

Anexa 2

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^+ state, lectie invitata la conferinta "Changing facets of nuclear structure", Vico Equense 2007.

C) Scolii 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 in curs de aparitie

- 1) Fundamente de teoria nucleului (600 pagini): A. A. Raduta, C. M. Raduta
- 2) Elements of special relativity (200 pagini): A. A. Raduta, C. M. Raduta

A. A. Raduta

Anexa 3

REZULTATE DEOSEBITE, PRIORITATI

Pentru unele subiecte, din cele abordate de-a lungul celor 40 de ani de cercetare stiintifica, detin prioritate, fapt de altfel recunoscut in literatura de specialitate. In cele ce urmeaza, voi mentiona aceste domenii:

A) Studiul microscopic al miscarii colective cuadрупolare 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. Nazarewic (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 Nazarewich, 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 (Spikovski) 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 sint 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 pentru 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 cvadрупolar, se descriu inca doua benzi de paritate negativa, avind $K^\pi = 0^-, 1^-$. Rezultatele acestui model sint 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 simetrii.

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 cvadрупolar coerent. Folosind un principiu variational dependent de timp, se obtin ecuatii de tip Hamilton pentru coordonatele de faza, ce sint 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 sint 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, construiește 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 evidenta un al doilea minim in energie reprezentata ca functie de densitatea

nucleara. Acesta 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 lucrare recenta, 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 giganta consta din trei stari cvasidegenerate, doua avand structura de stari de tip spin-flip si una de tip non-spin-flip. Una din stările de tip spin flip are un "strength" mare si pozitiv care este complet anulat de contributia stării 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 stării rezonante giganta cu structura de spin flip este anihilata de cea a stării 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 dependentia distributiei stărilor 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 giganta 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 intermediul celor doua stari au semne opuse si in consecinta se anuleaza reciproc. Pentru deformare mare stările 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 deformării. 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 ideea 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 excludiune 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 regulei de suma Ikeda. Formalismul propus este inclus in lucrarea (79). Se sconteaza 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 cvadрупolare 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 (lucrarile 66,67) pentru aceste tranzitii beta simple.

Nucleele ce se dezintegreaza beta dublu au cel putin una din paturile majore protonice si neutronice ale nucleonilor de valenta deschisa si datorita acestui fapt sunt deformate cvadрупolar. Cu toate acestea formalismele folosite pentru descrierea cantitativa a ratelor de dezintegrare se bazeaza pe functii de unda uniparticula cu simetrie sferica.

Evident distributiile nivelelor energetice pentru o baza de functii sferice si deformate sunt esential diferite ceea ce implica existenta unor proprietati de imperechere diferite.

Se asteapta efecte importante determinate de diferentele mentionate mai sus. Folosirea unei baze de functii deformate de tip Nilsson sau Woods-Saxon este dificila in sine. In plus functiile de unda finale rezultate in urma unui tratament de tip pnQRPA nu vor avea moment cinetic determinat, restaurarea simetriei l rotatii constituind un obstacol deosebit de dificil. Pentru evitarea acestor deficietati in urma cu 10 ani am construit o baza de functii deformate dar cu proprietati la rotatii cu simulare cu cele ale functiilor de moment cinetic determinat. Functiile sunt obtinute printr-un procedeu de proiectie a componentelor cu moment cinetic total determinat dintr-o functie produs, un factor descriind o stare de model in paturi sferic iar celalalt factor fiind o functie coerenta deformata cvadрупolar. Desi functia rezultata descrie, in principiu, un sistem de particula-miez ea poate fi folosita pentru descrierea proprietatilor de tip particula. Intr-adevar in calcularea elementelor de matrice pentru operatorii de tranzitie de tip particula, componentele ce se refera la miezul colectiv se ortogonalizeaza, in final elementul de matrice exprimandu-se ca un produs de doi factori unul fiind elementul de matrice corespunzator functiei de model in paturi sferic iar celalalt fiind un factor ce depinde de deformarea nucleara. S-a construit un sistem de functii uni-particula ortonormat cu functiile proiectate si un Hamiltonian efectiv care este cvasi-diagonal in aceasta baza. Modelul obtinut a fost numit "un nou model in paturi" si are proprietatea remarcabila ca face posibila descrierea unificata (cu o baza unica de functii de unda uni-particula) a nucleelor sferice si a nucleelor deformate. Intr-adevar in limita sferica (deformarea tinde catre zero) se obtine modelul in paturi sferic iar pentru deformare nulceara diferita de zero energiile modelului Nilsson sunt foarte bine simulate. Avantajul modelului consta in faptul ca functia "many body" obtinuta prin formalismul pnQRPA are moment cinetic bine determinat si deci nu necesita o proiectie a momentului cinetic.

Aceasta baza de functii a fost folosita pentru descrierea procesului de dezintegrare beta dubla pentru 18 nuclee emitatoare [114,122]: Este prima data cand in literatura se fac calcule complexe in care nucleele mama si cele fiica sunt descrise de functii uniparticula de deformari diferite. In setul de nuclee specificat mai sus si setul nucleelor fiica corespunzatoare se gasesc cazuri in care formele nucleelor mama si fiica sunt diferite: sferic deformat-prolate, sferic deformat oblate, Deformat-prolate deformat-oblate, etc. Hamiltonianul many body folosit consta intr-un termen de camp mediu ce defineste setul de functii uniparticula descris mai sus, un termen de imperechere proton-proton plus neutron-neutron si o intercatie dipolara proton-neutron de tip Gamow-Teller. Aceasta din urma este considerata atat in canalul ph (particle-hole) cat si in canalul pp (particle-particle). Au fost calculate urmatoarele observabile: a) timpilor de viata pentru nucleele mama, la dezintegrarea beta dubla. b) distributiile strength-urilor dezintegrarilor beta simple minus, si plus. d) a fost testat efectul de saturare la cresterea starilor de doua cvasiparticule incluse in calcul pentru cazul izotopului de 48Ca. e) a fost testata ipoteza SSD (single state dominance) pentru nucleele carora le corespund nuclee impar-impare intermediare avand starea $1+$ ca stare fundamentala. De remarcat ca in toate cazurile considerate regula de suma Ikeda este satisfacuta atat pentru nucleul mama cat si pentru nucleul fiica. Rezultatele teoretice obtinute au fost comparate atat cu datele experimentale cat si cu *predictiile altor formalisme teoretice. Acordul cu experienta este foarte bun.*

I) Originea clasica a formalismelor de tip many body, BCS, RPA, dezvoltari bozonice, a fost demonstrata in Ref. [28].

Toate ecuatiile dinamice obtinute in formalismele mentionate mai sus au fost obtinute in spatiul clasic al coordonatelor de faza. Au fost descrise mai multe procedee de cuantificare a traiectoriilor clasice. Prin cuantificare, se obtin reprezentari bozonice pentru algebra de cvasispin. In plus, fata de reprezentarile cunoscute, Holstein-Primakoff si Dyson, a fost gasita o dezvoltare bozonica noua care se dovedeste a fi utila pentru studiul Hamiltonienilor anarmonici.

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

Folosind un formalism semiclassical pentru un sistem eterogen, constrand in nucleoni si particule alfa, am pus in evidenta o stare fundamentala ce contine pe langa nucleoni si perechi de nucleoni, particule alfa. Prin studiul micilor oscilatii in jurul acestei stari statice s-a pus in evidenta un fapt necunoscut pina acum, anume ca prezenta particulelor alfa favorizeaza fenomenele colective.

Modelul a fost folosit (47) pentru descrierea unor proprietati spectroscopice ale nucleelor din zona $\$Ra, Rn\$, ce erau neexplicabile prin alte teorii.$

Descrierea de tip RPA a sistemului eterogen permite calculul riguros al energiei de zero, corespunzatoare oscilatiilor particulelor alfa in nucleu, marime ce a fost folosita in mod empiric (pina acum) pentru descrierea datelor experimentale privind dezintegrarea alfa.

K) Investigarea semiclassicala a excitatiilor de spin in nuclee.

Intr-un formalism semiclassical se studiaza interactia particula miez. In anumite conditii miscarea gradului de libertate de spin se decupleaza si in consecinta apare o vibratie de spin analoaga undelor de spin ce descriu sistemele de spin plasate intr-un camp magnetic. Aceasta excitatie elementara este responsabila, pentru un sistem "many body", de excitatiile colective de tip spin-flip. Se arata ca asa cum ruperea spontana a simetriei la rotatie conduce

la benzi de rotatie, ruperea spontana a simetriei de paritate spatiala conduce la o miscare de wobbling a spinului particulei in jurul unei stari yrast a miezului. Lucrarea a primit un referat magulitor de elogios din partea lui W. Greiner si a aparut in Int. Jour. Mod. Phys. E, vol. 2, No. 3, p 629.

L) Studiul nucleelor cu deformare statica octupolara.

In acest domeniu am obtinut urmatoarele rezultate originale. Intr-o prima publicatie (lucrarile 75,76) am descris benzile rotationale cu $K^{\{\pi\}}=0-,1-,2-$ ca fiind generate prin excitarea benzilor de paritate pozitiva, fundamentala, beta si gamma cu un fonon octupolar, respectiv. In felul acesta a fost posibila descrierea a 6 benzi rotationale, trei de paritate pozitiva si trei de paritate negativa. Am facut aplicatii la izotopii $^{218,220,226}\text{Ra}$, pentru care exista date experimentale atat pentru energii cat si pentru tranzitiile E1. S-a obtinut o descriere cantitativa buna atat a energiilor cat si a tranzitiilor E1. Totusi exista doua puncte slabe ale modelului, anume nu este descrisa pozitia joasa a starii $1^-\$$ pentru $^{218,220}\text{Ra}$. Intr-adevar pentru aceste nuclee, care sunt aproape vibrationale in deformarea cvadрупolara, starea $1^-\$$ este descrisa de o excitatie dublu fononica cvadрупolar-octupolara si ca urmare este situata energetic deasupra starii $3^-\$$. Deasemenea, pentru descrierea tranzitiilor E1 a fost nevoie de folosirea unui operator de tranzitie cu structura complexa. Pentru inlaturarea acestor deficiente am elaborat un model nou care reprezinta o generalizare a modelului CSM in urmatorul sens (lucrarile 78,79). Aici starea de incercare pentru starea fundamentala in sistemul intrinsec este un produs de functii coerente pentru bozoni cvadрупolari si octupolari, respectiv. Deci starea fundamentala prezinta atat deformare cvadрупolara cat si octupolara. In plus nu este stare proprie a operatorului paritate. Prin proiectia paritatii si a momentului cinetic din starea fundamentala si din alte trei stari deformate, mutual ortogonale si ortogonale pe starea fundamentala se obtin patru benzi rotationale de paritate pozitiva si patru de paritate negativa. Este interesant de remarcat ca aceste perechi de benzi prezinta o structura de dubleti in zona deformatiilor cvadрупolare mici. Deasemenea, doua dintre cele opt benzi sunt dipolare, una de paritate pozitiva si cealalta de paritate negativa. S-a demonstrat ca starile unuia 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 $17-$.

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 ecuatiile 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. Mai multe metode de cuantificare a traiectoriilor c

lasice sunt propuse. 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 procedeu 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-neutrone. 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 rezultant 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 tarzia 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 renormati 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).

Pentru starile care descriu sistemul (N-1,Z+1) regula de suma de tip Ikeda este usor violata. In viitorul apropiat vom efectua calcule numerice realiste folosind cele doua formalisme propuse in lucrarea descrisa mai sus.

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 starile 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 uniparticula 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.

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 particle-particle (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-neutronice.

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 uniparticula protonice si neutrone 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.