



**INSTITUTUL NATIONAL DE C&D  
PENTRU FIZICA SI INGINERIE NUCLEARA  
"HORIA HULUBEI"  
IFIN-HH Bucuresti**

Str. Atomistilor 407, Com.Magurele, jud.Ilfov, C.P. MG-6, cod 077125.  
Tel.(021)404.23.00,fax(021)457.44.40,(021)457.44.32

Avizat

DIRECTOR GENERAL AL IFIN-HH

Dr. Nicolae Victor Zamfir

**R A P O R T D E C E R C E T A R E**

**Denumirea proiectului:** Fizica interacțiilor nucleare și a fazelor materiei hadronice: noi rezultate, activități de cercetare-dezvoltare, aplicații - acronim NIHAM

**Denumirea etapei:** *Efecte de izospin in ciocnirile ionilor grei la energii joase, intermediare si relativiste.*

**Perioada acoperită:** 05 .10.2005 - 15.12.2005

**Obiectivele specifice etapei raportate în corelație cu obiectivul general al proiectului:**

Scopul prezentului proiect este de a obține noi rezultate experimentale și teoretice privind structura nucleară și fazele materiei nucleare și anume va fi evidențiat rolul gradului de libertate de izospin în studii experimentale și teoretice realizate pe un domeniu larg de energii incidente.

**Activitățile efectuate și rezultatele obținute:**

*Introducere*

Fizica nucleară este știința înțelegerii:

- structurii, dinamicii și proprietăților globale ale sistemelor hadronice
- universului începând de la primele microsecunde de viață când predomină plasma quark-gluon urmată de formarea stelelor și galaxiilor în care reacțiile nucleare au un rol esențial. În același timp fizica nucleară are aplicații în multe domenii relevante pentru societate și un impact puternic asupra celorlalte domenii ale științei. În toate aceste domenii au avut loc dezvoltări majore în ultimul deceniu. Cercetarea în domeniul structurii nucleare are ca scop înțelegerea și precizarea proprietăților nucleului atomic, pentru a înțelege din modelarea sa conceptele fizice de bază și a extrage ingredientele simple fundamentale. În ultima decadă, s-a făcut un progres semnificativ, atât din punct de vedere experimental cât și teoretic. Domeniul fasciculelor de ioni radioactivi (RIB) a permis îndepărtarea de linia de stabilitate și tranziția de la un parametru, masa  $A$ , la dependența bidimensională de numărul de neutroni  $N$  și protoni  $Z$  ca parametri. Ceea ce s-a învățat din investigarea nucleelor exotice impune reconsiderarea unor adevăruri fundamentale bazate pe studiul intensiv al nucleelor stabile. Astfel, explorarea regiunilor de instabilitate a arătat că difuzivitatea și deci raza nucleelor atomice variază puternic, că apar noi numere magice deformate și că drip line-ul neutronic pare a fi mult mai îndepărtat decât se anticipase acum 20 de ani.

Investigarea diagramei de fază a materiei nucleare și identificarea diferitelor sale faze este dintre cele mai mari provocări ale fizicii nucleare moderne. Pentru a face acest lucru la densități de energie de la câțiva MeV până la zeci de GeV și densități ale materiei de câteva ori mai mari decât cea normală, se folosesc ciocnirile ionilor grei pentru a încălzi și comprima materia nucleară. Experimental, se măsoară probabilitatea ca sistemul excitat să se dezintegreze într-un ansamblu de fragmente nucleare ușoare sau picături de lichid nuclear. Se anticipează că ciocnirile în care apare multifragmentarea permit extragerea proprietăților termodinamice ale materiei nucleare în zona de tranziție lichid-gaz. Aceste procese în ciocniri de ioni cu asimetrie de sarcină dau semnale pentru efecte noi interesante ale dinamicii izospinului care sunt sensibile la interacția nucleon-nucleon în mediu, insuficient cunoscută. La energii relativiste se poate studia materie nucleară la energiile și densitățile cele mai mari.

## *Efecte de izospin în structura nucleelor și în ciocnirile ionilor grei*

### *Energii joase*

#### **a. Fenomene exotice în nuclee de masă medie**

Investigarea structurii nucleelor exotice în jurul liniei  $N=Z$  în regiunea de masă  $A \approx 70$  este una dintre cele mai interesante provocări în fizica la energii joase de azi. În afara faptului că prezintă unele efecte de structură nucleară interesante aceste nuclee joacă un rol important în interacția slabă și astrofizica nucleară. Un efort teoretic intens a fost dedicat în ultimii ani investigării dezexcitării  $\beta$  superpermise a nucleelor cu  $A \geq 62$  unde se așteaptă ca termenii de corecție dependenți de sarcină să fie mari.

Calcululele microscopice de structură nucleară pentru astfel de nuclee medii sunt extrem de laborioase. Spațiile de model adecvate sunt mult prea mari pentru a permite o diagonalizare completă a unui hamiltonian efectiv potrivit și astfel trebuie să se recurgă la metode aproximative potrivite. Mai mult, hamiltonianul efectiv potrivit însuși, nu este cunoscut a priori și poate fi determinat numai printr-un proces iterativ de calcule consumatoare de mult timp. Ambele, limitarea metodei aproximative particulare folosite, ca și cunoașterea insuficientă a hamiltonianului potrivit, vor lăsa anumite incertitudini în rezultatele cantitative în special

dacă sunt investigate efecte mici.

Sunt prezentate rezultate despre influența amestecului de izospin indus coulombian asupra dezintegrării  $\beta$  Fermi superpermise, folosind abordarea variațională EXCITED VAMPIR complexă, pentru descrierea stărilor  $0^+$  excitate cele mai joase în cele două triplete izovec-toare de nuclee  $^{70}\text{Se}$ ,  $^{70}\text{Br}$ ,  $^{70}\text{Kr}$  și respectiv,  $^{74}\text{Kr}$ ,  $^{74}\text{Rb}$ ,  $^{74}\text{Sr}$ . Forțele calculate sunt în acord cu rezultatele experimental disponibile. Ramuri Fermi non-analoge particulare către stări  $0^+$  excitate cu forță considerabilă sunt prezise să coexiste cu dezintegrarea superpermisă în câteva dintre nucleele prezente investigate dând astfel speranțe pentru o posibilă detecție experimentală.

Se atașază textul lucrării în limba engleză.

## b. Relaxarea de izospin în ciocnirea ionilor grei ușori

Unul dintre cele mai rapide procese specifice reacțiilor profund inelastice, care poate fi observat experimental, este echilibrarea de sarcină, modul excesului de neutroni sau relaxarea de izospin. Acesta constă în următoarele. Într-o ciocnire profund inelastică, raportul între numărul de neutroni și cel de protoni este în general diferit pentru proiectil și țintă. S-a observat că acest raport se schimbă rapid de la valoarea sa inițială și atinge pentru fiecare fragment rezultat din reacție, o valoare de echilibru caracteristică sistemului compozit.

Introducerea, în dispozitivul experimental DRACULA, la poziția țintei, a celui de-al doilea detector plan-paralel cu avalanșă a permis și măsurarea masei produșilor de reacție, folosind metoda timpului de zbor cu o bază de zbor de 60 cm, asigurată de extensia prin care camerele de ionizare se cuplează la camera de reacție. Calibrarea spectrului de timp a fost făcută folosind împrăștierea elastică. Rezoluția de măsurare a masei este de o unitate de masă. Pentru a obține datele experimentale primare au fost făcute corecții de evaporare, folosind codul de calcul PACE2. Folosirea unui cod de calcul permite luarea în considerare a evaporării tuturor particulelor încărcate, care este importantă la nuclee ușoare. Masa și sarcina medie evaporate în funcție de energia de excitație, au fost estimate din rezultatele date de program, cu parametrii standard, pentru dezexcitarea mai multor nuclee din zona de masă investigată. Apoi a fost aplicată procedura iterativă de reconstruire a distribuțiilor primare. Matricile de corelație TKE-Z via secțiunea dublu diferențială  $d^2\sigma/dZdTKE$  au fost generate pentru o fereastră de masă corespunzătoare asimetriei de masă inițiale, respectiv  $\Delta A=2$  u.a.m., centrată la masa proiectilului. Din acestea au putut fi obținute distribuția de sarcină și respectiv varianța condiționată în ferestre de TKEL. Datele corectate pentru evaporare sunt peste limita statistică și deci mai aproape de limita cuantică în cazul ambelor reacții induse de  $^{19}\text{F}$  și respectiv  $^{27}\text{Al}$ .

Având în vedere acest rezultat, datele primare au fost comparate cu un model teoretic care tratează gradul unidimensional al modului echilibrării de sarcină ca un oscilator cuantic amortizat, model folosit cu succes la descrierea datelor experimentale pentru sisteme mult mai grele. Rezultatul este faptul că aceiași parametri de model pentru soluția supraamortizată descriu bine datele experimentale atât pentru sisteme cu număr mic cât și pentru sisteme cu număr mare de nucleoni.

Folosirea acelorași parametri de model pentru descrierea datelor experimentale pentru sisteme ușoare și grele arată, pe de o parte, valabilitatea modelului în care se ține cont de frecvența oscilatorului și parametrul de inerție corecte pentru fiecare sistem în parte, cei cinci parametri rămași fiind universali, iar pe de alta, faptul că mecanismul de interacție este similar, indiferent de mărimea sistemului.

Se atașază prima versiune a lucrării elaborate, în limba engleză.

**c. Isoscaling în ciocniri centrale  $^{124}\text{Sn}+^{64}\text{Ni}$ ,  $^{112}\text{Sn}+^{58}\text{Ni}$  la 35 AMeV**

Date din reacțiile  $^{124}\text{Sn}+^{64}\text{Ni}$  și  $^{112}\text{Sn}+^{58}\text{Ni}$  la 35 AMeV energie incidentă a fascicului de la Ciclotronul Supraconductor al LNS(Catania) au fost obținute de către Colaborarea REVERSE. În experimente a fost folosită partea dinainte a detectorului CHIMERA ( $1^\circ \leq \theta_{lab} \leq 30^\circ$ ). În această configurație au fost folosite 688 de telescoape făcute din detectori de siliciu  $\Delta E$  de 200-300  $\mu\text{m}$  (dependent de unghi) grosime și detectori de CsI(Tl). Tehnica bazată pe analiza multidimensională (analiza componentelor principale) a permis selectarea atentă a celor mai centrale ciocniri. În urma comparației cu calcule de model statistic, anterior a fost emisă ipoteza că evenimentele de multifragmentare selectate își au originea într-o sursă aproape echilibrată de aceeași sarcină, energie de excitație și volum. Analiza fragmentelor separate izotopic, arată că temperaturile evaluate pentru cele două reacții din rapoarte dublu-izotopice sunt în domeniul tipic pentru procesele de reacție aflate în apropierea apariției emisiei de multifragmentare. Temperaturile izotopice, în limita erorilor, au fost găsite pentru ambele reacții studiate.

A fost făcută o analiză de isoscaling folosind rapoarte de randamente izotopice, măsurate în ambele reacții studiate. Au fost deduse densitățile relative de neutroni și protoni. Creșterea observată a densității relative de neutroni este consistentă cu îmbogățirea neutronică în faza de gaz. Rapoartele de densități neutron la proton pentru ambele sisteme au fost obținute din rapoarte izobare pentru nuclee oglindă. Valorile lor sunt mult mai mari decât se așteaptă dacă neutronii și protonii ar fi fost amestecați omogen la configurația de break-up.

Rezultatele sunt consistente cu efectul distilării de izospin, un semnal prezis în tranziția de fază lichid-gaz. Totuși se cer studii elaborate ale rolului emisiei secvențiale, înainte de a afirma că s-a observat experimental o trăsătură a tranziției de fază în reacțiile studiate.

Se atașează textul lucrării în limba engleză.

**d. Distribuții de izospin ale fragmentelor și diagrama de fază a sistemelor nucleare excitate**

Ultimul deceniu a fost marcat în fizica nucleară de un interes particular asupra efectelor de izospin. Motivația principală a acestor studii a fost determinarea termenului de asimetrie al ecuației de stare nucleară și a dependenței acestuia de temperatură și densitate.

Stiut fiind faptul că în cadrul tranzițiilor de fază de ordin întâi în sisteme multicomponente condițiile Gibbs de echilibru termic, chimic și mecanic între faze conduc la proporții diferite ale concentrațiilor componentelor în diferitele faze, fizicienii nucleariști s-au concentrat asupra evidențierii compoziției chimice diferite a fazelor materiei nucleare produse în ciocniri de ioni grei. Din punct de vedere teoretic, primul și cel mai convingător rezultat a fost obținut folosind un model de câmp mediu relativist pentru materie nucleară asimetrică. Astfel, bazându-se pe faptul că în sisteme în care concentrația neutronică o depășește pe cea protonică, termenul de asimetrie este repulsiv pentru neutroni și atractiv pentru protoni, a fost prezisă îmbogățirea în neutroni a fazei de gaz și sărăcirea în neutroni a fazei de lichid. Acest rezultat a fost ulterior confirmat de majoritatea modelelor dinamice de ioni grei.

Tinind cont că fenomenul de multifragmentare este văzut ca o manifestare a tranziției de fază de tip lichid-gaz în materia nucleară, este firesc să se încerce evidențierea fenomenului de distilare de izospin în reacții de multifragmentare. Astfel, în majoritatea laboratoarelor de fizica nucleară din lume au fost studiate reacții de multifragmentare și a fost confirmată

concentrația înaltă de neutroni a fragmentelor ușoare. Rezultatele sunt însă criticabile datorită fundamentării grandcanonice a aproximațiilor folosite și a faptului că reacțiile folosite nu corespund neapărat tranziției lichid-gaz.

Obiectivul nostru în cadrul acestui proiect a fost de a vedea în ce măsură fenomenul de fracționare de isospin este compatibil cu o descriere statistică a multifragmentării nucleare. Acest studiu este important deoarece pe parcursul a aproape două decenii modelele statistice de multifragmentare nucleară în general, și cele microcanonice în particular, s-au dovedit capabile de a descrie cu acuratețe toate datele obținute experimental. Spre deosebire de modelele dinamice, modelele statistice au avantajul ca lucrează cu fragmente bine definite și, nu în ultimul rând, diagramele de fază asociate sunt cunoscute.

Am folosit un model microcanonic de multifragmentare nucleară dezvoltat în ultimii ani la IFIN-București și care descrie realist fenomenologia reacțiilor de multifragmentare pentru a urmări compoziția chimică medie a fragmentelor rezultate în diferite regiuni ale diagramei de fază. Rezultatul deosebit de important este că observabila considerată relevantă, raportul mediu al numărului de neutroni și protoni în funcție de sarcină, prezintă forme diferite în fazele de lichid+vapori sub-saturați, coexistența lichid - vapori saturați și vapori suprasaturați. Astfel, în prima zonă,  $\langle N/Z \rangle$  versus  $Z$  este monoton crescător, în regiunea de coexistență de faze are un maxim iar în regiunea de gaz este aproximativ constant. Abateri de la aceste forme se datorează efectelor conservării de masă și sarcină proprii descrierii microcanonice și se înregistrează la multiplicități totale reduse (nuclee sursă relativ ușoare sau valori coborâte ale energiei de excitare și/sau volumului de freeze-out). Faptul că distribuțiile obținute nu sunt decât cel mult în zona de lichid în acord calitativ cu predicțiile energiei de legătură a fragmentelor denotă faptul că în acest model mecanismul pe care se bazează formarea fragmentelor nu implică un criteriu de minimizare a energiei de asimetrie.

Rezultate secundare vizează distribuțiile celui mare mare fragment despre care până de curând s-a crezut că pot semnala printr-o structură bimodală zona de coexistență de faze. Astfel, precizăm că am pus în evidență obținerea de distribuții bimodale în zona de lichid și, pe de altă parte, distribuții uni-modale în zona de coexistență lichid-gaz.

Pentru a face legătura cu predicțiile modelelor dinamice, am clasificat fragmentele în funcție de masă într-o fază liberă și una legată. Această clasificare nu are legătură cu fazele termodinamice ale materiei și poate fi făcută indiferent de localizarea evenimentului studiat în diagrama de faze. Rezultatele indică faptul că îmbogățirea relativă cu neutroni a fazei libere în comparație cu cea legată are loc peste tot în diagrama de fază, neputându-se astfel trage concluzia că este o semnătură corectă a zonei de coexistență.

În concluzie, cercetările făcute oferă o perspectivă originală și valoroasă asupra distilării de izospin în multifragmentarea nucleară.

Se atașază textul lucrării în limba engleză.

*Energii relativiste*

#### **e. Dependența de energia incidentă a amestecului de izospin în ciocnirile $^{96}\text{Ru}(^{96}\text{Zr}) + ^{96}\text{Ru}(^{96}\text{Zr})$**

După cum este bine cunoscut, una dintre motivațiile de bază ale studiului interacțiilor ionilor grei la energii relativiste este obținerea de informații asupra ecuației de stare a materiei nucleare la densități și temperaturi ridicate populate în asemenea interacții.

În cadrul Colaborării FOPI, grupul nostru a propus și realizat un studiu al distribuției

azimutale a energiei cinetice medii a diferiților produși de reacție și a energiei colective de expansiune, demonstrând că aceste observabile sunt sensibile la ecuația de stare folosită în calcule de transport microscopic. În cazul folosirii unei ecuații de stare moale ( $K=210$  MeV), a unei interacții nucleon-nucleon dependente de densitate și a unui potențial dependent de moment, s-a obținut o bună concordanță cu datele experimentale (Phys.Rev.Lett 92(2004)072303).

Pentru popularea materiei nucleare în asemenea stări, este nevoie de o putere de stopare semnificativă a ionilor care interacționează, singura modalitate de a produce materie la densități și temperaturi ridicate. Pentru obținerea de informații privind puterea de stopare au fost studiate distribuții barionice funcție de rapiditate pe o plajă largă de energii incidente, de la SIS la RHIC. La energii mai mari de câteva sute de MeV/nucleon, datele experimentale pentru ciocnirile centrale indică distribuții în rapiditate care sunt mult mai largi decât cele care ar corespunde unei surse care expandează izotropic. Aceasta poate avea diferite explicații, cum ar fi: fenomenul de transparentă, stoparea completă și reșepararea partenerilor sau expansiunea longitudinală în urma unui echilibru termic complet între nucleele care interacționează. Rezolvarea acestei ambiguități a polarizat eforturi serioase de-a lungul anilor. Studiul ciocnirii nucleelor izobarice, adică identice ca masă dar cu valori diferite ale raportului  $N/Z$  a fost propus pentru găsirea unui răspuns. Avantajul unei asemenea metode, cunoscută sub denumirea de "amestec de izospin", este că informația asupra puterii de stopare poate fi obținută direct din datele experimentale fără utilizarea unor modele pentru interpretarea acestora. Asemenea experimente realizate la diverse energii incidente au arătat că la energii mai mici de 40 A·MeV se evidențiază o echilibrare a izospinului înainte de emisia de fragmente. La energii mai mari de 400 A·MeV, Colaborarea FOPI a prezentat pentru prima dată în literatura de specialitate evidențe clare de transparentă parțială în ciocnirile centrale a ionilor grei folosind observabila numită trasor de izospin dedusă dintr-o analiză combinată a unor ciocniri izobarice simetrice și asimetrice.

În lucrarea de față se folosește metoda trasorului de izospin la energia de 1528 A·MeV.

Principalele rezultate obținute, prezentate în detaliu în lucrarea anexată pot fi sintetizate astfel:

- Distribuțiile experimentale în rapiditate a protonilor și fragmentelor cu  $Z=1$  și comparația cu predicțiile modelului de transport microscopic dependent de izospin - IQMD, indică o ecuație de stare "moale" ( $K=200$  MeV), o interacție nucleon-nucleon redusă cu 0.75 față de interacția liberă nucleon-nucleon și o dependență de impuls a interacției nucleon-nucleon ( Fig.8 din lucrare).

Acest lucru vine să confirme rezultatele noastre anterioare publicate în (Phys.Rev.Lett 92(2004)072303).

- Studiul dependenței de rapiditate a variabilei amestecului de izospin  $R_Z(x)$  evidențiază într-un mod foarte clar existența fenomenului de transparentă. Comparația cu datele experimentale de la energia incidentă de 400 A·MeV arată clar că fenomenul de transparentă crește cu energia incidentă, în concordanță cu prezicerile de model. (Fig.4 din lucrare). Această observabilă însă nu este sensibilă la ecuația de stare, așa cum poate fi observat în Fig.9.
- Datele experimentale demonstrează clar că avem de a face cu o regiune în rapiditate, în vecinătatea rapidității centrului de masă  $|y^{(0)}| \leq 0.15$ , ceea ce nu s-a observat la energia de 400 A·MeV.

Se atașază textul lucrării în limba engleză.

**Rezultate obținute în stagii efectuate în străinătate:**

Nu au fost efectuate stagii în străinătate.

**Stadiul realizării obiectivelor:**

Obiectivele etapei au fost realizate integral.

**Stadiul valorificării rezultatelor:**

- a. Lecție invitată la Carpathian Summer School of Physics 2005 "Exotic Nuclei and Nuclear/Particle Astrophysics"  
în curs de publicare în Proceedings
- b. Lucrare elaborată în prima versiune.
- c. Primele rezultate privind reacțiile studiate, fără un studiu detaliat al efectelor evaporării secvențiale, au fost publicate în Nuclear Physics A732 (2004) 173-201.
- d. Lucrare trimisă spre publicare la Phys. Rev. C.
- e. Lucrare trimisă spre publicare la Phys. Rev. C.

**Prezentare succintă a obiectivelor prevăzute pentru etapa următoare:**

Vor fi implementate și dezvoltate pachete software pentru studiul experimental și teoretic și aplicații în domeniul materiei hadronice. Evaluări de date nucleare.

DIRECTOR DE PROIECT,

Prof. Dr. M. Petrovici