

Capitolul al XI-lea

Concepte folosite în descrierea dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste. Ierarhizarea modelelor

XI.1. Diversitatea conceptelor

Ciocnirile nucleu-nucleu la energii înalte se caracterizează prin *secțiuni eficace mari, multiplicități mari ale particulelor cu sarcină și fragmentelor*, precum și prin *abundența particulelor neutre în starea finală* [1-4,7,19,20,22,30,31]. Aceste caracteristici fac dificilă descrierea dinamicii acestor ciocniri. Diversitatea și complexitatea fenomenelor care se pot produce în ciocniri nucleu-nucleu la energii înalte complică la rândul lor dinamica ciocnirii și fac extrem de dificilă separarea contribuțiilor specifice.

Pentru descrierea teoretică completă a dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste ar fi necesară o *teorie a mai multor corpuri, cuantică, relativistă, dependentă de timp*, care să includă toate gradele de libertate hadronice [14,15]. Cum o astfel de teorie nu se poate constitui în prezent, pentru descrierea dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste s-a urmat și se urmează *calea modelelor de diverse tipuri*, modele care urmează căi mai tratabile, cu simplificări și aproximații corespunzătoare [1-4,7,13-18]. *Căile teoretice de abordare a dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste trebuie să permită și crearea unor legături între mărimile determinabile experimental*, pe de o parte, și *mecanismele de ciocnire propuse și proprietățile sistemului nuclear* format prin ciocnire.

Luarea în considerare a diverselor aspecte ale dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste a condus la apariția a *numeroase modele* care folosesc un *număr mare de concepte*, de la cele *clasice la cele mai moderne*, specifice modelului standard [32-34].

Printre conceptele cele mai des folosite în descrierea dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste de o largă răspândire se bucură cele statistice și hidrodinamice [13-16,20,21,34-37]. Caracterizarea stărilor și proprietăților materiei nucleare, în condițiile în care densitățile și temperaturile foarte mari atinse în regiunea de suprapunere a nucleelor care se ciocnesc durează timpi de ordinul câtorva Fm/c, se poate face, totuși, folosind ipoteza echilibrului global - cazul modelelor termodinamice [38-41] - sau ipoteza echilibrului local - cazul modelelor hidrodinamice [42-46]. Folosirea ipotezei echilibrului în materia nucleară fierbinte și densă permite introducerea unor variabile specifice ansamblurilor statistice de tip canonic, cum ar fi temperatura și densitatea. În acest caz se pot defini diferite mărimi fizice de interes ca funcții de variabilele canonice, precum și relații de legătură între diferitele mărimi de interes, folosind relații termodinamice obișnuite [47,48]. Cea mai importantă relație care se dorește a fi obținută este ecuația de stare a materiei nucleare [49,50].

În descrierea dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste se folosesc frecvent teorii legate de câmpul mediu. În acest caz este necesară folosirea ecuației Dirac dependente de timp, pentru descrierea proceselor în care sunt implicați nucleonii. De asemenea, este necesară luarea în considerare a câmpurilor mezonice - atractive și repulsive - precum și a interacțiilor mezon-barion, ceea ce implică folosirea ecuațiilor Klein-Gordon și Proca sau a altor tipuri de ecuații și potențiale [14-16,32-34,51-53]. Dacă în cazul modelelor considerate anterior era importantă găsirea unei ecuații de stare corespunzătoare a materiei nucleare folosind concepte și relații termodinamice și hidrodinamice, în acest caz este importantă scrierea unui lagrange-ian efectiv în termenii unor energii cinetice și potențiale corespunzătoare, care să permită folosirea de mase și constante de cuplaj fenomenologice. În funcție de numărul și natura termenilor introduși în lagrange-ian se poate descrie materia nucleară infinită la temperaturi și densități diferite. Obținerea ecuației de stare este posibilă, în acest caz, prin introducerea în lagrange-ian a unor termeni legați de mase efective, compresibilitate, potențial chimic, presiune ș.a.

Comportarea materiei nucleare în condiții extreme este una din problemele cele mai provocatoare care se pun Fizicii nucleare relativiste, iar răspunsul corect la această problemă poate să aibă consecințe în domenii care depășesc cadrul strict al acestui domeniu al Fizicii nucleare, dar care depind semnificativ de proprietățile materiei nucleare într-un domeniu foarte larg de densități și temperaturi. Printre acestea se numără mecanismul de explozie al supernovelor, structura internă a stelelor neutronice, formarea materiei în timpul evoluției Universului timpuriu, imediat după “Explozia primordială”. De aceea, gama conceptelor folosite pentru descrierea dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste se diversifică continuu, iar gama stărilor și fenomenelor "exotice"/"anomale" observabile este foarte largă, în acord cu creșterea energiei pe nucleon pentru fasciculul incident, precum și cu numărul de masă al nucleului incident.

În acest context este de remarcat teoria microscopică dinamică de n corpuri cunoscută și sub numele de "dinamică moleculară cuantică" [54,17]. Această teorie este o extindere cuantică a dinamicii moleculare clasice folosită în studii de chimie și astrofizică. Trebuie subliniat faptul că se pleacă de la ecuația Schrödinger pentru n corpuri și se obține ecuația de evoluție în timp pentru transformata Wigner a unei matrice de densitate de n corpuri. Evoluția în timp este legată atât de partea reală cât și de partea imaginară a matricei de tranziție, iar obținerea soluțiilor necesare este legată de folosirea unor sisteme de calcul cât mai puternice. De aceea, este necesară folosirea unui set complet și coerent de ipoteze simplificatoare pentru rezolvare. Principalele direcții de studiu sunt, în acest caz, fenomenele de fragmentare și obținerea ecuației de stare. În acest context trebuie subliniate extrem de interesante rezultate asupra unor stări și fenomene "exotice" în materia nucleară fierbinte și densă, precum și sublinierea rolului fundamental al ciocnirilor nucleare la energii înalte și foarte înalte în cunoașterea structurii materiei, precum și în elucidarea proceselor care au succedat imediat Exploziei primordiale.

XI.2. Ierarhizarea modelelor

Diversele tipuri de modele propuse pentru descrierea dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste și ultrarelativiste trebuie să ia în considerare multe din aspectele

majore, inclusiv producerea unor tranziții de fază și apariția unor stări și fenomene "exotice" în materia nucleară fierbinte și densă.

In funcție de tăria conceptelor folosite și de calitatea unor răspunsuri oferite modelele propuse se pot clasifica astfel:

- (i) ecuații de mișcare clasice nerelativiste și relativiste;*
- (ii) problema a n corpuri și ecuații Hartree-Fock dependente de timp;*
- (iii) ecuația Boltzmann;*
- (iv) ecuația Vlasov și ecuația Vlasov-Uhlenbeck-Uhlenbeck;*
- (v) ciocniri nucleon-nucleon și cascade intranucleare;*
- (vi) hidrodinamică și termodinamică în ipoteza echilibrului local și global;*
- (vii) cromodinamică cuantică și noțiuni de astrofizică.*

În cadrul cursului se vor detalia multe din aceste concepte, în contextul discutării diferitelor modele. Așa cum s-a mai spus, studiul ciocnirilor nucleu-nucleu la diferite energii permite o înțelegere mai profundă a proprietăților globale ale materiei care interacționează tare, precum și cunoașterea diagramei de fază a materiei nucleare. Sunt importante informațiile la diferite densități și temperaturi, în condiții de echilibru diferite pentru a avea posibilitatea cunoașterii adecvate a acestor aspecte. În discutarea tuturor modelelor, geometria ciocnirii și stabilirea ecuației de stare a materiei nucleare sunt elementele fundamentale. Prin ele, legăturile cu domeniile pentru care Fizica nucleară relativistă este considerată ca o punte sunt mult mai evidente.

Multe din modele prezentate în această parte a cursului sunt considerate *căi microscopice* de abordare a ciocnirilor nucleare la diferite energii. Caracterizarea lor ca modele microscopice este determinată de faptul că în ipotezele lor nucleonii, pionii și alte particule, precum și constituenții lor – cuarcii și gluonii – sunt *grade de libertate fundamentale*.

O altă caracteristică importantă a modelelor microscopice este determinată de modul în care este considerată *evoluția în spațiul fazelor*. Atunci când se încercă obținerea informației dinamice complete considerând spațiul fazelor pentru toate gradele de libertate avute la dispoziție (*n corpuri*) se consideră aspecte legate de așa-numita *dinamică moleculară*. Dacă se urmărește integrarea pe coordonatele a $(n-1)$ dintre

particulele folosite la determinarea gradelor de libertate fundamentale, atunci se obțin *ecuații cinetice pentru distribuțiile de densitate uniparticulă*.

De aici se pot stabili legături cu *căi macroscopice* de descriere a dinamicii ciocnirilor nucleare. De exemplu, integrarea suplimentară în spațiul impulsurilor, în ipoteze diferite, permite obținerea *ecuațiilor hidrodinamice*, specifice pentru o cale macroscopică de abordare a acestui studiu.

În cazul în care se consideră forma distribuției de densitate uniparticulă în spațiul obișnuit, în ipoteze restrictive specifice și cu considerarea unui număr de grade de libertate mai mic, se pot obține așa-numitele *modele termice*.

Deoarece fiecare din ele permite obținerea unor informații importante asupra dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste în curs se vor prezenta aspecte legate de toate aceste tipuri de modele.