. POTENȚIALUL NUCLEU-NUCLEU DIN INTERACȚIA JLM

Interacția JLM este o interacție care se obține din calculele de matrice G în în materie nucleară (Bruckner-Hartree-Fock) [7]. Astfel JLM este o interacție efectivă complexă NN dependentă de densitate ρ și de energie E .

$$v_{\text{JLM}}(s, \rho, E) = v_0(\rho, E)g_R(s) + iw_0(\rho, E)g_I(s) \quad (6)$$

unde

$$v_0 = \sum_{i,j=1}^3 a_{ij} \rho^{i-1} E^{j-1}, \quad w_0 = \left(1 + \frac{D}{(E - \varepsilon_F(\rho))^2}\right)^{-1} \sum_{i,j=1}^3 d_{ij} \rho^{i-1} E^{j-1} \quad (7)$$

coeficienții din formele de mai sus fiind dați în lucrarea originala JLM [7]. Factorii de difuzie $g_R(I)$ se iau sub forma unor gaussine normalizate la unitate, și se includ pentru a putea modifica razele pătratice medii ale interacției. Partea imaginară a JLM este introdusă pentru a avea absorbție în potențialul optic. Adoptând aproximația locală pentru densitate

$$\rho(r_1, r_2) = \sqrt{\rho_1(r_1)\rho_2(r_2)} \quad (8)$$

potențialul DFM cu interacție JLM se scrie

$$\begin{aligned} V_{\text{DFM-JLM}}(R, E) &= V_R(R) + iV_I(R) \\ &= \int d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 v_{\text{JLM}}(\mathbf{R} - \mathbf{r}_1) + \mathbf{r}_2; \rho(r_1, r_2) \rho_1(r_1) \rho_2(r_2) \end{aligned} \quad (9)$$

Exemplificăm folosirea interacției pentru sistemul $\alpha - \alpha$ ca mai sus. Pentru o distribuție a materiei nucleare în clusterul α de tip gaussian

$$\rho(\alpha) = 4 \left(\frac{1}{\pi b^2} \right)^{3/2} e^{-r^2/b^2} \quad (10)$$

integrala DF-JLM poate fi pusă în formă analitică folosind tehnica transformărilor Fourier:

$$V_{\text{DF-JLM}}(R, E) = \sum_{i,j} a_{i,j} E^{j-1} \frac{2^{2i+10}}{\{(i+2)\pi^{i-1}b^{2i}[(i+2)t_R^2 + 4b^2]\}^{3/2}} e^{-(i+2)R^2/[(i+2)t_R^2 + 4b^2]} \quad (11)$$

Acest potențial reproduce bariera Coulombiană pe care o prezic și potențialele $\alpha - \alpha$ care reproduc datele de împrăștiere elastică cu condiția de a folosi un coeficient de renormalizare (care înmulțește pe $V_{\text{DF-JLM}}$) de aproximativ 0.9. Faptul că acest potențial este foarte adânc în interior îl limitează ca aplicații numai pentru probleme de ciocniri elastice în care apar suprapuneri de densitate mici.

V. LUCRĂRI PUBLICATE DE MEMBRII ECHIPEI (1 NOIEMBRIE 2011 - 31 NOIEMBRIE 2012)

Finanțarea CNCSIS a prezentului proiect a fost menționată în următoarele lucrări științifice de către diversii membri ai echipei de cercetare din cadrul acestui proiect:

1. Ș. Mișicu and F. Carstoiu, *Absence of maximum in the S-factor at deep sub-barrier energies in the fusion reaction $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$* , Phys. Rev. C **84**, 051601(R) (2011).
2. N. Carjan, F. -J. Hamsch, M. Rizea and O. Serot, *Partititon of the excitation energy and of the neutron multiplicity at scission in low-energy fission*, Phys. Rev. C **85**, 044601 (2012).
3. I. Silisteanu and A. Budaca, *Structure and α -decay properties of the heaviest nuclei*, Atomic Data and Nuclear Data Tables **98** (available online at <http://dx.doi.org/10.1016/j.adt.2011.12.007>)

Au trimise spre publicat, finanțarea CNCSIS a prezentului proiect fiind unica sursă menționată următoarele lucrări:

1. Ș. Mișicu și M. Rizea, *Speeding of α Decay in Ultra-Intense Laser Fields*, APS-journal, 6 pages.

2. Ș. Mișicu and W. Greiner, *New Investigations on fragment rotational states population in spontaneous fission of ^{252}Cf* , 8 pages, World Scientific

Deasemenea a fost publicată, fara a se specifica finanțarea din acest proiect, a lucrării :

1. Carstoiu F., Mișicu Ș., Trache L., *Rom. of Phys.* **57**, Issue: 1-2 106-137 (2012).

VI. PARTICIPĂRI LA CONFERINȚE INTERNAȚIONALE ȘI STAGII DE LUCRU ÎN STRĂINĂTATE

Cu sprijinul financiar obținut pentru derularea acestui proiect și pentru care fac raportarea, s-au efectuat următoarele deplasări :

A. Conferința Internațională ”5th International Conference on Fission and Properties of Neutron Rich Nuclei (ICFN5)”

.

În urma invitației făcute chiar de organizatorul conferinței, Prof. J.H. Hamilton am participat la aceasta conferință în perioada 4-10 Noiembrie 2012 și am susținut o lecție de 20 minute (+5 discuții) intitulată: *New Investigations on fragment rotational states population in spontaneous fission of ^{252}Cf (Investigații recente asupra populării stărilor rotaționale în fisiunea spontană a ^{252}Cf)*. Aceasta contribuție științifică va fi publicată în editura World Scientific.

La invitația personală a Prof.dr.h.c.mult. W. Greiner efectuez un stagiu ca bursier Alexander von Humboldt ca cercetător senior. În cursul acestui stagiu vor fi studiate o serie de probleme care au relevanța pentru proiectul pentru care fac raportarea.

[1] R. B. Wiringa, S. C. Pieper, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 182501 (2002).

[2] F. Carstoiu, Ș. Mișicu, *Phys. Lett.* **B682**, 33 (2009).

[3] <http://www-nds.iaea.org/RIPL-2/>

- [4] Ș. Mișicu and F. Carstoiu, Phys. Rev. C **84**, 051601(R) (2011).
- [5] W. Negele and D. Vautherin, Phys. Rev. C **5**, 1472 (1972).
- [6] J. Dobaczewski, B. G. Carlson and M. Kortelainen, J. Phys. **G37**, 075106.
- [7] J.P. Jeukenne, A. Lejeune, C. Mahaux, Phys. Rev. C **16**, 80 (1976).

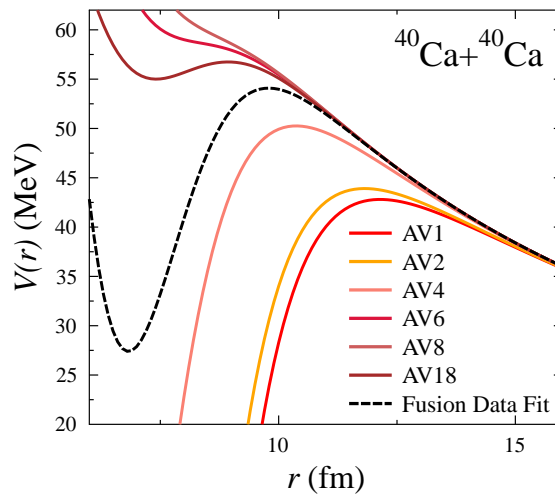
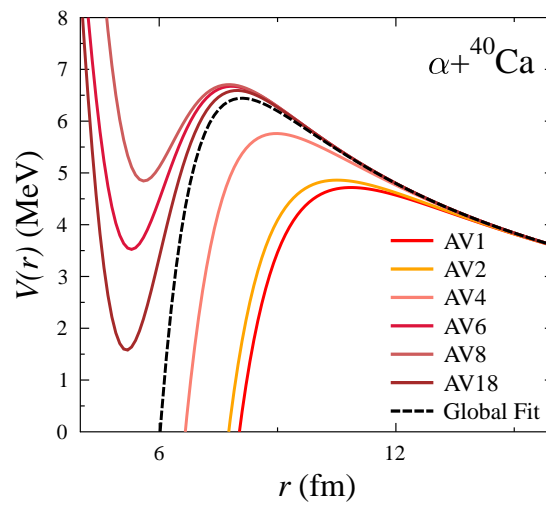
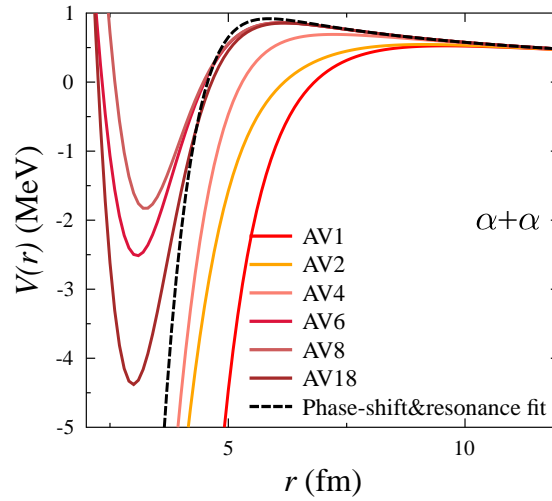


Figura 1: Potențialul DFM cu forțe Argonne (linii continue) este comparat cu potențiale fenomenologice care explică date experimentale pentru 3 sisteme : $\alpha + \alpha$, $\alpha + {}^{40}\text{Ca}$ și ${}^{40}\text{Ca} + {}^{40}\text{Ca}$