

## Rezumat

### Proiectul Instituțional 15.817.02.08F "Metode cuantice, statistice și cinetice pentru studiul sistemelor cu multe particule. Aplicații la materia condensată și nucleară" pentru perioada 2015-2018

Activitatea de bază pe proiect pentru anii 2015-2018 a fost acsată pe pe două direcții principale: 1) Studiul microscopic a proprietăților magnetice și supraconductoare ale compușilor anizotropici de înaltă  $T_c$  și 2) Dezvoltarea modelelor cinetice pentru descrierea reacțiilor nucleare cu ioni grei la energii relativiste.

A fost elaborată tehnica diagramatică utilă la studierea sistemelor în stare de neechilibru termodinamic caracterizate prin prezența corelațiilor electronice puternice. Tehnica se ilustrează apelând la simplul model Anderson al impurității conectate la doi electrozi. În așa sistem numai între electronii localizați pe impuritate sunt corelații puternice, care în comparație cu tehnica diagramatică Keldysh, conduc la apariția unor elemente noi în calcule: funcțiile Green ireducibile și funcția de corelare. A fost demonstrat că funcția de corelare, obținută prin sumarea mulțimii infinite de funcții Green ireducibile strâns legate determină ecuația de tip Dyson pentru sisteme cu corelații electronice puternice.

A fost dezvoltată teoria tranzițiilor de fază în sistemele cuasi-bi-dimensionale dopate, luându-se în considerație prezența "nesstingului" pe suprafața Fermi și procesele umklapp. A fost obținut sistemul de ecuații pentru potențialul chimic, parametrii de ordine ai stării supraconductibile și stării magnetice. La variația concentrației purtătorilor de sarcină are loc tranziția de fază a undei densității de spin din starea comensurabilă în starea incomensurabilă. Este arătat că în anumite condiții este posibilă apariția stării supraconductibile pe fonul stării magnetice. Au fost obținute dependențele de concentrația purtătorilor de sarcină a mărimilor termodinamice pentru starea magnetică și mixtă.

A fost dezvoltată în continuare metoda funcțiilor Green pentru calcularea densității stărilor electronice ale supraconductorilor anizotropi cu dimensionalități mici în cazul mecanismului interzonal al supraconductivității, prezenței "nestingului" la suprafața Fermi, și considerării structurii rețelei..

Au fost arătate: a) posibilitatea apariției supraconductibilității la temperaturi înalte când în sistem la dopare se manifestă esențial numai interacțiunea de respingere electron-electron (interacțiunile interzonale electron-electron dominează asupra interacțiunii intrazonale); b) magnetismul însoțește supraconductibilitatea, care apare pe fonul stării magnetice și dispăre după suprimarea lui. Aceste fenomene se observă în cercetările experimentale ale compușilor contemporani pe baza FeAs.

A fost continuată studierea proprietăților termodinamice ale stării "mixte" (supraconductivitate și magnetism) într-un sistem anizotropic cvasi-bidimensional cu dopare a purtătorilor de sarcină și influența unui câmp magnetic extern. Au fost elucidati parametrii teoriei care contribuie la stabilizarea supraconductivității într-un material magnetic. În particular, a fost demonstrată posibilitatea creșterii temperaturii de tranziție superconductoare la o creștere a câmpului magnetic în starea "mixtă". Pentru acest caz a fost luată în considerare structura rețelei și topologia suprafeței Fermi.

Sau studiat proprietățile termodinamice ale sistemelor supraconductive formate din două straturi diferite cu densitatea mică a purtătorilor de sarcină pe calea dezvoltării metodelor nedigonale ale funcțiilor Green. S-a propus modelul, care conține două straturi cristaline cu densitatea mică ale purtătorilor de sarcină și densitatea esențial diferită a stărilor electronice ale zonelor energetice. A fost dezvoltată metoda funcțiilor Green, luând în considerație rolul aproximării nedigonale. Au fost efectuate calcule, care duc la construirea teoriei proprietăților termodinamice supraconductibile în sistemele compușilor de tipul  $\text{FeSe/SrTiO}_3$ .

Monografia "Teoria microscopică a proprietăților magnetice și superconductoare ale compușilorlor anizotropici de înaltă  $T_c$ " publicată în anul 2017 acoperă o perioadă lungă de lucru în domeniul magnetismului și supraconductivității și demonstrează o contribuție

semnificativă la fizica materiei condensate de către personalul Laboratorului de Fizică Teoretică al IFA al Moldovei.

A fost dezvoltat și generalizat modelul QGSM pentru descrierea polarizării hiperonilor  $\Lambda$ . Includerea acestui model în codurile de transport de radiații nucleare MCNP6, MARS15 și SHIELD ca generator de reacții nucleare a permis interpretarea datelor experimentale obținute la iradierea țintelor masive pentru studierea efectelor de transmutație a deșeurilor nucleare și a metodei electronucleare de producere a energiei.

Modelul cinetic pentru reacții nucleare hadron-nucleu CEM (Cascade Exciton Model) a fost extins pentru descrierea producerii fragmentelor nucleare mai grele ca  ${}^4\text{He}$  și implementat în codul de transport de radiații MCNP6. Modelul cu strune quarc gluonice QGSM a fost utilizat pentru descrierea producerii hyperfragmentelor nucleare în domeniul de energie aproape de pragul energetic în reacțiile nucleare cu ioni grei. Modelul cinetic DCM-QGSM al reacțiilor periferice nucleu-nucleu la energii relativiste a fost utilizat pentru studierea mecanismului propus anterior de polarizare globală a hiperonilor Lambda. Bazat pe efectul de vârtej axial, care fiind o manifestare a anomaliei axiale, duce la un curent axial indus al quarcilor stranii și ca urmare la polarizarea hiperonilor Lambda. Prezicerile acestei abordări au fost confruntate cu datele experimentale recente ale colaborației internaționale STAR. În conformitate cu măsurările s-a demonstrat că polarizarea antihyperonilor antiLambda depășesc polarizarea hiperonilor Lambda și crește cu micșorarea energiei ionilor accelerați. A fost sugerată necesitatea verificării suplimentare a efectului anomaliei gravitaționale.

Au fost obținute noi date experimentale și teoretice privind producerea izomerului  ${}^{178m2}\text{Hf}$  în procesul iradierii cu fascicule de protoni ale țintelor naturale de  ${}^{\text{nat}}\text{Ta}$  și  ${}^{\text{nat}}\text{W}$  în intervalul de energie de la  $\sim 0,04$  până la  $2,6$  GeV. Secțiunile transversale izomerice, precum și rapoartele izomerice obținute pot fi utilizate pentru modelarea mai completă a schemelor de nivel în jurul nivelului izomeric a  ${}^{178m2}\text{Hf}$ . O astfel de schemă ar putea să fie foarte promițătoare pentru calculele producției de  ${}^{178m2}\text{Hf}$  în alte reacții nucleare, inclusiv sunt posibile studii viitoare ale diferitelor reacții pe baza Hf. Acumularea de noi date experimentale privind formarea izomerilor cu valori mari de spin este de asemenea importantă pentru dezvoltarea ulterioară de modele mai precise de reacție nucleare.

În cadrul modelelor cinetice de transport QGSM și PHSD a fost continuat studiul mecanismelor de polarizare a hiperonilor  $\Lambda$  și anti- $\Lambda$  în reacțiile periferice a ionilor grei, luând în considerație vorticitatea și helicitatea mediului nuclear. Studiile de polarizare a hiperonilor  $\Lambda$  în cazul coliziunilor de ioni grei sunt deseori efectuate prin explorarea stării de echilibru termodinamic local a sistemului și calcule hidrodinamice ale vorticității termale. Altă abordare a polarizării, propusă și realizată în lucrările noastre, este așa numitul efectul axial vortic, care reprezintă manifestarea macroscopică a anomaliei axiale și care conduce la apariția unui curent axial indus de quarci ciudați, care se poate transforma în polarizarea hiperonilor. În cadrul modelelor cinetice de transport QGSM și PHSD au fost calculate și comparate între ele vorticitatea și helicitatea mediului nuclear care determină mărimea polarizării hiperonilor  $\Lambda$ . Rezultatele teoretice au fost comparate cu datele experimentale în coliziuni non-centrale Au-Au în programul RHIC Energy Scan (BES), SUA, și pentru energia  $\sqrt{s} = 7.7$  GeV ceea ce corespunde domeniului de energie a coliderului NICA.

Conform programului de studiu a colaborației BM&N, la care participă și Institutul de fizică aplicată, au fost efectuate calcule teoretice și create fișiere de date pentru setul de reacții nucleare C+C, C+Al, C+Ar, C+Kr care au fost efectuate la Nuclotronul IUCN (Institutul Unificat de Cercetări Nucleare, Dubna, Rusia) în anul 2018. Fișierile de date pregătite în cadrul participării în colaborația BM&N au fost utilizate pentru calculul formării hiperfragmentelor și transmise grupurilor experimentale ale BM&N pentru simularea construcției detectoarelor necesare.

În cadrul metodei integrale a căii au fost obținute rezultate analitice exacte pe rețea pentru funcția de partiție a câmpului scalar neutru liber într-o dimensiune spațială atât în spațiul de coordonate, cât și în spațiul de impulsuri. Au fost găsite în mod explicit matricele simetrice pătrate ale formelor bilineare pe spațiul vectorial al câmpurilor scalare în spațiul de coordonate și

în spațiul de impulsuri. Rezultatele exacte pe rețea pentru funcția de partiție au fost generalizate în spațiul tridimensional al impulsului spațial, iar principalele cantități termodinamice au fost derivate atât pe rețea cât și în limita continuu. Au fost studiate proprietățile termodinamice și corecțiile volumului finit la cantitățile termodinamice ale câmpului scalar real liber. Au fost găsite în mod explicit matricele simetrice pătrate ale formelor bilineare pe spațiul vectorial al câmpurilor scalare în spațiul de coordonate și în spațiul de impulsuri. S-a constatat că, în cazul rețelei finite, rezultatele exacte pe rețea pentru câmpul scalar neutru masiv și fără masa sunt de acord cu limita continuu numai în regiunea valorilor mici ale temperaturii și volumului. S-a demonstrat că la aceste temperaturi și volume, cantitățile fizice continuu pentru câmpul scalar masiv și fără masa se abat în esență de valorile lor în limită termodinamică și le recuperează doar la temperaturi ridicate și/sau volume mari.

Odata cu darea în exploatare a acceleratoarelor de ioni grei la energii relativiste și ultrarelativiste s-au creat condiții favorabile de studiere a materiei nucleare la densități și temperaturi extreme. Acestea cer elaborarea și dezvoltarea unor modele pentru o descriere adecvată a ciocnirilor ionilor grei în domeniul respectiv de energii. Unul dintre ele este modelul HydHSD de coliziune propus, care combină faza inițială, descrisă de modelul cinetic de Hadroni-String Dynamics (HSD) și expansiunea ulterioară hidrodinamică a fairbolului format. Modelul a fost extins luând în considerație viscozitatea de alunecare în cadrul hidrodinamicii Israel-Stewart. În cadrul acestui model pentru diferite valori ale raportului densității de viscozitate la densitatea de entropie au fost analizate distribuțiile de rapiditate și impuls transversal pentru spectrele protonilor și pionilor produși în coliziuni. Includerea viscozității conduce la o ușoară schimbare a înclinării spectrelor  $m_T$  care face ca spectrele să fie mai aproape de datele experimentale.

A fost analizată folierea algebrei Lie  $SL(3, \mathbb{R})$  pe orbitele acțiunii adjuncte. A fost scrisă o programa de calcul analitic în sistemul Maple cu ajutorul careia au fost calculate câmpurile vectoriale tangente la orbita adjunctă. Pentru operatorii Casimir găsiți prin metoda dezvoltată anterior pentru construirea invariantilor acțiunii adjuncte, au fost construite câmpurile vectoriale care comutează cu câmpurile vectoriale tangente. Astfel, spațiul tangent la algebră este reprezentat de o sumă directă a distribuțiilor orizontale și verticale ale câmpurilor vectoriale care definesc folierea algebrei pe orbitele acțiunii adjuncte. Coordonatele selectate pe algebra Lie corespund bazei Cartan-Weil, direct asociate cu sistemul de rădăcini a algebrei. Baza Cartan-Weil determină conectarea tuturor structurilor geometrice construite cu sistemul de rădăcini, ce permite extinderea rezultatelor desemnate la alte grupuri Lie.

Dispariția derivatelor Lie de-a lungul câmpurilor vectoriali orizontali definește un sistem uniform de ecuații diferențiale în derivate parțiale pentru parametrii orbitei acțiunii adjuncte. Coordonatele folosite permit reprezentarea sistemului într-o formă convenabilă pentru găsirea soluțiilor lui. Analiza teoretică de grupă a sistemului de ecuații diferențiale a arătat că simetria sistemului de ecuații diferențiale este acțiunea adjuncă a grupului  $SL(3, \mathbb{R})$  pe algebră din cauza comutației câmpurilor vectoriali orizontali și verticali. Aceasta a permis de găsit soluțiile sistemului de ecuații cu ajutorul invariantelor de simetrie a sistemului.

Sa considerat un set de inegalități polinomiale care determină spațiul orbită al acțiunii unui grup de transformări locale ale unui sistem cuantic multiparticlar într-o stare mixtă. Inegalitățile rezultă din condițiile de pozitivitate a matricei de densitate a sistemului, precum și din condițiile de pozitivitate a matricei speciale Grad, cunoscută în teoria invariantilor. Acest set de inegalități este folosit pentru a analiza măsurile de îmbinare a unui sistem cuantic, așa cum se arată în exemplul criteriului de cuplare Peres-Gorodetsky. Sa dovedit necesitatea folosirii condițiilor pentru matricea Grad. pentru a descrie spațiul statelor încurcate. Ca o aplicație, au fost investigate tipurile de densitate utilizate pe scară largă care descriu așa-numitele stări X.

Proprietatea de încurcare a unui sistem cuantic poate fi folosită pentru a crea mijloace de transfer de informații cuantice și de calculare cuantică. Definirea măsurilor de entanglementare pentru un anumit sistem este o sarcină complexă teoretică și experimentală. Setul propus de inegalități polinomiale descrie spațiul în care poate fi definită o astfel de măsură.