

Memoriu de activitate

Prof. Dr. Apolodor Raduta

I. Diseminare, sinteze, carti, organizari de conferinte internationale

A) Monografii

[1] Teoria difuziei magneto-optice multiplu coerenta in formalismul matricii densitatii, A.A. Raduta, St. Cerc. Fiz. 20, 5 (1968) 503-553 .

[2] Aproximatia BCS in studiul nucleelor supraconductoare, A.A. Raduta, V. Ceausescu, St. Cerc. Fiz. 25, 4 (1973) 487 .

[3] Asupra unor metode aproximative de tratare a fortelor de imperechere, A.A. Raduta, St. Cerc. Fiz. 25, 6 (1973) 871 .

[4] Folosirea aproximatiei fazelor intimplatoare in studiul structurii nucleelor sferice, A.A. Raduta, V. Ceausescu, E. Badralexu, St. Cerc. Fiz. 28, 6 (1976) 617 .

[5] Asupra unor aspecte fundamentale ale aproximatiei fazelor intimplatoare in probleme de structura nucleara, A.A. Raduta, V. Ceausescu, E. Badralexu, St. Cerc. Fiz. 28, 7 (1976) 707 .

B) Lectii prezentate la Conf. Intern., aparute in proceedings-uri

[1] Phenomenological description of three interacting bands, Dresden Conference Z.F.K. 404 (1979) 83, A.A. Raduta .

2) A microscopical description of the coupling between different degrees of freedom, Fizika, vol. 7, Supplement 2, 1975, pag. 80, A.A. Raduta, V. Ceausescu; lectie invitata la conferinta de fizica nucleara, Zagreb 1974 .

[3] The description of the quadrupole collective motion of a proton neutron interacting system, within the generalized coherent states model, A.A. Raduta; lectie invitata, aparuta in Symmetries and Semiclassical Features of Nuclear Dynamics, Springer Verlag, pag. 255-283, ed. A. A. Raduta.

4) Semiclassical treatment of the particle core coupling, A.A. Raduta; International Conference on Symmetries, Reactions and Nuclear Structure, proceedings of invited lectures, Dubrovnik 1986, World Scientific, Singapore, p. 993-1000, ed. V. Paar .

[5] New results obtained in the frame of the coherent states model for three collective bands, A.A. Raduta; invited lecture, in "Nuclear Collective Dynamics", World Scientific, Singapore, 1982, p. 342 ,eds. D. Bucurescu, V.Ceausescu and V.Zamfir.

[6] Alpha clusters in heavy nuclei, A.A. Raduta; Lecture given at the International Summer School "New Trends in Theoretical Nuclear Physics", Predeal 1991, World Scientific, Singapore, p. 173-192,eds. A. A. Raduta, D. S. Delion and I. I. Ursu.

- [7] Towards a New Shell Model formalism, A.A. Raduta; Invited Lecture at the International Summer School "Nuclear and Atomic Collision Phenomena", Predeal 1992, Plenum Press, eds. A.Calboreanu and V.Zoran (17 pagini) .
- [8] The use of projected spherical single particle states in deformed nuclei, A.A. Raduta; invited talk at the International Conference "Building Blocks in Nuclear Structure", Amalfi, Italy, 1992, World Scientific, Singapore, p. 313 (10 pagini) .
- [9] Anharmonic and deformation effects in $2\nu\beta\beta$ decay, A. A. Raduta, in "Frontier Topics in Nuclear Physics", eds. A. Sandulescu and W. Scheid, Plenum Press, 1994 (13 pagini).
- [10] Extensions of Moszkowski model to proton-neutron systems: a) Scissors mode b) Gamow-Teller- $2\nu\beta\beta$ decay, A. A. Raduta, in "Collective Motion and Nuclear Dynamics", Predeal 1995, eds. A. A. Raduta, D. S. Delion and I. I. Ursu, World Scientific, Singapore.
- [11] Phenomenological description of the pear shaped nuclei, A. A. Raduta, in "Structure and Stability of Nucleon and Nuclear Systems", Predeal 1998, eds. A. A. Raduta, S. Stoica and I. I. Ursu, World Scientific, Singapore.
- [12] A fully self-consistent pnQRPA description of the $2\nu\beta\beta$ decay, A. A. Raduta, in " Structure and Stability of Nucleon and Nuclear Systems", Predeal 1998, eds. A. A. Raduta, S. Stoica and I. I. Ursu, World Scientific, Singapore.
- [13] Unified description of three positive and three negative parity interacting bands, A. A. Raduta and D. Ionescu, Lecture given at International Rila Conference "Nuclear Theory 21" ed. V. Nikolaev, Heron Press, Sofia, 2002.
- [14] Ground State of Double beta Decaying Nuclei, A. A. Raduta, Prog. Part. Nucl. Phys. 48 (2002)233-242, lecture given at Erice Conference on Nuclear Astrophysics.
- [15] Renormalised boson expansion for the $2\nu\beta\beta$ decay, A. A. Raduta, Czech. Journal of Phys.,50, 4 (2000) 519., Invited talk at the International workshop on double beta decay, Prague 1999.
- [16] Simultaneous description of four positive and four negative parity bands, lecture given at the International Summer School, Collective Motion and Phase Transitions in Nuclear Systems, Predeal 2006, World Scientific, singapore, Eds. A. A. Raduta, V. Baran and I. I. Ursu.
- [17] Double beta decay to the first $2^+_{g.s.}$ state, lectie invitata la conferinta "Changing facets of nuclear structure", Vico Equencee 2007.
- [18] Collective properties of Na clusters, ICSM2010, Antalya, Turkey.
- [19] FRpnQRPA approach with the gauge symmetry restored. Application for the $2\nu\beta\beta$ decay, **A. A. Raduta** and C. M. Raduta, Proceedings of the International conference NSRT-2012, Dubna, EPJ Web of Conferences 38, 14003 (2012), DOI: 10.1051/epjconf/20123814003.
- [20] $2\nu\beta\beta$ decay within a higher pnQRPA approach with the gauge symmetry preserved, **A. A. Raduta** and C. M. Raduta, International Summer School "Dynamics of open nuclear systems",

Predeal 2012, **IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 413 (2013) 012014**
doi:10.1088/1742-6596/413/1/012014.

C) Scoli internationale organizate in domeniul fizicii nucleare (in calitate de director) si proceedings-uri editate.

- [1] Critical phenomena in heavy ion physics, Brasov International School 1980, Central Institute of Physics, Bucharest, Romania, 1124 pagini; Edittors: A.A. Raduta, G. Stratan
- [2] Symmetries and Semiclassical Features of Nuclear Dynamics, Proceedings, 1986, Springer Verlag, 465 pagini; edited by A.A. Raduta .
- 3) New Trends in Theoretical and Experimental Nuclear Physics, World Scientific, Singapore, 1992, 549 pagini; edited by A.A. Raduta, D.S. Delion and I.I. Ursu .
- 4) Collective motion and Nuclear Dynamics, World Scientific, Singapore, 1996, 585 pagini; edited by A. A. Raduta, D. S. Delion and I. I. Ursu
- 5) Collective Motion and Nuclear Dynamics, Proceedings of short communications given at International Summer School, Predeal, 1995, Romanian Journal of Physics, vol. 41, no 1,2, 1996, 210 pagini, edited by A. A. Raduta
- 6) Structure and Stability of Nucleon and Nuclear Systems, Predeal 1998, 585 pagini, eds. A. A. Raduta, S. Stoica and I. I. Ursu, World Scientific, Singapore.
- 7) Structure and Stability of nucleon and nuclear systems, Predeal 1998, Proceedings of short communications, Romanian Journal of Physics, vol. 44, no.1,2, 1999, 332 pagini, edited by A. A. Raduta, S. Stoica and I.I. Ursu.
- 8) Collective Motion and Phase Transitions in Nuclear Systems, Predeal 2006, 700 pagini edditted by A. A. Raduta, V. Baran and I. I. Ursu, World Scientific, Singapore.

D) Capitole in carti

- 1) **Coherent State Model for several collective interacting bands**, 70 pagini, capitol in cartea **Recent Research Developments in Nuclear Physics**, publicata de prestigioasa editura Transworld Research Network, India, ISBN:81-7895-124-X.

E) Carti aparute

- 1) Fundamente de teoria nucleului (555 pagini): A. A. Raduta, C. M. Raduta, Editursa Universitatii Bucuresti, 2007.
- 2) Elements of special relativity (185 pagini): A. A. Raduta, C. M. Raduta, Editura Universitatii Bucuresti, 2007.
- 3) Fundamente de teoria nucleului (625 pagini), editia a doua: A. A. Raduta, C. M. Raduta, Editursa Universitatii Bucuresti, 2010.
- 4) Elements of special relativity (225 pagini), editia a doua: A. A. Raduta, C. M. Raduta, Editura Universitatii Bucuresti, 2010.

5) Nuclear Structure with Coherent States, A. A. Raduta, Springer, 2015, ISBN-10:3319146416, ISBN-13:578-3319146416.

II. REZULTATE DEOSEBITE, PRIORITATI

Pentru unele subiecte, din cele abordate de-a lungul celor 42 de ani de cercetare stiintifica, detin prioritate, fapt de altfel recunoscut in literatura de specialitate. Citarile folosite in acest raport corespund listei de lucrari stiintifice, inclusa in acest material. In cele ce urmeaza, voi mentiona subiectele in care am adus contributiile originale si care au prioritate in domeniile respective:

A) Studiul microscopic al miscarii colective cvadрупolare octupoare.

Lucrarile mele privind descrierea microscopica a cuplajului dintre gradele de libertate octupolare si cele cvadрупolare au fost primele din acest domeniu. Acest lucru este mentionat de specialisti de prima mana in domeniu, cum sunt: P. Vogel (S.U.A.), V.G. Soloviov (Rusia), S.D. Rohozinski (Polonia), P. Butler (England), P. Nazarewicz (SUA). Acest subiect este intens studiat in ultimul timp, atat cu mijloace fenomenologice cat si microscopice. Intr-adevar, recent a aparut un amplu articol de sinteza in Report of Progress in Physics R 51 (1988) 541, autor S.G. Rohozinski, in care nu numai ca sint mentionate toate articolele din acest domeniu publicate in reviste din strainatate, dar unora din ele li se consacra spatii largi, fiind descrise procedeele adoptate si rezultatele obtinute. Sint primul care a calculat degenerarile grupului SU7, ce caracterizeaza reducerea $R7 \supset R3$. Deasemenea articolul de sinteza semnat de Butler and Nazarewicz, aparut in Review of Modern Physics face referire explicita la 6 articole scrise de mine in acest domeniu.

B) Dependenta explicita de deformarea dinamica gama, a functiilor proprii ale Hamiltonianului Bohr - Mottelson.

In anul 1953, A. Bohr si B. Mottelson au propus modelul picaturii de lichid pentru descrierea unor proprietati colective ale nucleelor sferice. Astfel, nucleul este asimilat cu o picatura ce efectueaza oscilatii cvadрупolare in jurul unei forme de echilibru sferice. In sistemul intrinsec, functiile de unda ce corespund acestor vibratii depind de deformarile dinamice beta si gama, precum si de cele trei unghiuri Euler, ce fixeaza pozitia referentialului propriu. Dependenta acestor functii de gama n-a putut fi explicata timp de 25 de ani. Articolele mele in aceasta directie (a se vedea lucrarile 17, 18 din lista de lucrari) au aparut in aceeasi perioada cu cele ale lui Moshinski (Mexic) si Williams (S.U.A.). Solutia prezentata de noi este complet diferita de celelalte doua si se remarca atat prin eleganta metodei cit si prin faptul ca am prezentat compact, in lucrarea 18, toate elementele de matrice ale tensorilor si invariantilor colectivi ce apar frecvent in studiul proprietatilor colective ale nucleelor deformate. Aceasta prioritate este mentionata in lucrarile grupurilor din Frankfurt/Main (Greiner), Lublin (Spikowski) si Copenhaga (Yaunouleas).

Rezultatele din lucrarea 18 sint folosite de grupurile din Copenhaga si Lublin pentru elaborarea unor coduri de calcule numerice pentru structura nucleara.

Deasemenea, aceste rezultate sunt folosite si mentionate de Mayer - ter - Vehn la conferinta "Interacting Bosons in Nuclear Physics", 1978, pentru descrierea nucleelor gama instabile. Solutiile teoretice din lucrarile 17 si 18 sunt preluate si descrise in cartea Nuclear Models de J. M. Eisenberg si W. Greiner

C) Modelul starilor coerente (C.S.M.) pentru descrierea benzilor rotationale fundamentala, beta si gama in nuclee tranzitionale si deformate, incluzand starile de spin inalt.

Acest model a fost formulat mai intii pentru banda fundamentala, apoi pentru doua benzi si in final pentru 3 trei benzi in interactie. Modelul C.S.M. este capabil sa descrie atat energiile cat si tranzitiile electro-magnetice de tip E2 in benzi si intre benzi. Modelul a fost extins prin introducerea cuplajului cu gradele de libertate de tip cvasi-particula (cuplajul unei, a doua si a trei cuasi-particule). In felul acesta se obtine o descriere cantitativa pentru spectrele rotationale din zona "back-bending-ului".

Deasemenea, prin introducerea gradelor de libertate octupolare, pe langa cele de tip cvadrupolar, se descriu inca doua benzi de paritate negativa, avind $K^\pi = 0^-, 1^-$. Rezultatele acestui model sunt mentionate nu numai in articolele de specialitate dar si in faimoasa carte "The Nuclear Many Body Problem", de P. Ring si P. Schuck (de mentionat ca lucrarile mele sunt singurele lucrari romanesti care sunt mentionate in aceasta carte), precum si in amplele studii monografice ale lui Nadjakov (aparut in Soviet Journal of Particle and Nuclei 10 (6) (1979) 516) si A. Klein and E.P. Marshalek (UPR - Report - 0065 NT si Rev. Mod. Phys. 63 (1991) 375) .

Cunoscutii fizicieni Huruo Ui si Gyo Takeda (Prog. Th. Phys. 70(1983) 176) afirma ca modelul propus de mine este singurul care contine intrinsec o interpretare corecta a starilor rotationale ca fiind manifestari ale ruperii spontane de simetriei. In lucrarea lor monografica asupra dezvoltarilor bozonice, A. Klein si E.R. Marshalek (vezi cota mentionata mai sus), ierarhizind contributiile la descrierea fenomenologica a proprietatilor colective ale nucleelor, aseaza modelul starilor coerente elaborat de mine dupa modelul picaturii de lichid (deci pe locul doi) al lui A. Bohr si B. Mottelson, model pentru care s-a primit premiul Nobel.

D) O noua dezvoltare bosonica pentru algebra de cvasi-spin.

In lucrarea 28 am studiat comportarea semiclassicala a unui ansamblu de nucleoni cu un miez colectiv, miscindu-se cvadrupolar coerent. Folosind un principiu variational dependent de timp, se obtin ecuatii de tip Hamilton pentru coordonatele de faza, ce sunt parametri complecsi, determinind functiile de unda de incercare. Aproximatiile folosite in rezolvarea lor sint de tip BCS, RPA si dezvoltari bosonice. Este abordat deasemenea cazul algebrei de cuasispin. Se obtin astfel intr-un mod original reprezentarile bosonice ale operatorilor bifermionici, de tip Holstein-Primakoff si Dyson, si o noua reprezentare bosonica (necunoscuta pina acum). Acest fapt este consemnat in articolul de sinteza al lui A. Klein si E.R. Marshalek, mentionat mai sus.

E) Modelul starilor coerente generalizate (G.C.S.M.)

a fost elaborat in scopul descrierii starilor magnetice. Recent, (aprox. 15 ani) a aparut in literatura modelul a doi rotatori, care prezicea existenta starilor magnetice colective dipolare. Aceste stari au fost identificate in 1983-1984 in experimente de tip (e, e') si (γ, γ) . De atunci au aparut foarte multe lucrari menite sa explice caracteristicile acestor stari.

Modelul G.C.S.M. se distinge prin aceea ca este singurul care da o descriere cantitativa a urmatoarelor marimi: energia de excitatie, probabilitatea redusa de tranzitie $B(M1; 0^+ \rightarrow 1^+)$, formfactorul M1 pentru ciocnirea (e, e') . Meritul acestui model consta si in aceea ca descrie simultan o banda ce se sprijina pe starea 1^+ si inca 5 benzi colective, incluzind benzile fundamentala, beta si gama. Deci, modelul G.C.S.M. este singurul model ce descrie unificat

proprietatile de tip E2 si de tip M1 ale nucleelor medii si grele. Pentru prima data sint puse in evidenta alte stari colective de tip magnetic (diferite de 1^+) dipolar. Un alt merit de pionierat este descrierea unor stari de tip M3. O alta prioritate in acest domeniu se refera la faptul ca sunt primul care a studiat starile magnetice dipolare la nuclee par-impare, atat microscopic (39) cat si fenomenologic (40). De mentionat ca prezicerile teoretice facute pentru Gd155 si Dy163 sunt confirmate experimental dupa cum reiese din articolul de sinteza al lui Kneissl (Stuttgart).

Meritele modelului G.C.S.M. sint mentionate de A. Richter, descoperitorul starilor 1^+ magnetice, la Conferinta de la Creta, Grecia 1987, si de N. Lo Iudice, F. Palumbo si A. Richter intr-un articol de sinteza (vezi N. Lo Iudice, in "New Trends in Theoretical and Experimental Nuclear Physics, World Scientific; Eds. A.A. Raduta, D.S. Delion and I.I. Ursu, pag. 45).

F) Un nou model in paturi [45, 46].

Este cunoscut faptul ca pentru descrierea microscopica a nucleelor sferice se folosesc functii de unda uniparticula de model in paturi sferic iar pentru descrierea nucleelor deformate se folosesc functii deformate de tip Nilsson. Pentru descrierea sistemelor multi-nucleonice in interactie, se folosesc metode aproximative de tip BCS, RPA sau HFB. Aceste procedee furnizeaza stari de tip cvasi-particula (BCS sau HFB)sau colectiv (RPA) care nu au moment cinetic dat, in cazul in care functiile uniparticula de start sint de tip Nilsson. Pina acum nu se cunoaste nici o metoda practica de proiectare a momentului cinetic. Acest lucru este esential, deoarece masuratorile se fac in sistemul laboratorului. Modelul propus, construieste un set de stari proprii pentru j_2 si j_z , care depind continuu de deformarea dinamica si in plus au proprietatea esentiala: in limita sferica, acestea coincid cu functiile de model in paturi sferic, iar pentru deformari diferite de zero contin efectele fizice ale modelului Nilsson. Se spera ca aceasta lucrare va deschide o perspectiva frumoasa pentru descrierea riguroasa a nucleelor deformate. Primele rezultate la excitatiile de spin si la dezintegrarea beta dubla sunt deja publicate de reviste majore cum sunt Physical Review C si Nuclear Physics A.

G) Folosind forte tensoriale de tip Skyrme pentru nuclee finite, se investigheaza posibilitatea aparitiei izomerilor de densitate,

ca manifestare a procesului de "pionizare" (a se vedea lucrarea 19). Ca aplicatie este considerat cazul ^{12}C , pentru care se pune in evidenta un al doilea minim in energie reprezentata ca functie de densitatea nucleara. Acest minim descrie o situatie metastabila fiind situat la aproximativ 30 MeV de starea fundamentala si este determinat de acei termeni ai interactiei Skyrme ce se datoreaza schimbului virtual de pioni.

H) Unul din cele mai fascinante subiecte ale ultimilor ani este acela al dezintegrarii beta duble.

Intr-adevar, descrierea cantitativa a acestui fenomen poate constitui un raspuns la intrebarea: este neutrinul particula Majorana - sau Dirac ? Lucrarile recente de estimare a probabilitatii reduse de emisie in aproximatia RPA par sa reproduca rezultatele experimentale. In acest domeniu am fost primul care a estimat rata de dezintegrare in formalismul dezvoltarilor bozonice (43, 44). Deasemenea, intr-o alta lucrare, folosind tehnica proprie unui "model in paturi" nou (elaborat de mine intr-o lucrare recenta) am construit un formalism capabil sa descrie procesul intr-o maniera unificata pentru nucleele sferice si deformate.

Generalizand modelul Mozkowski pentru sisteme mixte de protoni si neutroni si permitand nucleonilor de acelasi fel sa interactioneze prin "pairing", a fost investigat fenomenul dezintegrarii

beta dubla. In particular am fost interesat sa explic mecanismul suprimarii amplitudinii de tranzitie pentru o anumita valoare a intensitatii interactiei biparticula in canalul p-p(paricle-particle), $g_{pp}=1$. Concluziile mele au fost urmatoarele: Pentru $g_{pp}=0$ amplitudinile partiale de tranzitie sunt distribuite asimetric fata de axa energiei in timp ce pentru $g_{pp}=1$ distributia este complet simetrica. Deasemenea se constata ca rezonanta Gamow-Teller gigant consta din trei stari cvasidegenerate, doua avand structura de stari de tip spin-flip si una de tip non-spin-flip. Una din starile de tip spin flip are un "strength" mare si pozitiv care este complet anulat de contributia starii cu structura non-spin-flip. Cealalta stare de tip spin-flip produce o amplitudine de tranzitie aproape nula. Deci anularea amplitudinii de tranzitie este cauzata de faptul ca contributia starii rezonante gigant cu structura de spin flip este anihilata de cea a starii non-spin-flip (a se vedea lucrarea (66)). Aceasta idee a fost preluata de alti specialisti ai domeniului si analizata pentru un model realist al miscarii uniparticula. Rezultatele lor confirma pe deplin valabilitatea celor obtinute de mine in modelul schematic mentionat mai sus.

Intr-o lucrare recenta, am reluat aceasta problema folosind functiile de unda uniparticula ale modelului nou in paturi pe care l-am descris mai sus. In acest caz am putut studia dependenta distributiei starilor RPA cu structura spin-flip si non-spin-flip, de deformarea nucleara. Pentru deformare mica, cele doua tipuri de stari sunt separate energetic. Pentru $g_{pp}=1$ exista doua stari care acumuleaza strength-ul tranzitiei. Una este chiar rezonanta gigant care are structura de spin-flip si este situata in jurul energiei de 14 MeV, iar alta de tip non-spin-flip situata in partea de jos a spectrului (4 MeV). Amplitudinile tranzitiilor prin intremediul celor doua stari au semne opuse si in consecinta se anuleaza reciproc. Pentru deformare mare starile de tip spin-flip si cele de tip non-spin-flip tind sa aibe aceiasi energie si amplitudinile asociate sa fie distribuite simetric. Competitia intre deformare si efectul de spin-flip a fost analizata deasemenea pentru tranzitiile beta simple, β^+ si β^- . Astfel se constata ca tranzitia β^+ are loc cu preferinta catre trei grupuri de stari ce realizeaza trei rezonante:una formata din stari de tip spin-flip si situata la energii mari (15 MeV),una compusa din stari de tip non-spin-flip si situata in jur de 5 MeV, iar a treia situata pe la 10 MeV si formata din stari cu structura mixta. Amplitudinile tranzitiei β^+ sunt foarte sensibile la cresterea deformarii. Si aici se constata o structura de rezonante dar distribuite diferit decat la tranzitia β^- . Aceste rezultate sunt descrise in extenso in lucrarea (79).

Recent a aparut in literatura ideia de a muta zeroul amplitudinii Gamow-Teller in zona nefizica pentru g_{pp} , renormalizand ecuatiile RPA cu termenii care fac ca media operatorului numar de cvasiparticule pe starea de vacuum RPA sa fie nenula. Acest lucru este posibil dar din pacate regula de suma Ikeda este violata cu 25%, ceea ce reflecta o drastica violare a Principiului de excluziune Pauli. Incercand sa remediez acest defect al teoriilor propuse am descoperit ca restaurarea Principiului Pauli deschide noi canale bozonice conducand la un nou mod colectiv de excitatie p-n (proton-neutron) dipolara. In felul acesta am obtinut o generalizare a aproximatiei RPA (care a rezistat 50 de ani fara a i se aduce vreo modificare de principiu) prin introducerea termenilor de "scattering" in constructia operatorului fononic. Cand ponderea acestor termeni noi devine dominanta se obtin stari RPA noi care pot absorbi din strength-ul tranzitiei Gamow-Teller. Deasemenea se aduc argumente calitative conform carora acest tratament selfconsistent conduce la o restaurare a regulii de suma Ikeda. Formalismul propus este inclus in lucrarea (79). Se scoteaza ca acest punct nou de vedere va genera un studiu intensiv al descrierii microscopice a proprietatilor electrice si magnetice ale nucleelor atomice unde sunt considerate numai excitatii de tip T=1.

Recent au fost obtinute date experimentale pentru unii izotopi par-pari ai Sn ale caror stari dublu fononice cvadrupolare pot fi populate atat prin dezintegrarea β^- cat si prin dezintegrarea β^+ a nucleelor impar-impare vecine (In si Sb). Aplicand formalismul dezvoltarilor bozonice elaborat pentru dezintegrarea beta dubla s-a obtinut, pentru prima data in literatura, o descriere realista a ratelor de dezintegrare (lucrurile 66,67) pentru aceste tranzitii beta simple.

Nucleele ce se dezintegreaza beta dublu au cel puțin una din paturile majore protonice și neutronice ale nucleonilor de valență deschisă și datorită acestui fapt sunt deformate cvadripolar. Cu toate acestea formalismele folosite pentru descrierea cantitativă a ratelor de dezintegrare se bazează pe funcții de undă uniparticulare cu simetrie sferică. Evident distribuțiile nivelelor energetice pentru o bază de funcții sferice și deformate sunt esențial diferite ceea ce implică existența unor proprietăți de imperechere diferite. Se așteaptă efecte importante determinate de diferențele menționate mai sus. Folosirea unei baze de funcții deformate de tip Nilsson sau Woods-Saxon este dificilă în sine. În plus funcțiile de undă finale rezultate în urma unui tratament de tip pnQRPA nu vor avea moment cinetic determinat, restaurarea simetriei la rotații constituind un obstacol deosebit de dificil. Pentru evitarea acestor deficiențe în urma cu 10 ani am construit o bază de funcții deformate dar cu proprietăți la rotații cu similitudine cu cele ale funcțiilor de moment cinetic determinat. Funcțiile sunt obținute printr-un procedeu de proiectie a componentelor cu moment cinetic total determinat dintr-o funcție produs, un factor descriind o stare de model în paturi sferice iar celălalt factor fiind o funcție coerentă deformată cvadripolar. Deși funcția rezultată descrie, în principiu, un sistem de particula-miez ea poate fi folosită pentru descrierea proprietăților de tip particula. Într-adevăr în calcularea elementelor de matrice pentru operatorii de tranziție de tip particula, componentele ce se referă la miezul colectiv se ortogonalizează, în final elementul de matrice exprimându-se ca un produs de doi factori unul fiind elementul de matrice corespunzător funcției de model în paturi sferice iar celălalt fiind un factor ce depinde de deformarea nucleară. S-a construit un sistem de funcții uni-particulare ortonormat cu funcțiile proiectate și un Hamiltonian efectiv care este cvasi-diagonal în această bază. Modelul obținut a fost numit “un nou model în paturi” și are proprietatea remarcabilă că face posibilă descrierea unificată (cu o bază unică de funcții de undă uni-particulare) a nucleelor sferice și a nucleelor deformate. Într-adevăr în limita sferică (deformarea tinde către zero) se obține modelul în paturi sferice iar pentru deformare nucleară diferită de zero energiile modelului Nilsson sunt foarte bine simulate. Avantajul modelului constă în faptul că funcția “many body” obținută prin formalismul pnQRPA are moment cinetic bine determinat și deci nu necesită o proiectie a momentului cinetic. Această bază de funcții a fost folosită pentru descrierea procesului de dezintegrare beta dublă pentru 18 nuclee emitatoare [114,122]: Este prima dată când în literatură se fac calcule complexe în care nucleele mamă și cele fiică sunt descrise de funcții uniparticulare de deformări diferite. În setul de nuclee specificat mai sus și setul nucleelor fiică corespunzătoare se găsesc cazuri în care formele nucleelor mamă și fiică sunt diferite: sferic deformat-prolate, sferic deformat-oblate, deformat-prolate deformat-oblate, etc. Hamiltonianul many body folosit constă într-un termen de câmp mediu ce definește setul de funcții uniparticulare descris mai sus, un termen de imperechere proton-proton plus neutron-neutron și o interacție dipolară proton-neutron de tip Gamow-Teller. Aceasta din urmă este considerată atât în canalul ph (particle-hole) cât și în canalul pp (particle-particle). Au fost calculate următoarele observabile: a) timpii de viață pentru nucleele mamă, la dezintegrarea beta dublă. b) distribuțiile strength-urilor dezintegrărilor beta simple minus, și plus. d) a fost testat efectul de saturare la creșterea stărilor de două cvasiparticule incluse în calcul pentru cazul izotopului de ^{48}Ca . e) a fost testată ipoteza SSD (single state dominance) pentru nucleele cărora le corespund nuclee impar-impare intermediare având starea 1^+ ca stare fundamentală. De remarcat că în toate cazurile considerate regula de sumă Ikeda este satisfăcută atât pentru nucleul mamă cât și pentru nucleul fiică. Rezultatele teoretice obținute au fost comparate atât cu datele experimentale cât și cu *predicțiile altor formalisme teoretice. Acordul cu experiența este foarte bun.*

I) Originea clasică a formalismelor de tip many body, BCS, RPA, dezvoltări bozonice, a fost demonstrată în Ref.[28].

Toate ecuațiile dinamice obținute în formalismele menționate mai sus au fost obținute în spațiul clasic al coordonatelor de fază. Au fost descrise mai multe procedee de cuantificare a traiectoriilor clasice. Prin cuantificare, se obțin reprezentări bozonice pentru algebra de cvasispin. În plus, faza de

reprezentările cunoscute, Holstein-Primakoff și Dyson, a fost găsită o dezvoltare bozonica nouă care se dovedește a fi utilă pentru studiul Hamiltonienilor anarmonici.

J) Descrierea fenomenului de clusterizare de tip alfa în nuclee grele [48].

Folosind un formalism semiclassical pentru un sistem eterogen, constrând în nucleoni și particule alfa, am pus în evidență o stare fundamentală ce conține pe lângă nucleoni și perechi de nucleoni, particule alfa. Prin studiul micilor oscilații în jurul acestei stări statice s-a pus în evidență un fapt necunoscut până acum, anume că prezenta particulelor alfa favorizează fenomenele colective.

Modelul a fost folosit (47) pentru descrierea unor proprietăți spectroscopice ale nucleelor din zona ${}^A\text{Ra}$, ${}^A\text{Rn}$, ce erau neexplicabile prin alte teorii.

Descrierea de tip RPA a sistemului eterogen permite calculul riguros al energiei de zero, corespunzătoare oscilațiilor particulelor alfa în nucleu, marime ce a fost folosită în mod empiric (până acum) pentru descrierea datelor experimentale privind dezintegrarea alfa.

K) Investigarea semiclassicală a excitațiilor de spin în nuclee.

Într-un formalism semiclassical se studiază interacția particulei miez. În anumite condiții mișcarea gradului de libertate de spin se decuplează și în consecință apare o vibrație de spin analoagă undelor de spin ce descriu sistemele de spin plasate într-un câmp magnetic. Această excitație elementară este responsabilă, pentru un sistem "many body", de excitațiile colective de tip spin-flip. Se arată că așa cum ruperea spontană a simetriei la rotație conduce la benzi de rotație, ruperea spontană a simetriei de paritate spațială conduce la o mișcare de wobbling a spinului particulei în jurul unei stări yrast a miezului. Lucrarea a primit un referat magistral de elogios din partea lui W. Greiner și a apărut în *Int. Jour. Mod. Phys. E*, vol. 2, No. 3, p 629.

L) Studiul nucleelor cu deformare statică octupolară.

În acest domeniu am obținut următoarele rezultate originale. Într-o primă publicație (lucrările 75,76) am descris benzile rotaționale cu $K^\pi = 0^-, 1^-, 2^-$ ca fiind generate prin excitația benzilor de paritate pozitivă, fundamentală, beta și gamma cu un fonon octupolar, respectiv. În felul acesta a fost posibilă descrierea a 6 benzi rotaționale, trei de paritate pozitivă și trei de paritate negativă. Am făcut aplicații la izotopii ${}^{218,220,226}\text{Ra}$, pentru care există date experimentale atât pentru energii cât și pentru tranzițiile E1. S-a obținut o descriere cantitativă bună atât a energiilor cât și a tranzițiilor E1. Totuși există două puncte slabe ale modelului, anume nu este descrisă poziția joasă a stării 1^+ pentru ${}^{218,220}\text{Ra}$. Într-adevăr pentru aceste nuclee, care sunt aproape vibraționale în deformarea cvadrupolară, starea 1^+ este descrisă de o excitație dublu fononică cvadrupolar-octupolară și ca urmare este situată energetic deasupra stării 3^+ . De asemenea, pentru descrierea tranzițiilor E1 a fost nevoie de folosirea unui operator de tranziție cu structură complexă. Pentru înlăturarea acestor deficiențe am elaborat un model nou care reprezintă o generalizare a modelului CSM în următorul sens (lucrările 78,79). Aici starea de incercare pentru starea fundamentală în sistemul intrinsec este un produs de funcții coerente pentru bozoni cvadrupolari și octupolari, respectiv. Deci starea fundamentală prezintă atât deformare cvadrupolară cât și octupolară. În plus nu este stare proprie a operatorului paritate. Prin proiecția parității și a momentului cinetic din starea fundamentală și din alte trei stări deformate, mutual ortogonale și ortogonale pe starea fundamentală se obțin patru benzi rotaționale de paritate pozitivă și patru de paritate negativă. Este interesant de remarcat că aceste perechi de benzi prezintă o structură de dublet în zona deformațiilor cvadrupolare mici. De asemenea, două dintre cele opt benzi sunt dipolare, una de paritate pozitivă și cealaltă de paritate negativă. S-a demonstrat

ca starile uneia dintre benzi (de paritate pozitiva) sunt de natura magnetica in timp ce banda partener este de natura electrica. Din punct de vedere filozofic, pare extrem de interesant faptul ca restaurarea simetriei la reflexia spatiala conduce la separarea proprietatilor magnetice de cele electrice. Pentru inceput am fost interesat de descrierea cantitativa a benzii fundamentala si 0^+ . De aceasta data pozitia relativa a starilor 1^- si 3^- a fost reprodusa. Mai mult, pentru descrierea tranzitiilor E1 a fost folosita o expresie extrem de simpla pentru operatorul de tranzitie. Este remarcabil ca folosind un numar relativ mic de parametri de fit se obtine un acord foarte bun cu experienta atat pentru banda fundamentala cat si pentru 0^+ , pana la stari de spin foarte inalt (30^+ , 31^-). Pentru a sublinia performanta modelului mentionez ca IBA (Interacting Boson Approximation) reuseste sa descrie, in urma mai multor imbunatatiri sofisticate, numai starile pana la 17^- , in timp ce in modelul propus de mine descrierea cantitativa este foarte buna pana la spin foarte inalt, 30^{\pm} .

M) Studiul semiclassical al hamiltonienilor bosonici; comportare regulata si haotica [65,69].

Folosind un principiu variational dependent de timp, un Hamiltonian bozonic de ordinul patru este decuantificat, folosind ca functie variationala o functie coerenta cu doi parametri complexi. Functia energie clasica are doua grade de libertate. Ecuatiile Hamilton sunt puternic neliniare. Liniarizandu-le in jurul unui punct de minim pentru functia energie se obtin ecuatii de tip RPA pentru coordonatele bozonice, avand doua solutii. O solutie corespunde vibratiilor de tip beta a materiei nucleare in timp ce cealalta solutie descrie o oscilatie de tip gama. De mentionat faptul ca pentru prima data in literatura, lucrarile mele trateaza Hamiltonienii bozonici prin tehnici "many body" care au fost folosite, pana acum, exclusiv pentru descrierea comportarii sistemelor multi-fermionice. Sunt propuse maai multe metode de cuantificare a traiectoriilor clasice. Intr-una din variante se obtine, ca un caz particular, modelul cuplajului vibratie-rotatie propus de Faessler su Greiner. Facand analiza transformatei Fourier a densitatii de actiune se constata ca exista anumite structuri discrete care corespund energiilor cuantice. Acest procedeu nu depinde de marimea amplitudinilor miscarii colective. Se poate spune ca in felul acesta s-a pus in evidenta un procedeu de cuantificare a miscarii colective de amplitudine mare. Pentru anumite valori ale parametrilor Hamiltonianului model, sistemul clasic nu mai este integrabil. Intr-adevar se identifica un parametru de ordine, coeficientul B al termenului cubic in bozoni, care caracterizeaza tranzitia intre situatia in care sistemul este integrabil ($B=0$) si faza in care sistemul poate avea comportare haotica ($B \neq 0$). Comportarea regulata sau haotica a sistemului clasic a fost studiata prin calcularea atat a sectiunilor Poincare cat si a exponentilor maximali de tip Lyapunov. Dependenta haosului de fazele nucleare (sferic, deformat-prolate si deformat-oblate) a fost studiata explicit. Corespondenta intre haosul clasic si cel cuantic a fost studiata urmarindu-se devierea de la distributia Wigner sau Poisson a nivelelor de energie asociate Hamiltonianului cuantic.

N) Renormarea completa a ecuatiilor pnQRPA [79,92,94,123].

Renormarea ecuatiilor pnQRPA prezinta o serie de avantaje fata de ecuatiile standard pnQRPA: i) considera termeni suplimentari din interactia bi-cvasiparticula ii) amplitudinea tranzitiei Gamow-Teller beta dubla nu se mai anuleaza in domeniul fizic al intensitatii interactiei bi-particula in canalul pp (particle-particle), gpp. iii) raportul intre amplitudinea "backward" si "forward going" pentru operatorul fononic este mai mic decat cel ce corespunde fononului pnQRPA standard. Aceasta implica faptul ca aproximatia este imbunatatita. Recent am observat ca in ciuda acestor avantaje, regula de suma Ikeda (aceasta regula de suma afirma ca diferenta intre strength-ul total al dezintegrarii beta minus si cel al dezintegrarii beta plus pentru nucleul mama implicat in dezintegrarea beta dubla, este egala cu $N-Z$) este drastic violata, ceea ce reflecta o violare a Principiului lui Pauli intr-o mai mare masura decat in cazul standard. In plus, corelatiile ce nu sunt

introduse in aproximatia standard, sunt introduse fara satisfacerea unui criteriu de ierarhizare a contributiilor superioare celor din RPA. O tratare consistenta impune considerarea comutatorilor nenuli pentru operatorii dipolari de imprastiere. Acest lucru atrage dupa sine aparitia de noi coordonate bozonice si in final apare posibilitatea definirii unui operator fononic ce contine termeni de imprastiere. Ecuatiile rezultante sunt neliniare si in consecinta procedeul de rezolvare este cel iterativ. Numarul solutiilor in acest caz este dublu fata de cel al ecuatiilor pnQRPA standard si renormate. Printre aceste solutii se afla si o solutie colectiva care este plasata sub diferenta minima de energii de cvasiparticule proton-neutronice. Aceasta stare nucleara noua nu este un artifact al tehnicii propuse, ci o stare reala. Intr-adevar ea a fost identificata si in calculul exact al valorilor proprii pentru Hamiltonianul ce descrie ansamblul de cvasiparticule. Calculand amplitudinea tranzitiei Gamow-Teller beta dubla in aceasta reprezentare noua se obtine, datorita starii nucleare noi, o anulare pentru o valoare a intensitatii g_{pp} mai mica decat cea din aproximatia RPA standard. Regula de suma Ikeda este restaurata intr-o masura foarte mare. Se pare ca aceasta lucrare prezinta o cale eficienta de a trata in mod unitar corelatiile de tip ph (particle-hole) si pp (particle-particle). De mentionat ca aproximatia RPA este folosita in fizica nucleara de aproape 50 de ani. Formalismul propus de noi este prima corectie fundamentala a acestei metode folosita in tratamentele sistemelor "many body". In lucrarea [94] din lista de lucrari, termenii de imprastiere sunt tratati separat, deci se presupune ca acestia sunt decuplati de termenii din Hamiltonian responsabili de modurile normale standard. Hamiltonianul rezultat prin aceasta decuplare este de tip rotator triaxial pentru operatorii de izospin in reprezentarea de cvasiparticula. Acest Hamiltonian a fost tratat semiclassical, decuantificarea facandu-se prin mediere pe o stare coerenta pentru grupul SU(2) generat de operatorii de cvasispin. Ecuatiile de miscare cuantice devin ecuatii de miscare clasice ale unor variabile ce definesc spatiul fazic clasic. Aceste ecuatii sunt liniarizate si dupa aceea integrate. Miscarea armonica este ulterior cuantificata, in felul acesta obtinandu-se rezultatele specifice aproximatiei pnQRPA. Modul normal definit in felul acesta are o interpretare simpla anume, reprezinta miscarea de wobbling a izospinului. Este interesant ca desi interactia de tip particle-particle este atractiva, energia modului colectiv pus in evidenta creste cu taria acestei interactii intr-un interval foarte larg, atinge un maxim si dupa aceea scade atingand valoare zero pentru valori foarte mari ale interactiei atractive.

In lucrarea [123], ne-am pus problema sa construim un formalism pnQRPA complet renormat care sa satisfaca regula de suma Ikeda. Pentru aceasta a trebuit sa restauram simetria la gauge pentru operatorul fononic renormat. In final se obtin doua seturi de ecuatii pnQRPA complet renormate care descriu excitatii de tip ph (particle-hole) respectiv deuteron ale sistemului initial (N,Z). Ambele seturi de ecuatii sunt formal de tip Tamm-Dancoff. Pentru starile de excitatie de tip ph, regula de suma Ikeda sunt satisfacute exact cu conditia ca si ecuatiile BCS sa fie renormate. De remarcat faptul ca desi aparent noul fonon particula-gaura este de tip Tamm-Dancoff, am demonstrat ca el poate fi considerat ca un operator fononic extins in spatiul de dimensiune $2N \times 2N$ unde N noteaza numarul de configuratii ph care pot fi cupate la moment cinetic total egal cu 1. In partea doua a lucrarii se reuseste sa se defineasca doi operatori renormabili care comuta exact cu partea din operatorul fononic ce conserva numarul total de particule. Cu ajutorul celor doua perechi de operatori renormabili se defineste un operator fononic de structura complexa ce poate descrie simultan excitatii dipolare de tip proton-neutron in sistemele nucleare (N-1,Z+1),(N+1,Z-1), (N+1,Z+1), (N-1,Z-1). Recent au fost efectuate calcule numerice realiste pentru 14 nuclee considerate a fi emitatoare double beta. Se obtine un acord bun cu datele experimentale existente privind timpii de viata. De asemenea regula de suma Ikeda este satisfacuta[153].

O) O metoda noua de descriere a clusterilor metalici deformati [81,95].

Clusterii atomici sunt ansamble stabile de mai multi atomi identici caracterizate de distante interatomice mai mari decat cele specifice moleculelor. Atomii componenti ai clusterilor ocupa stari cuantice organizate energetic in structura de paturi. O alta caracteristica a acestor clusteri

consta in aceea ca proprietatile sale sunt dominant determinate de ultimii electroni de valenta, deci am putea sa modelam sistemul a N atomi intr-un cluster prin miscarea a N electroni, fiecare dintre acestia reprezentand unul dintre atomi. Procese fizice ca fisiunea clusterilor, rezonantele gigant, tranzitiile de tip E1, E2 si E3 au fost studiate atat experimental cat si teoretic. Relativ recent a fost propus, de catre Clemenger, un model pentru descrierea clusterilor deformati. Acest model corespunde modelului in paturi deformat propus in fizica nucleara de G. Nilsson. Folosirea functiilor de unda furnizate de modelul Clemenger pentru tratarea clusterilor conduce la o stare "many body deformata" deci stările descrise nu au moment cinetic determinat. In plus tranzitiile de o anumita multipolaritate nu pot fi tratate cu acuratete. Pentru eliminarea acestei deficiente am propus folosirea "noului model in paturi" prezentat mai sus prin eliminarea componentei de spin. In felul acesta clusterii atomici sferici si deformati pot fi tratati in mod unitar. In plus folosind functii uniparticulare de moment cinetic dat se asteapta evidentierea de proprietati noi ale clusterilor metalici. Aceste idei au fost concretizate in lucrarea [81] si am avut satisfactia sa obtinem predictii teoretice pentru formele de echilibru a 5 clusteri atomici de Na, care difera de cele obtinute anterior prin alte modele teoretice dar care sunt confirmate experimental. Lucrarea a aparut in Phys. Rev. B si are deja un ecou pozitiv pentru specialistii din domeniu, In ref [95] au fost calculate energiile excitatiilor dipolare, polarizabilitatile precum si densitatile de sarcina ca functie de coordonatele spatiale. Sunt puse in evidenta structuri de sub-clusteri pentru anumiti clusteri. De asemenea o extindere spatiala similara cu structura de halo din nucleul ^{11}Li este pusa in evidenta pentru clusterii de Na cu un 41 componente. In lucrarea [141] au fost calculate excitatiile dipolare colective in clusterii de sodiu usori si medii. Comparatia cu experienta efectuata in termeni de sectiuni eficace de fotoabsorbție evidentiaza un acord foarte bun. Este remarcabil faptul ca in afara de excitatiile colective de suprafata au fost puse in evidenta excitatii de volum situate in jurul energiei de 6 eV. Formalismul teoretic folosit este acela al aproximatiei RPA particula-gaura cu o baza de functii uniparticulare proiectata dintr-un set de functii deformate. Folosind functiile de unda RPA s-a elaborat un procedeu de calcul al numarului de electroni spilled-out, acesta fiind folosit mai departe in calculul polarizabilitatilor. Se obtine, de asemenea, un acord cu experienta foarte bun. In [141], proprietatile colective ale clusterilor de Na sunt descrise in formalismul RPA folosind ca baza de functii uni-particula baza introdusa de subsemnatul ca baza proiectata dintr-o baza deformata. Sunt descrise realist datele existente atat asupra excitatiilor de suprafata cat si cele privind excitatiile de volum.

P) Fenomene noi in sisteme nucleonice cu interactie de imperechere proton-neutron [90,91,93]

Dupa cum am mentionat mai inainte amplitudinea de tranzitie dublu beta se anuleaza pentru o anumita valoare a parametrului de interactie. Aceasta valoare este foarte apropiata atat de valoarea care fiteaza datele experimentale privind rata de dezintegrare cat si de valoare critica pentru care aproximatiia RPA numai functioneaza. Toate incercarile de a imbunatati aproximatiia RPA prin shiftarea punctului punctului de anulare a amplitudinei in zona nefizica au condus, fara exceptie, la o violare drastica a regulii de suma N-Z. In lucrarea [90] se avanseaza ideea complet noua ca aceasta comportare anomala a solutiei RPA se datoreaza faptului ca interactia biparticula de tip particula-particula (pp) este tratata la nivelul RPA fara sa fie inclusa in campul mediu. In lucrarea [90], folosind o tratare variationala dependenta de timp, se gaseste un formalism nou care functioneaza pentru o tarie a interactiei mai mare decat valoare critica unde tratamentul standard inceteaza de a mai fi valabil. In aceasta noua teorie, regula de suma N-Z este satisfacuta in procent de peste 90%. Formalismul nou descrie oscilatiile mici ale sistemului nucleonic in jurul unei stari statice de echilibru "deformate". Aceasta este o faza nucleara noua, complet diferita de cea descrisa de formalismul RPA standard, unde starea de echilibru este cu simetrie "sferica". In lucrarea [91] se arata ca o tratare consistenta a campului mediu si a interactiei reziduale conduce la o stare fundamentala stabila care nu colapseaza. Intr-adevar, energia primei stari excitate este functie

crescatoare de taria interactiei, deci nu se anuleaza pentru o anumita valoare a interactiei. In felul acesta s-a obtinut o tratare consistenta a corelatiilor de imperechere proton-neutron si o descriere realista a vibratiilor generalizate de pairing. Trebuie mentionat ca este prima teorie pentru vibratiile de pairing care include interactia de imperechere proton-neutron. Sunt observabile fizice care sunt foarte sensibile la variatii mici ale numarului de particule si ale izospinului. Un exemplu in acest sens este dezintegrarea beta. In acest context este important ca din functia generalizata BCS sa se proiecteze simultan numarul total de particule si izospinul. Acest lucru este realizat analitic in lucrarea [93]. Modelul este testat pe un Hamiltonian solubil. Este extrem de important ca solutiile obtinute pentru functii proiectate sunt foarte apropiate de cele exacte. De mentionat ca este prima lucrare in literatura capabila sa realizeze proiectia simultana a celor doua numere cuantice. In viitorul apropiat voi formula o teorie cu 'variation after projection' care va fi folosita pentru tratarea realista a sistemelor proton-neutronic.

Folosind o functie BCS generalizata pentru starea fundamentala s-a obtinut o descriere cantitativa a rezonantelor simplu si dublu analoage in patura $f7/2$ pentru izotopii par-pari si par-impairi ai Ti. Aceste stari au fost obtinute prin proiectia izospinului si numarului total de nucleoni din functia BCS generalizata pentru sisteme pare si impare, respectiv [114].

R) Rezultate noi in descrierea gradelor de libertate de izospin

In lucrarea [94] se arata ca includerea termenilor de imprastiere in expresia operatorului fononic QRPA este complet echivalenta cu descrierea miscarii de wobbling a izospinului. Dependenta regulilor de suma Ikeda (NEWSR) si "Energy weighted sum rule" (EWSR) de interactiile de imperechere $T=0$ si $T=1$ este analizata in detaliu in lucrarea [109]. Expresii analitice ale probabilitatilor de tranzitie Gamow-Teller ca functie de numarul de perechi proton-neutron cu $T=0$ si $T=1$ sunt obtinute pentru prima data in literatura. Structura starilor dipolar magnetice de tip scissors este analizata pentru tranzitii care nu conserva izospinul [112]. Tranzitiile $T \rightarrow T+1$ se deosebesc esential de tranzitiile magnetic orbitale care conserva izospinul $T \rightarrow T$. Mai mult in cazul ^{22}Ne , acest mod este insensibil la variatia strength-ului interactiilor de imperechere si QQ. Acest nou mod colectiv se datoreaza fluctuatiilor izospinului in campul mediu. Mai concret, energiile uniparticulare protonice si neutronic sunt diferite datorita interactiei Coulombiene si a diferentei intre momentele magnetice ale protonului si neutronului. Aceste diferente conduc la violarea invariantei de sarcina ceea ce determina un mod de vibratie la nivel de camp mediu.

S) Simetrii noi ale sistemelor nucleonice.

Este bine cunoscut faptul ca modelul picaturii de lichid a jucat un rol important in dezvoltarea modelelor teoretice de structura nucleara. In sistemul intrinsec picatura de lichid este descrisa de 5 coordonate, doua de vibratie, deformatiile dinamice beta si gama, si trei rotationale, unghiurile Euler. In lucrarea [104] au fost formulate trei modele solubile in care miscarea gradelor de libertate intrinseci sunt descrise prin reprezentarile ireductibile ale unui grup $SU(2)$ ce actioneaza intr-un spatiu fictiv. Astfel intregul sistem nuclear este descris grupal cu ajutorul grupului $SU(2) \times SU(2)$. Aceste descrieri fac posibila obtinerea de formule pentru energii, foarte simple. De asemenea se obtine o noua clasificare a starilor nucleare in benzi rotationale diferita de cea traditionala emisa de Bohr si Mottelson. In noua viziune capetele de banda, din definitia Bohr-Mottelson formeaza la randul lor o banda rotatională. Acest concept nou este testat cu un rezultat extrem de favorabil pe mai multe nuclee.

SS) Metode noi de cuantificare a sistemelor cu constrangeri[121,127,128]

Sistemele cu constrangeri holonome sunt clasificate in formalismul Hamiltonian , drept sisteme cu constrangeri de clasa II. In Ref.[121, 127] am aratat ca orice sistem de particule punctiforme cu constrangeri holonome are o simetrie de gauge ascunsa care permite cuantificarea sa in spatiul fazic original, ca sistem cu constrangeri de clasa I. Metoda a fost ilustrata prin cuantificare miscarii unei particule pe o sfera (n-1)-dimensionala. De asemenea a fost considerat analogul sau din teoria campului, modelul sigma $O(n)$ neliniar.

Deformarea cuantica a parantezei Poisson este paranteza Moyal. In Ref. [128] am construit deformarea cuantica a parantezei Dirac pentru sisteme care admit baze simplectice globale pentru functiile de tip constrangere. Echivalent se poate spune ca am extins parantezele Moyal pentru sisteme cu constrangeri de clasa II precum si la sisteme gauge invariante care devin de clasa II prin impunerea conditiilor de fixare de gauge.

T) Proprietati monopolare ale distributiei de sarcina in nuclee [142].

Folosind modelul GCSM propus de A. A. Raduta, s-a studiat influenta deformarii si a momentului unghiular asupra distributiei de sarcina in nuclee. Tranzitiile electrice monopolare $E0, 0+_{g \rightarrow 0+_{\beta}}$, au fost calculate pentru 10 nuclee. Desi nu se foloseste niciun parametru ajustabil, acordul cu experienta este foarte bun. In calculele noastre nu se folosesc sarcini efective pentru protoni si neutroni. Astfel, efectele de polarizare ce ar induce o sarcina efectiva nenula pentru neutroni se neglijeaza.

TT) Tranzii de faza in nuclee finite in cadrul unui model solubil

Tranzitiile de faza intre simetriile $U(5) \rightarrow O(6)$ si $U(5) \rightarrow SU(3)$ se realizeaza prin trecerea prin puncte critice care corespund, la randul lor, la alte simetrii anume $E(5)$ si respectiv $X(5)$. In cazul simetriei $X(5)$ functiile de unda in variabila γ nu sunt periodice si sunt normate la unitate pe un interval nemarginit. Modelul propus de Iachello pentru aceasta simetrie nu foloseste deci functii periodice, iar produsele scalare sunt definite in raport cu o masura de integrare care este diferita de cea folosita de modelul picaturii de lichid, model ce sta la baza modelului schematic $X(5)$. In plus, Hamiltonianul in variabila γ nu este hermitic fata de masura corecta. In lucrarile noastre, aceste neajunsuri sunt inlaturate. Hamiltonianul ce corespunde variabilei γ este un operator diferential care admite drept functii proprii, functiile sferoidale de tip prolate, functii ce sunt periodice si normate fata de masura folosita de modelul picatura. Am demonstrat riguros faptul ca asimptotic modelul propus de noi reproduce modelul $X(5)$. Calculele numerice pentru nucleele $Sm152, Nd150, Gd154$ si $Os192$ evidentiaza un acord bun cu datele experimentale atat in ceea ce priveste spectrul de excitatie in benzile fundamentala, β si γ , cat si in privinta tranzitiilor $E2$ in banda si intre benzi[133,144]. In lucrarea [120] am avansat ideea ca intr-un sistem nuclear, tranzitia de faza depinde de starea nucleara. In modelul formulat se presupune ca pentru stari cu $J < 4$, potentialul nuclear este de tip $SU(5)$ in timp ce pentru stari cu moment cinetic mai mare decat 4, stari satisfac simetria $E(5)$. Calculele numerice efectuate pentru $Gd152$ si $Ru104$ au condus la un acord remarcabil cu datele experimentale. Tranzitia de faza de la simetria $SU(5)$ la simetria $SU(3)$ a fost studiata in cadrul modelului CSM (coherent state model), propus de A.A.Raduta in 1981. Punctul critic al acestei tranzitii se realizeaza pentru $Gd154$. Acordul foarte bun cu experienta confirma inca odata faptul ca modelul CSM este capabil sa descrie in mod realist, cu un singur Hamiltonian, simetrii diferite si tranzitia de faza intre acestea. O contributie importanta la acest domeniu a fost realizata in [151] unde nucleele triaxiale sunt descrise cu o ecuatie diferentiala

pentru un potential sextic cu bariera de potential in variabila beta si o ecuatie diferentiala satisfacuta de functia Mathieu pentru variabila gama. Se obtine un acord foarte bun cu experienta atat pentru energii cat si pentru probabilitati de tranzitie.

U. Hamiltonieni bozonici cvadрупolari anarmonici, complet solubili [105,126,138,143]

Intr-o serie de lucrari recente am inceput studiul Hamiltonienilor bozonici anarmonici, complet solubili. Acestia au fost studiatii atat semiclassical cat si cuantic. Prin decuantificarea Hamiltonienilor alesi, se obtin ecuatiile clasice de miscare de tip Hamilton. Numarul gradelor de libertate pentru Hamiltonienii alesi, este egal cu numarul constantelor de miscare. Din aceasta cauza Hamiltonienii sunt complet solubili. Solutiile clasice sunt functii eliptice periodice. Aceste traiectorii sunt cuantificate prin restrictia standard asupra actiunii clasice. In lucrarea [126], potentialul clasic obtinut prezinta doua minime dintre care unul corespunde la o suprafata nucleara sferica. Traiectoriile in cele doua gropi de potential au proprietati specifice. Cand energia traiectoriei se apropie de varful barierei de potential perioada miscarii tinde catre infinit. Acesta, de fapt, este un exemplu excelent de tranzitie de faza ce are loc intr-o stare excitata, rezultat ce confirma ipoteza lansata intr-o lucrare anterioara conform careia tranzitia de faza depinde de stare. Un alt Hamiltonian de ordinul 6 in bozoni, conduce, prin tratamentul semi-clasic, la o formula analitica pentru energii, ce implica 4 parametri liberi. In tratarea cuantica acest Hamiltonian admite functii si valori proprii exprimabile analitic. Aceste formule contin de asemenea 4 parametri liberi ce sunt fixati prin fitarea a 4 energii particulare. Aceste expresii analitice pentru energiile de excitatie, au fost folosite pentru explicarea energiilor starilor 0^+ si 2^+ . Cazul cel mai interesant pare sa fie acela al Er168, unde sunt cunoscute datele experimentale a 105 stari cu momentele cinetice $0(26)$ si $2(79)$. Este remarcabil ca pentru toate nivelele s-a obtinut o descriere cantitativa foarte buna.

UU. Descrierea analitica a modelului CSM in regiunile aproape sferice si deformate.

In [149], energiile benzii fundamentala sunt descrise analitic printr-o formula compacta ce generalizeaza celebra formula Holmberg-Lipas. Aceasta formula se obtine semiclassical prin cuantificarea energiei clasice asociata unui Hamiltonian bosonic cvadрупolar cvadratic. Mai mult folosind simetria la rotatii energia potentiala clasica se transforma in potential de tip Davidson. Procedura a fost extinsa la modelul CSM in cele doua situatii extreme mentionate. Sunt obtinute formule analitice atat pentru energiile benzilor fundamentala, beta si gamma cat si pentru tranzitiile de tip E2 legand aceste stari. Aplicatiile numerice la 44 nuclee, apartinand la diferite faze nucleare, arata un acord foarte bun cu experienta.

V. Un nou model pentru descrierea fenomenului de backbending [152].

Fenomenul de backbending se manifesta prin intreruperea caracterului crescator al spatierii energetice a nivelelor yrast, ceea ce are drept consecinta cresterea momentului de inertie corespunzator printr-un salt. Cauza acestui salt il constituie ruperea unei perechi neutronice, pentru primul backbending, si a unei perechi protonice in cazul celui de al doilea backbending. In referinta citata, am folosit un Hamiltonian particula-miez ce descrie un sistem de nucleoni ce se misca intr-un camp mediu deformat, acestia intreractionand intre ei prin forte de imperechere si cu miezul printr-o interactie de tip qQ si spin-spin. Miezul este descris printr-o functie coerenta axial simetrica. Partea dificila a formalismului propus se refera la proiectia momentului cinetic din functia produs

particula miez ambii factori fiind deformati. Daca se reprezinta momentul de inertie ca functie de patratul frecventei de rotatie, pentru nuclee ce prezinta fenomenul de backbending se obtine o curba in forma de S. Formalismul a fost aplicat la 6 nuclee, pentru care s-a obtinut un acord excelent cu experienta. Recent formalismul a fost extins la nuclee care prezinta al doilea backbending.

Al doilea backbending este generat de o banda de 4 cvasiparticule doua neutronice si doua protonice, produse de ruperea a doua perechi, una neutronica si una protonica. Aplicatiile pentru 4 nuclee din regiunea pamanturilor rare pun in evidenta un acord foarte bun cu datele experimentale.

VV. Competitia intre comportarile clasice si cuantice in modelul CSM [157].

Modelul CSM descrie banda fundamentala prin proiectia momentului cinetic dintr-o functie coerenta, cu simetrie axiala. Functia neproiectata este asociata sistemului nuclear in sistemul de referinta intrinsec. Aceasta descrie o comportare clasica intrucat relatiile de incertitudine realizeaza valoarea minima pentru produsul dispersiilor perechii de coordonate conjugate. Prin restaurarea simetriilor la rotatie si de gauge se favorizeaza comportarea cuantica. Masura departarii de la comportarea clasica este de fapt devierea de la valoarea limita pentru produsul dispersiilor. In studiul nostru am considerat doua perechi ce variabile conjugate: a) coordonata cvadрупolara si impulsul conjugat b) numarul de bosoni cvadрупolari si faza conjugata. Concluzia la care am ajuns este ca in competitia intre comportarea clasica si cea cuantica, deformarea nucleara joaca un rol determinant. Daca la deformari mici comportarea cuantica prevaleaza, la deformari mari aspectele clasice devint dominante.

W. Simetrii chirale in nuclee par-pare, medii si grele [165]

In ultimele decade ale secolului trecut starile colective de tip scissors au fost intens studiate de mute grupuri de teoreticieni din intreaga lume. Interpretarea fenomenologica a acestor stari este aceea ca descriu miscarea unghiultra in antifaza a axelor de simetrie a doi elipsoizi asociati sistemelor de protoni si respectiv neutroni. Aceste stari sunt populate prin excitarea starii fundamentale in experiente de ciocnire inelastica de electroni pe nucleu, la unghiuri inapoi. Probabilitatea redusa de tranzitie este de ordinul a 2 magnetoni patrati starile fiind plasate in jurul energiei de 3 MeV. Caracterul colectiv al starii magnetice este atestat de observatia experimentală potrivit careia strength-ul total ce caracterizeaza modul M1 de tip scissors este proportional cu patratul deformarii nucleare. Din aceasta cauza s-a considerat mult timp ca starile dipolare magnetice apar numai in nuclee deformate. In jurul anilor 2000 Stefan Frauendorf arata ca exista benzi caracterizate de tranzitii M1 intense, care apar in nuclee aproape sferice datorate dependentei momentului de inertie de momentul cinetic. Modelul imaginat de el caracterizeaza anumite nuclee impar-impare in care doi nucleoni, un proton ce se misca intr-un orbital prolate si un neutron care se misca intr-un orbital oblate interactioneaza cu un miez triaxial care se rotește in jurul axei minime, momentul cinetic fiind perpendicular pe planul momentelor cinetice asociate celor doi nucleoni mentioati, acestia fiind la randul lor perpendiculari. Aceasta configuratie favorizeaza un moment magnetic transversal mare care induce o probabilitate de excitare M1 apreciabila.

Pe aceasta configuratie se dezvolta o intreaga banda rotatională, cresterea frecventei de rotatie determinand in final alinierea celor trei momente cinetice. Exista doua benzi cu proprietati asemanatoare numite benzi gemene.

In lucrarea [165] am propus un model pentru nuclee par-pare. Acesta considera un Hamiltonian particula-miez cu miezul descris de modelul starilor coerente generalizate. Un sistem de nucleoni se misca intr-o stare cu j mare. Acestia interactioneaza intre ei prin forte de imprechere si cu miezul prin forte de tip cvadрупol-cvadрупol. Spatiul restrans in care este studiat Hamiltonianul consta in starile dipolare asociate miezului si starile produs de stari dipolare si stari de doua cvasiparticule.

Se demonstreaza ca exista un interval pentru momentul cinetic total in care cele trei momente cinetice, unul fermionic, unul protonic asociat bozonilor cvadrupolari iar altul neutronic ce descrie sistemul bozonic neutronic, sunt reciproc perpendiculare sau aproape perpendiculare. Se arata ca in acest caz exista un moment magnetic mare care induce o tranzitie M1 puternica.

Sunt puse in evidenta benzile gemene si proprietatile distinctive ale acestora. Pentru ilustrare, modelul a fost aplicat la izotopii ^{192}Pt , ^{188}Os , ^{190}Os . Probabilitatile M1 cresc patratic cu momentul cinetic, ajungand pentru $J=18-20$ la valori de ordinul 7-8 magnetoni patrati. Este primul model in literatura propus pentru nuclee par-pare. Se intentioneaza obtinerea unei sistematici a nucleelor par-pare care au proprietati chirale. Dece se numesc benzi chirale? Presupunem ca triedrul mentionat mai sus este drept. Prin schimbarea orientarii unuia dintre momentele cinetice triedrul devine stang. Transformarile care duc un triedru drept intr-unul stang se numesc chirale. Daca Hamiltonianul model este invariant la astfel de transformari, spunem ca acesta are o simetrie chirala. Daca aceasta simetrie este rupta atunci apar doua benzi apropiate, una corespunzand la Hamiltonianul asociat triedrului drept si cealalta la triedrul stang. Daca tranzitiile de tip scissors leaga starile dipolare de cele din banda fundamentala in cazul benzilor chirale tranzitiile magnetice dipolare au loc in banda. O alta deosebire este legata de faptul ca in cazul starilor scissors axele de simetrie ale sistemelor deformate protonice si neutronice sunt foarte apropiate in timp ce la starile chirale unghiul intre momentele cinetice protonice si neutronice sunt mari, in jur de 90 de grade. In acest sens se poate spune ca starile chirale sunt de tip *shears*.

23.03.2016

A. A. Raduta