

Raport stiintific

privind implementarea proiectului

COLLECTIVE DYNAMICS, DISSIPATION AND FRAGMENTATION IN QUANTUM MESOSCOPIC SYSTEMS

in perioada decembrie 2014 – decembrie 2015

In raportul stiintific pentru perioada de implementare decembrie 2014- decembrie 2015, sunt descrise principalele rezultate obtinute in cadrul proiectului de cercetare in corelatie cu structura planului de lucru.

Pentru WP1: *Insight into the features of collective modes and of entrance channel dynamics in dissipative reactions with exotic nuclei*

In perioada mentionata s-au explorat mai multe proprietati ale unor moduri colective care se manifesta in nucleeele bogate in neutroni, cum este Rezonanta Dipolara Pygmy, de interes si pentru viitoarele experimente avute in vedere la facilitatea ELI-NP din Romania, sau modul colectiv dipolar excitat in canalul de intrare al reactiile de fuziune sau adanc inelastice.

Intr-un studiu teoretic bazat pe ecuatii de tip Tamm-Dancoff si Random Phase Approximation s-a generalizat abordarea introdusa de G.E. Brown si M. Bolsterli pentru descrierea Rezonantelor Dipolare la cazul in care interactia separabila are o structura mai complexa, capabila sa ia in considerare o dependenta de densitate a constantelor de cuplaj. Astfel s-a presupus ca pentru un subsistem de perechi particular-gol $i,j < i_c$ interactia este $A_{ij} = \lambda_1 Q_i Q_j^*$, cu $\lambda_1 = \lambda(\rho_0)$ corespunzand la o energie potentiala de simetrie la densitatea de saturatie in timp ce pentru celalalt subsistem aflat la densitate mult mai mica $\rho_e \ll \rho_0$ vom avea $A_{ij} = \lambda_3 Q_i Q_j^*$ cu $\lambda_3 = \lambda(\rho_e)$. Cuplajul dintre cele doua subsisteme este descris de un termen $A_{ij} = \lambda_2 Q_i Q_j^*$ cu o constanta de cuplaj intermediara $\lambda_2 = \lambda(\rho_i)$. Ecuatiile RPA pentru amplitudinile "forward" si "backward" $X_i^{(n)}, Y_i^{(n)}$ devin:

$$\begin{aligned}
\epsilon_i X_i^{(n)} + \lambda_1 Q_i \sum_{j \leq i_c} (Q_j^* X_j^{(n)} + Q_j Y_j^{(n)}) + \lambda_2 Q_i \sum_{j > i_c} (Q_j^* X_j^{(n)} + Q_j Y_j^{(n)}) &= E_n X_i^{(n)} \\
\epsilon_i Y_i^{(n)} + \lambda_1 Q_i^* \sum_{j \leq i_c} (Q_j^* X_j^{(n)} + Q_j Y_j^{(n)}) + \lambda_2 Q_i^* \sum_{j > i_c} (Q_j^* X_j^{(n)} + Q_j Y_j^{(n)}) &= -E_n Y_i^{(n)} \\
&\text{if } i \leq i_c, \\
\epsilon_i X_i^{(n)} + \lambda_2 Q_i \sum_{j \leq i_c} (Q_j^* X_j^{(n)} + Q_j Y_j^{(n)}) + \lambda_3 Q_i \sum_{j > i_c} (Q_j^* X_j^{(n)} + Q_j Y_j^{(n)}) &= E_n X_i^{(n)} \\
\epsilon_i Y_i^{(n)} + \lambda_2 Q_i^* \sum_{j \leq i_c} (Q_j^* X_j^{(n)} + Q_j Y_j^{(n)}) + \lambda_3 Q_i^* \sum_{j > i_c} (Q_j^* X_j^{(n)} + Q_j Y_j^{(n)}) &= -E_n Y_i^{(n)} \\
&\text{if } i > i_c.
\end{aligned}$$

Rezolvarea acestor ecuatii ne conduce la concluzia ca exista doua stari colective cu energiile (in cazul degenerat)

$$\begin{aligned}
E_{n,RPA}^{(1)2} &= \epsilon^2 + 2\epsilon(E_{n,TDA}^{(1)} - \epsilon) = \epsilon(2E_{n,TDA}^{(1)} - \epsilon), \\
E_{n,RPA}^{(2)2} &= \epsilon^2 + 2\epsilon(E_{n,TDA}^{(2)} - \epsilon) = \epsilon(2E_{n,TDA}^{(2)} - \epsilon),
\end{aligned}$$

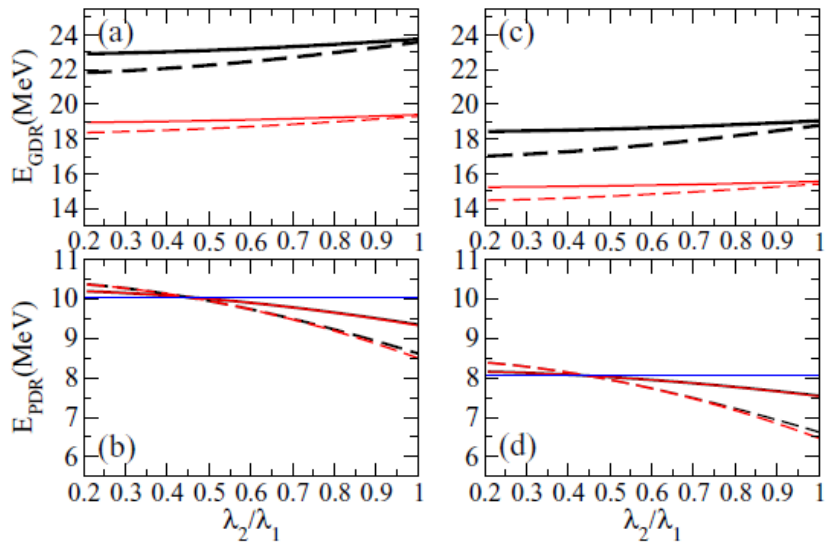
Energiile TDA corespunzatoare sunt date de:

$$\begin{aligned}
E_{n,TDA}^{(1)} &= \epsilon + \frac{(\lambda_1 \alpha + \lambda_3 \beta)}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4(\lambda_1 \lambda_3 - \lambda_2^2) \alpha \beta}{(\lambda_1 \alpha + \lambda_3 \beta)^2}} \right) \\
E_{n,TDA}^{(2)} &= \epsilon + \frac{(\lambda_1 \alpha + \lambda_3 \beta)}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4(\lambda_1 \lambda_3 - \lambda_2^2) \alpha \beta}{(\lambda_1 \alpha + \lambda_3 \beta)^2}} \right).
\end{aligned}$$

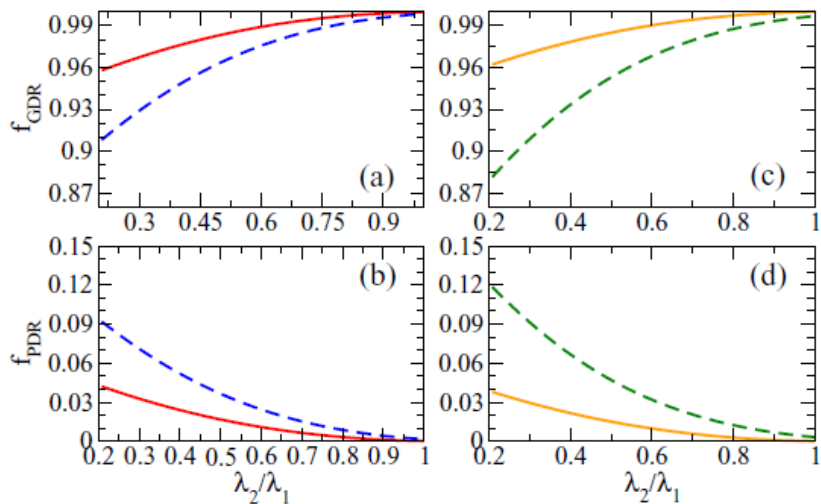
unde

$$\alpha = \sum_{i \leq i_c} |Q_i|^2, \beta = \sum_{i > i_c} |Q_i|^2.$$

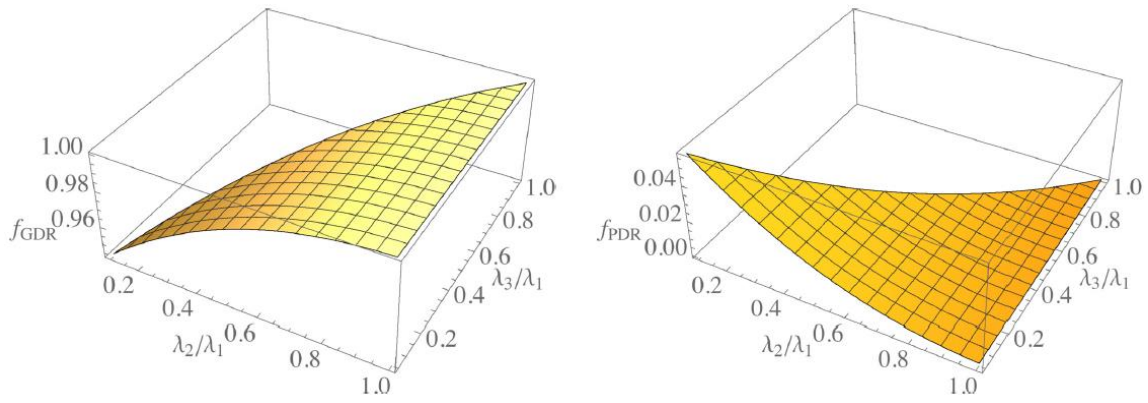
Astfel pentru nucleul Ni68 (a si b) si nucleul Sn132 (c si d) in figura de mai jos sunt indicate pozitiile energiilor modurilor colective de tip GDR si PDR ca functie de raportul constantelor de cuplaj. Culoare neagra reprezinta calculele TDA iar cea rosie calculele RPA pentru cazul cu un numar de neutroni in exces de 6 (linii continue) si respective 12 (liniile intrerupte).Linia albastra defineste energia neperturbata.



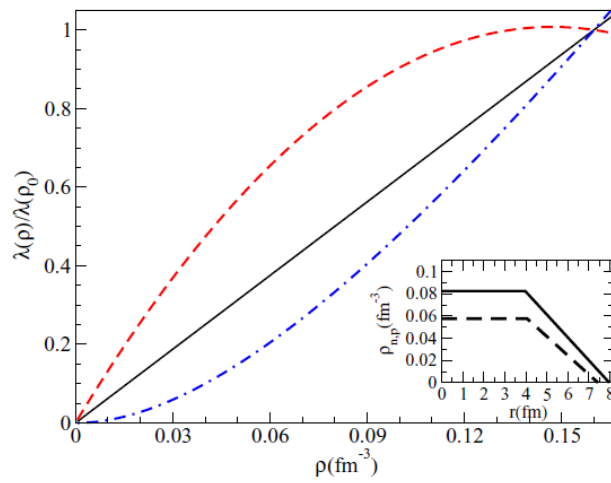
In cadrul formalismului s-a putut determina si regula de suma (EWSR) asociata cu fiecare mod. In Figura urmatoare, tot ca functie de raportul celor doua constant de cuplaj s-a reprezentat grafic EWSR pentru aceleasi doua nuclee. Astfel (a) arata EWSR atribuita modului GDR pentru Ni68 cu un numar de neutroni in exces 6 (definite de linia continua rosie) si cu un numar de neutroni in exces 12 (linia albastra punctata). Similar in (b) avem reprezentata regula de suma pentru PDR. In (c) si (d) este reprezentat cazul Staniiului pentru aceleasi valori ale numarului de neutron in exces.



Acordul cu datele experimentale este foarte bun in ciuda ipotezelor simplificatoare al modelului. O reprezentare globala a fractiilor de regula de suma atribuite celor doua moduri (GDR si PDR) in functie de constantele de cuplaj este indicata in figura urmatoare pentru cazul Staniiului considerand 13.5 neutroni in exces.



Considerand valori realiste pentru constantele de cuplaj, obtinute plecand de la asy-EoS de tip asysoft, asystiff si asysuperstiff, reprezentate ca functie de densitate in figura urmatoare

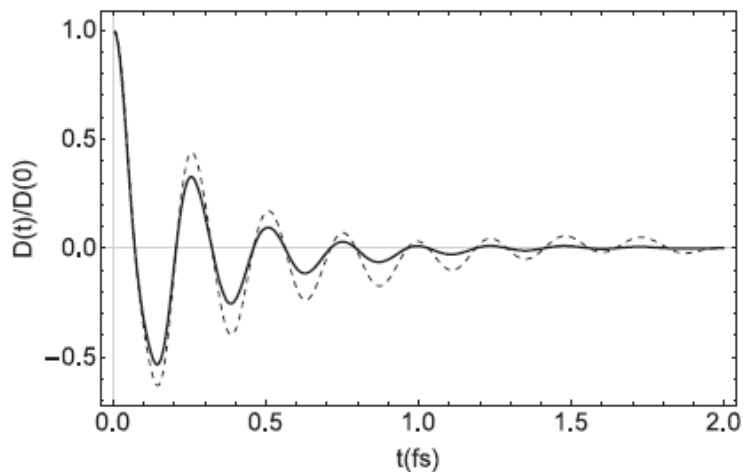


se obtin valori intr-un acord foarte bun cu predictiile bazate pe investigatiile PDR in cadrul modelului de transport de tip Vlasov dupa cum se poate deduce si din informatiile furnizate de tabelul de mai jos

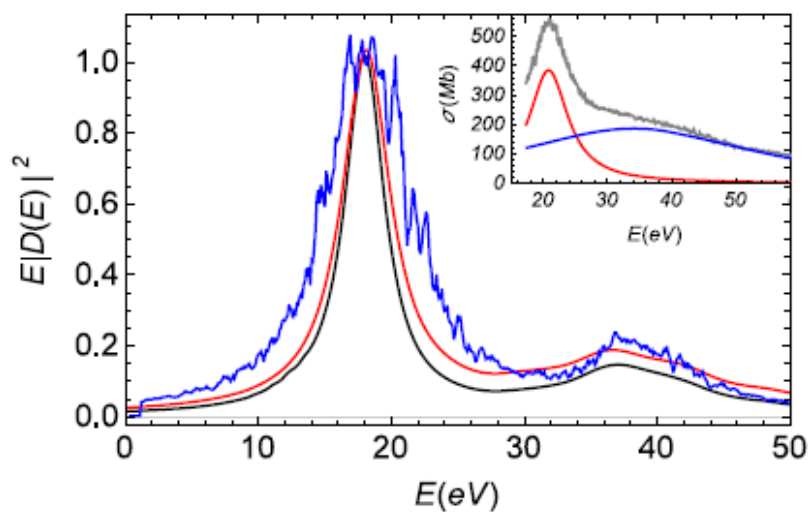
asy-EoS	λ_2/λ_1	λ_3/λ_1	E_{PDR}	E_{GDR}	$f_{PDR}(\%)$	$f_{PDR}^V(\%)$
asysoft	0.57	0.23	7.98	15.30	1.3	2.4
asystiff	0.31	0.11	8.05	15.20	3.3	4.2
asysupstiff	0.15	0.02	8.05	15.17	5.0	4.4

Concordanta dintre cele doua abordari teoretice si a acestora cu datele experimentale ne conduce la concluzii robuste privind proprietatile microscopice ale acestor moduri colective.

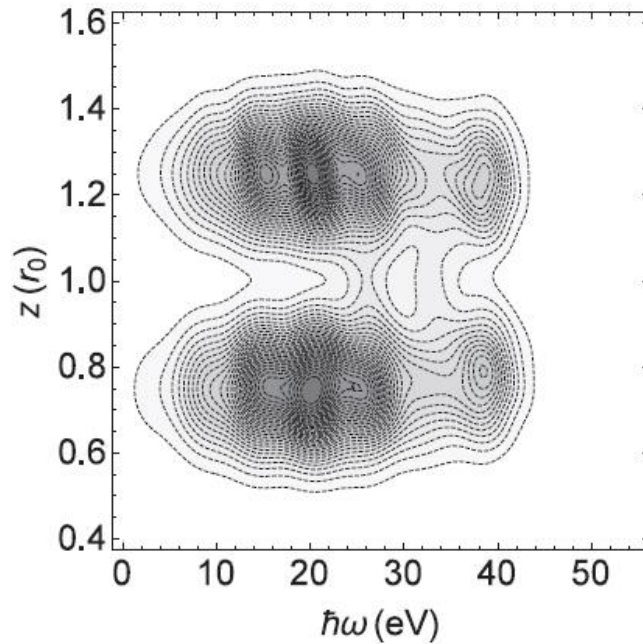
Plecand de la analogia care poate exista intre dinamica dipolara in nuclee si dinamica dipolara in clusteri si fullerene am extins metodele de investigatie propuse in acest proiect la studiul acestor sisteme mesoscopice. In figura urmatoare este prezentata evolutia momentului de dipol ca functie de timp pentru C60 in aproximatia Thomas-Fermi dependenta de timp si in aproximatia Thomas-Fermi cu termen de schimb inclus.



Analiza raspunsului linear ne indica si in acest caz existent a doua moduri collective situate la 20 eV si 38 eV dupa cum se poate observa din figura prezentata mai jos.

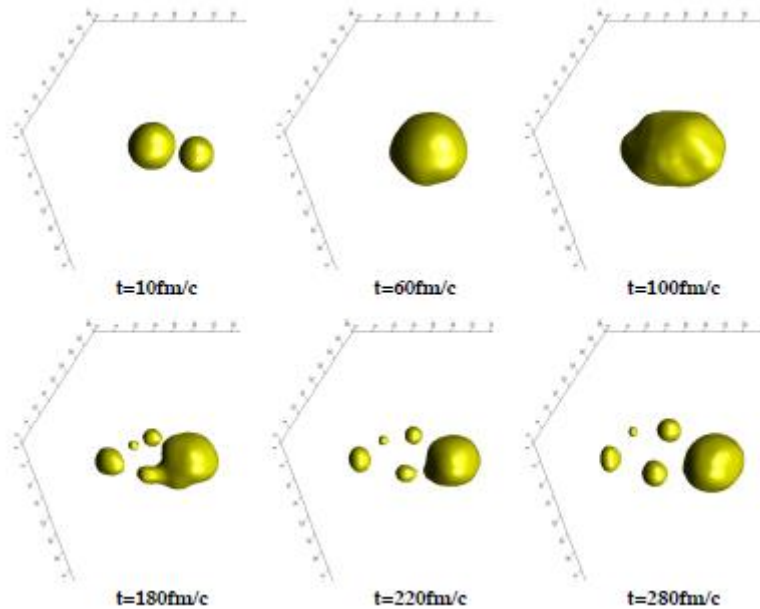


Natura celor doua moduri colective se poate analiza din structura densitatilor de tranzitie reprezentate in figura urmatoare si se poate concluziona ca ambele namifesta proprietatile unor oscilatii la suprafata C60.

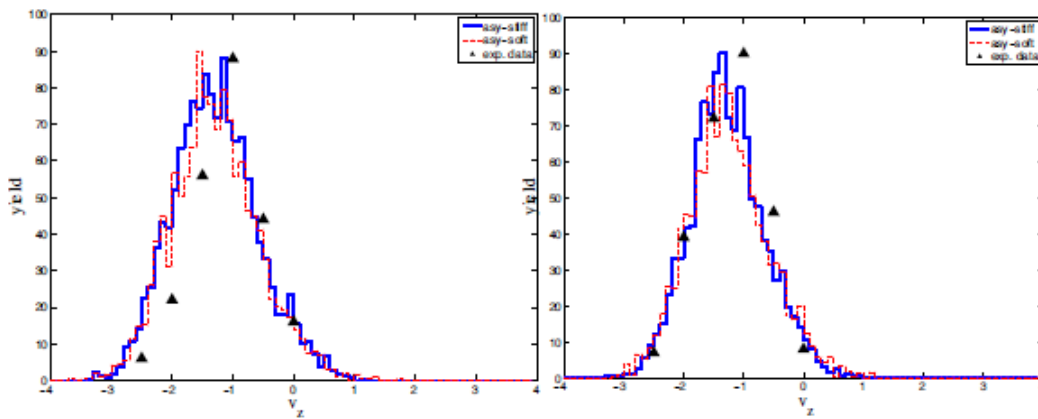


Rezultatele originale au facut obiectul a trei lucrari, una publicata in Physical Review C, una in Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics si o alta in Romanian Journal of Physics. Sa mai mentionam ca in iunie 2015, in calitate de "invited speaker" la cea mai importanta conferinta de fizica nucleara din 2015, *Nucleus-Nucleus Collisions*, directorul de proiect a prezentat rezultatele discutate mai sus. In continuare se are in vedere extinderea studiului pentru a se obtine o descriere macroscopica, semiclassical a PDR in termeni de oscilatiile a trei fluide reprezentand neutron isi protonii miezului nuclear si respectiv neutronii in exces.

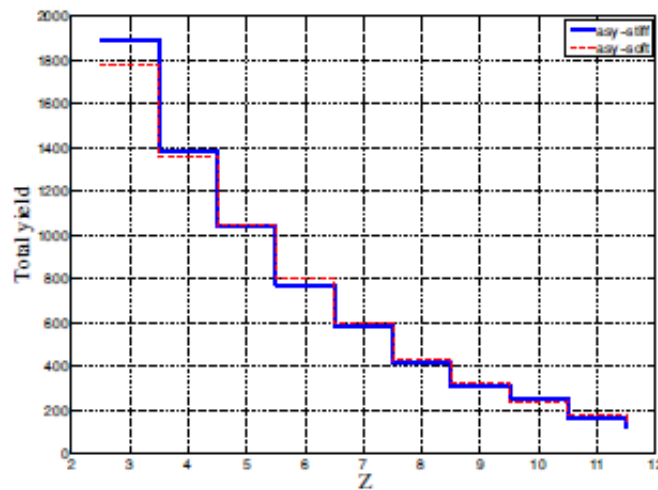
Pentru WP2. *Advanced investigations on the fragmentation mechanisms at Fermi energies.* In cadrul unui model microscopic de transport bazat pe ecuatie Boltzmann-Nordheim-Vlasov, Stochastic Mean Field, s-a initiat un studio a dependentei de energia incidenta a procesului de fragmentare de "neck" pentru sistemelor Sn124+Ni64 si Sn112+Ni58. Energiile avute in vedere au fost 35A AMeV si respective 45 AMeV. Figura de mai jos, obtinuta pentru o energie incidenta de 45 AMeV demonstreaza clar coexistenta a mai multe mecanisme de fragmentare, mergand de la fragmentarea "neck"-ului pana a fisiunea asimetrica indusa dinamic.



In canalul de izospin s-au considerat doua parametrizari diferite cu densitatea. S-a observat un acord bun cu datele experimentale in ceea ce priveste proprietatile cinematice de baza ale fragmentelor produce, cum ar fi spectre in viteza, ilustrate mai jos:



Distributiile de sarcina ale IMF (intermediate Mass Fragments) la 45 AMeV pentru cele doua asy-EOS sunt aratate in continuare:



Se observa ca pentru aceasta observabila nu se manifesta diferente majore nici la 45 AMeV, spre deosebire de cazul compozitiei de izospin. De aceea o analiza teoretica a distributiei valorilor medii ale raportului N/Z (numarul de neutroni si respectiv numarul de protoni din compozitia fragmentului) ca functie de unghiul dintre axa de separare si cea de fragmentare, precum si ca functie de timpul de emisie va permite, in urma confruntarii cu date experimentale, impunerea unor constrangeri aditionale privind dependent cu densitatea a a energiei de simetrie.

Rezultatele originale au facut obiectul a trei lucrari, publicate in Physical Review C, Nuclear Science and Technology si in Romanian Journal of Physics.

Pentru WP3. *Collective dynamics and fragmentation in BEC within the Gross-Pitaevskii-Boltzmann formalism*

Dinamica condensatelor Bose-Einstein cu interactii de tip *two-body* neomogene spatiale este un subiect de maxim interes experimental care a catalizat o serie foarte ampla de investigatii teoretice si computationale. Investigatiile numerice efectuate in cadrul proiectului arata in mod clar ca, pentru interactii de tip *two-body* puternic localizate, efectele neliniare slabesc iar condensatele ating un regim linear. Pentru a cuantifica aceste efecte neliniare, am monitorizat asa-numitul timp de aparitie a instabilitatii (in engleza, *instability onset time*), care arata la cat timp dupa excitarea condensatului apar modulatii semnificative in profilul de densitate al acestuia. Pentru simplitate, am studiat condensate puternic alungite compuse din doua specii atomice supuse la excitatii parametrice radiale. Aceste excitatii au generat unde de densitate longitudinale, de tip Faraday si resonant, ale caror proprietati depind de frecventa excitatiilor si, cel mai important, de topologia starilor stationare initiale. Chiar data situatia extrema in care condensatul se comporta ca un sistem linear este usor de inteles, trebuie subliniat ca in regimul cuasi-linear cele doua configuratii distincte ale sistemului, anume segregata si simbiotica, au comportari diferite. In cazul starilor simbiotice undele Faraday sunt puternic influentate de modificarea structurii spatiale a interactiei de tip *two-body* (aspect vizibil in cresterea rapida a timpului de aparitie a instabilitatii), in timp ce undele rezonante sunt influentate relativ slab (aspect vizibil in cresterea lenta a timpului de aparitie a instabilitatii). La polul opus, in cazul starilor segregate, undele Faraday sunt influentate slab de modificarea structurii spatiale a interactiei de tip *two-body*, in timp ce impactul asupra undelor rezonante este puternic. Aceste rezultate sunt ilustrate in Figura 1, unde aratam aparitia undelor rezonante pentru o configuratie simbiotica. Detaliile complete sunt prezentate in articolul "Faraday and resonant waves in binary collisionally-inhomogeneous Bose-Einstein condensates" de J. B. Sudharsan, R. Radha, M. C. Raportaru, A.I. Nicolin si A. Balaz, sub evaluare la Journal of Physics B.

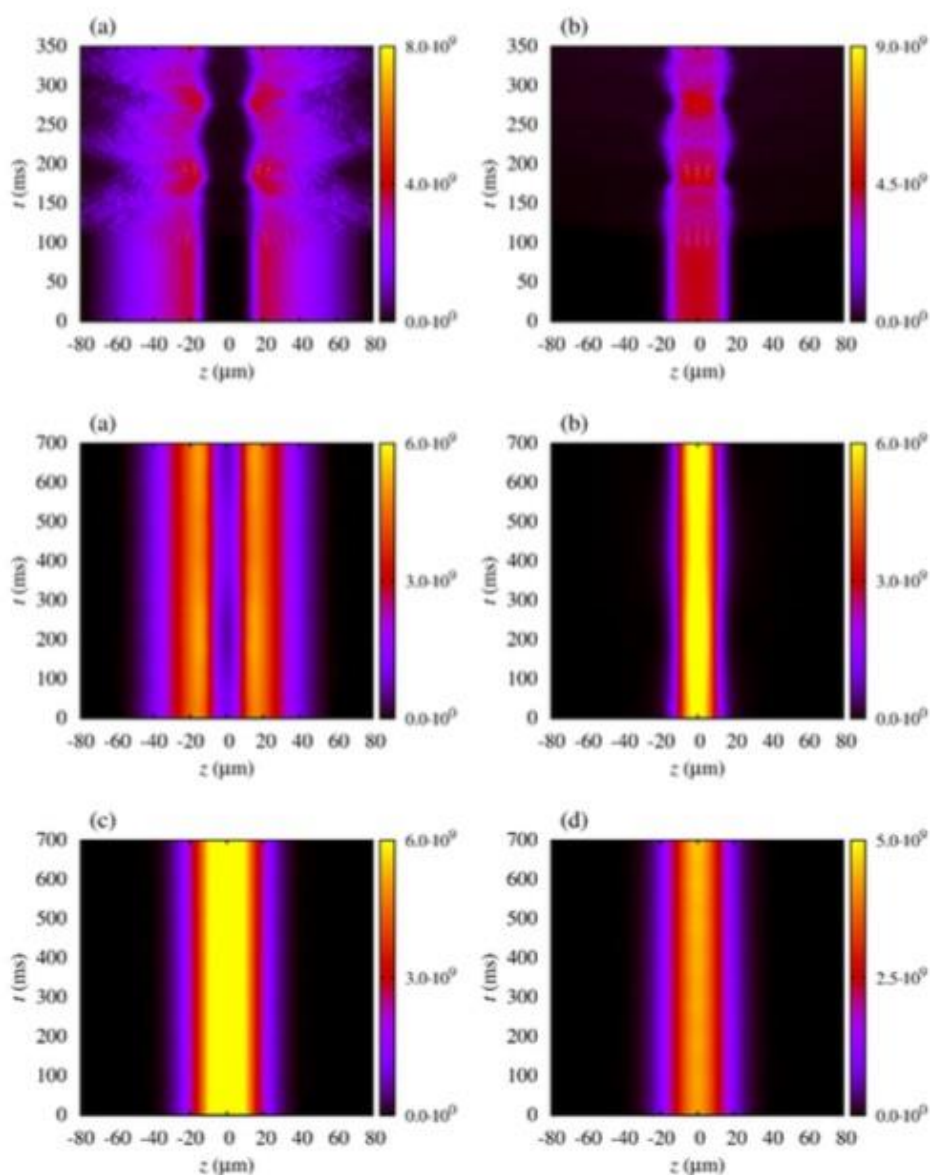


Figura 1 Evolutia in timp real a profilului longitudinal de densitate (integrat radial) al unui condensat binar pentru o configuratie initiala simbiotica si unde rezonante. Imaginile din partea stanga (dreapta) corespund componentei A (B) a condensatului pentru niveluri crescute de neomogenitate (de sus in jos).

Am efectuat paralelizarea OpenMP a unei metode numerice de rezolvare a clasicei ecuatii Boltzmann-Vlasov care reprezinta unul dintre cele mai avansate modele teoretice semiclassical folosit in descrierea sistemelor nucleare si a altor sisteme cuantice mesoscopice. Codul numeric implementeaza asa-numita metoda a particulelor test care necesita cantitati ce depind patrat de numarul particulelor test (*i.e.*, pseudo-particulelor) asociate cu fiecare particula fizica (*i.e.*, nucleon) a sistemului. Deoarece o buna acoperire a spatiului fazelor al sistemul (anume nucleul atomic in cazul studiului modurilor colective si nucleele atomice in cadrul proceselor de fuziune-fisiune) necesita un numar mare de particule test, acuratetea rezultatelor numerice este puternic limitata de infrastructura hardware disponibila. Rezultatele noastre numerice arata o scadere consistenta a timpului de calcul odata cu

cresterea numarului de fire de executie (in engleza, *threads*). Mai mult, am observat ca timpul de calcul are o dependenta liniara de timpul de integrare, independent de numarul firelor de executie, asa cum se poate observa in Figura 2. Aceste rezultate pot fi imbunatatite in mod considerabil utilizand o paralelizare conceptuala a codului. Aceasta porneste de la impartirea sarcinii computationale pe mai multe nuclee de procesare prin alocarea directa a regiunilor din spatiul fazelor catre nucleele de procesare. Deoarece particulele test alocate anterior pentru intreg sistemul descriu acum doar cateva particule fizice, numarul de particule test per nucleon poate fi crescut in mod substantial, ceea ce duce la un plus de acuratete numerica si un cost de calcul mai mic. Rezultatele acestea sunt prezentate in detaliu in articolul "The speed-up of a Boltzmann-Vlasov code" by R. Tabacu, M. C. Raportaru, E. Slusanschi, V. Baran si A. I. Nicolin, ce urmeaza sa fie publicat in Romanian Journal of Physics.

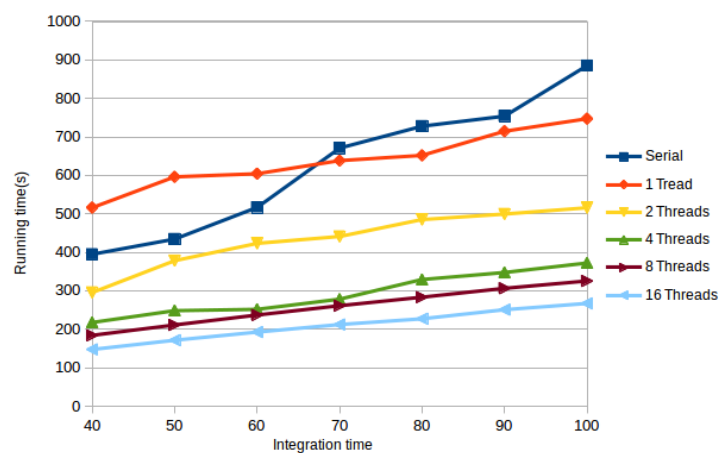


Figura 2 Dependenta timpului de calcul de timpul de integrare pentru diferite fire de procesare.

Pentru WP4. *Transport description of collective features and dissipation in QGP*

In cadrul acestei directii de cercetare s-au testat subrutinele care realizeaza extinderea modelului numeric de transport prin includerea unui termen de interactie de tip vectorial, pe langa termenul de tip Nambu-Jona Lasinio precum si subrutinele care genereaza fluctuatiile in conditiile initiale de tip "hot spots" si "cold spots". Pentru calculul parametrilor de curgere colectiva superiori lui v_2 s-a concluzionat ca este necesara reducerea zgomotului numeric generat de numarul redus de particule test per quark. De aceea simultan cu cresterea acestui parametru timpul de rulare per event va creste. Va fi necesara implementarea paralelizarii discutata la punctul anterior al acestui raport pentru programul relativist. In colaborare cu grupul de la Universitatea din Catania se vor testa la inceputul anului viitor predictiile numerice ale versiunii imbunatatite rezultatelor numerice si rolul conditiilor initiale asupra evolutiei colective. In legatura cu dinamica disipativa in sisteme complexe s-a finalizat si publicat un studiu dedicat caracterizarii aspectelor chaotice in evolutia temporala. In adevar, in fenomene legate de tematica prezentului proiect si asociate cu ciocnirile nucleu-nucleu la energii Fermi sau relativiste, unde este investigate

aparitia unei tranzitii de faza, experimental sunt accesibile numai distributii finale in impulsuri. Nu poate fi extrasa informatie despre evolutia temporala si de aceea devine important de a defini, plecand de la starea finala, marimi care sa sugereze prezenta sau absenta unei tranzitii de faza in aceste sisteme.

Rezultatele stiintifice ale cercetarilor in cadrul proiectului de cercetare s-au concretizat in patru lucrari publicate in reviste ISI din strainatate, patru lucrari publicate in reviste ISI din tara, lucrari aparute in Proceedings-ul unor conferinte internationale si prezentari la conferinte nationale si internationale, indicandu-se explicit suportul din proiectul IDEI. O lucrarea este trimisa spre publicare la revista Journal of Physics B- Atomic, Molecular and Optical Physics .

Nu in ultimul rand trebuie mentionat ca in conexiune cu temele acestui proiect de cercetare in anul 2015 a fost finalizata o teza de doctorat sub indrumarea profesorului Virgil Baran, directorul acestui contract. De asemenea din octombrie 2015, Andreea Croitoru, Dragos Iustin Palade si Cristian Iorga au inceput Doctoratul avand printre subiectele stiintifice si tematici asociate cu obiectivele acestui proiect de cercetare.

Lucrari in reviste din strainatate cotate ISI:

1) *Production cross sections for intermediate mass fragments from dynamical and statistical decay of projectile-like fragments in Sn124+Ni64 and Sn112+Ni58 collisions at 35 A MeV*

Autori: P. Russotto, E. De Filippo, A. Pagano, ... V. Baran, et al.,
Physical Review C 91, 014610 (2015) (ISI impact factor 3.73)

2) *Exotic break-up modes in heavy ion reactions up to Fermi energies*

Autori: M. Colonna, V. Baran, S. Burrello, M. Di Prima, P. Napolitani, C. Rizzo
Nuclear Science and Techniques 26, S20509 (2015) (ISI impact factor 0.401)

3) *Collectivity of the pygmy dipole resonance within schematic Tamm-Dancoff approximation and random-phase approximation models*

Autori: V. Baran, D.I. Palade, M. Colonna, M. Di Toro, A. Croitoru, A.I. Nicolin
Physical Review C 91, 054303 (2015) (ISI impact factor 3.73)

4) *Optical Response of C-60 fullerene from a time dependent Thomas Fermi approach*

Autori: D.I. Palade, V. Baran

Journal of Physics B- Atomic, Molecular and Optical Physics 48, 185102 (2015) (ISI impact factor 1.97)

5) *Farday and resonant waves in binary collisionally-inhomogeneous Bose-Einstein condensates*

Autori: J. B. Sudharsan, R. Radha, M. C. Raportaru, A.I. Nicolin si A. Balaz, sub evaluare la Journal of Physics B.

Lucrari in reviste din tara cotate ISI:

1) Pygmy Dipole Resonance in a schematic model

Autori: A. Croitoru, V. Baran, T. Isdraila, M. Colonna, M. Di Toro, M. Marciu
Romanian Journal of Physics 60, 748-752, (2015) (ISI impact factor 0.924)

2) Collective dynamics and fragmentation in nuclear systems

Autori: V. Baran, M. Marciu, D.I. Palade, M. Colonna, M. Di Toro, A.I. Nicolin, R. Zus
Romanian Journal of Physics 60, 727-737, (2015) (ISI impact factor 0.924)

3) Quantifying the folding mechanism in chaotic dynamics

Autori: V. Baran, M. Zus, A. Bonasera, A. Paturca
Romanian Journal of Physics 60, (2015) (ISI impact factor 0.924)

4) The speed-up of a Boltzmann-Vlasov code

Autori: R. Tabacu, M. Raportaru, E. Slusanschi, V. Baran, A. I. Nicolin
Romanian Journal of Physics 60, (2015) (ISI impact factor 0.924)

Lucrari aparute in Proceedings-ul unor conferinte internationale:

1) Isospin effects in heavy-ion reactions: results from transport theories

Autori: M. Colonna, V. Baran, C. Rizzo
EPJ Web of Conferences vol. 88, 00027, (2015)

Participari la conferinte:

Baran Virgil, invited speaker, Nucleus-Nuclius Collisions 2015, 21-26 iunie, Catania, Italy

Director proiect,

Prof.univ.dr. Virgil Baran

