

Capitolul al XII-lea

Modele clasice

XII.1. Considerații generale

Modelele dinamice clasice consideră, pentru descrierea dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste un sistem cu un *număr de grade de libertate fixat*. Numărul gradelor de libertate este dat de *suma dintre numerele de masă ale nucleelor care se ciocnesc*, anume: $A = A_P + A_T$. Starea unui sistem la un moment dat este descrisă printr-un punct într-un spațiu 6-dimensional (*spațiul fazelor*). Probabilitatea de a găsi sistemul într-un punct din spațiul fazelor (\vec{r}, \vec{p}) la momentul t , în elementul de volum $d\Gamma$, este dată de relația:

$$dP = \rho(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A; \vec{p}_1, \dots, \vec{p}_A; t) d\Gamma \quad . \quad (III.1)$$

Aici, $\rho(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A; \vec{p}_1, \dots, \vec{p}_A; t)$ este o funcție de distribuție de A corpuri și este o soluție a ecuației Liouville clasice care descrie un ansamblu microcanonic:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{i=1}^A \left(\vec{r}_i \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \vec{r}_i} + \vec{p}_i \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \vec{p}_i} \right) = 0 \quad . \quad (III.2)$$

Acest tip de ecuație se obține dintr-o ecuație Hamilton de forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \{H, \rho\} \quad , \quad (III.3)$$

atunci când $\{H, \rho\} = 0$

Ecuția Liouville clasică, pentru un ansamblu microcanonic, la echilibru, are forma următoare:

$$\rho = c \delta(E - H(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A; \vec{p}_1, \dots, \vec{p}_A)) \quad , \quad (III.4)$$

unde c este o constantă.

În dezvoltarea modelelor clasice se are în vedere faptul că pentru ciocniri nucleare la energii joase și intermediare se poate considera că forțele nucleare pot fi separate în două părți importante. Cele două părți pot fi legate de interacțiile de distanță lungă, respectiv, de interacțiile de distanță scurtă. În primă parte se presupune o interacție “clasică” mediată de un câmp mezonic repulsiv de tip vectorial. Cea de a doua parte include un câmp atractiv de tip “sigma”, care ia în considerare schimbul de doi pioni între nucleoni [1,2,4,32,33]. Sunt incluse aici, de asemenea, corelațiile stocastice de distanță scurtă.

Pentru multe din modele clasice se consideră că este permisă interacția simultană a mai multor nucleoni și că aceasta poate fi descrisă printr-un potențial de interacție explicit. Pentru astfel de modele se folosesc ecuații newtoniene, ceea ce face ca descrierea mișcărilor nucleonilor să se facă în termenii traiectoriilor și forțelor clasice [14,55-58].

XII.2. Câteva modele clasice folosite în Fizica nucleară relativistă

Unul din primele modele clasice [55] folosește ecuații de mișcare nerelativiste cu considerarea unor forțe de interacție de două corpuri între toți nucleonii. În acest model se neglijează spinii nucleonilor și nu se ia în considerare producerea de mezoni. Nu se face nici o ipoteză asupra stării de echilibru termodinamic pentru sistemul considerat. Potențialul de interacție considerat într-un astfel de model poate să aibă forme diferite. În forma sa inițială modelul folosea un potențial central clasic care lua în considerare interacția fiecărui nucleon cu ceilalți ($A-1$) nucleoni. Acest potențial includea un potențial de tip Yukawa cu termen atractiv și termen repulsiv. Modelul propus poate fi folosit atât pentru ciocniri centrale, cât și pentru ciocniri periferice. Principalele rezultate ale unui astfel de model sunt legate de efectele de evaporare, distribuții unghiulare, densitate nucleară, fenomene de fuzionare/reunire (“coalescence”), viteză de curgere ș.a. Poate fi folosit cu rezultate bune pentru ciocniri nucleu-nucleu la energii de câteva sute de MeV/nucleon.

Indiferent de parametrizările folosite trebuie avută în vedere realizarea unui compromis între *reproducerea secțiunii eficace diferențiale* la $\theta_{CM}=90^\circ$ – care are influență asupra transferului de impuls transversal – pentru *ciocniri neutron-proton și obținerea unor nuclee stabile și energiile lor de legătură*.

Compararea directă cu secțiunile eficace diferențiale experimentale este dezavantajoasă datorită fenomenelor de difracție care pot avea loc și existenței unor efecte cuantice, neincluse în modele clasice, în general . Modelul prezentat în lucrarea [55] nu include, de asemenea, astfel de efecte.

În unele modele de tipul celui propus în lucrarea [55] – cunoscute și ca *modele de forțe newtoniene* – nucleele sunt considerate *ansambluri de neutroni și protoni distribuiți aleator într-o sferă de rază $R=r_0A^{1/3}$* . Pentru evitarea “evaporării” nucleonilor cu cantități mari de energie, datorită părții repulsive a potențialului Yukawa, este necesară *introducerea unor tăieri pentru pozițiile relative dintre nucleoni*. Se consideră, în cele mai multe situații de interes că r_0 este o limită rezonabilă [58]. Trebuie menționat că fenomenul de evaporare există chiar dacă se fac aceste tăieri. De asemenea, în modelele de forțe newtoniene se ia în considerare faptul că *nucleonii au impulsuri Fermi aleatoare*. Unele modele de forțe newtoniene folosesc *cinematică relativistă* și încearcă tratarea exactă a *împrăștierilor multiple* [56]. Prin introducerea mișcării Fermi pentru nucleonii din ambele nuclee care se ciocnesc sunt descrise, în mod corect, spectrele inclusive ale protonilor produși în ciocniri centrale nucleu-nucleu. Nici acest tip de model clasic nu poate descrie producerea de alte particule (mezoni, nuclee ușoare). Nu poate fi folosit pentru descrierea unor ciocniri periferice, iar rezultatele obținute pot fi afectate, pentru ciocniri centrale, de efectele de declanșare a sistemului de detectori.

În unele modele clasice se propune *simularea numerică* a unei ciocniri nucleu-nucleu, la o energie dată [58]. Se fixează un parametru de ciocnire, iar nucleele sunt considerate *ansambluri de neutroni și protoni distribuiți aleator într-o sferă de rază $R=r_0A^{1/3}$* . Limitarea “evaporării” nucleonilor cu cantități mari de energie, datorită părții repulsive a potențialului Yukawa, este făcută prin *introducerea unor tăieri pentru pozițiile relative dintre nucleoni*. Limita aleasă este r_0 . *Nucleonii au impulsuri Fermi aleatoare*. Pentru realizarea simulării numerice a nucleelor care se ciocnesc le sunt atribuite impulsurile corespunzătoare, *în sistemul centrului de masă*, energiei de ciocnire, parametrului de

impact și numerelor lor de masă. Trecerea la sistemul centrului de masă se face prin transformări Galilei. Rezolvarea ecuațiilor Newton se face pentru un sistem de $A=A_P+A_T$ nucleoni. Se ia în considerare existența unui efect de evaporare. La integrarea ecuațiilor

$$\text{Newton} \left(F_i = \frac{\partial \vec{p}}{\partial t} = -\frac{\partial U}{\partial \vec{r}}, \quad U(\vec{r}_i) = \sum_{i \neq j=1}^A V(\vec{r}_{ij}) \right)$$

se are în vedere respectarea conservării energiei. Prin ipotezele sale modelul permite descrierea evoluției în timp a interacției și punerea în evidență a unor fenomene interesante legate de curgerea hidrodinamică a materiei nucleare, cum ar fi cele de “împroșcare laterală” (“side-splash”) și de salt (“bounce-off”). Dă acorduri bune cu rezultatele experimentale pentru ciocniri nucleu-nucleu la energii sub 1 A GeV.

În încercarea de a explica anumite fenomene observate experimental, de-a lungul primei perioade a etapei sistemelor de accelerare, au fost propuse modele care luau în considerare tipuri de mecanisme de reacție specifice *interacțiilor directe* la energii joase. Un astfel de model este cel care folosește un *mecanism de “knock-out”* [59,60]. Modelul se bazează pe ipoteza că anumite regiuni cinematice din spectrul protonilor produși în ciocniri nucleu-nucleu la energii intermediare și mari rezultă din *împrăștieri simple ale nucleonilor din regiunea de suprapunere a nucleelor care se ciocnesc*. Datorită absenței împrăștierilor suplimentare pentru acești protoni nu apare fenomenul de *termalizare* pe direcții perpendiculare pe direcția de mișcare a nucleelor din fasciculul incident, în sistemul centrului de masă nucleu-nucleu. În plus, protonii care provin din interacție directă prin mecanism de “knock-out” au energie cinetică mare [61,62].

Descrierea *regiunii de energie mare a spectrului protonilor* se poate face, în aceste ipoteze, cu ajutorul unei relații de forma următoare:

$$\frac{d^2 \sigma}{d\Omega dE} = \sigma_{PT} N_{PT} \left\langle \frac{Z}{A} \right\rangle F\left(\theta, E, \frac{E_P}{A}\right) \quad . \quad (III.5)$$

În relația (III.5) σ_{PT} este *secțiunea eficace totală* nucleu-nucleu la energia la care are loc ciocnirea considerată, N_{PT} este *numărul de împrăștieri de “knock-out” pe fiecare*

ciocnire, ponderat pe parametrul de ciocnire, $\left\langle \frac{Z}{A} \right\rangle = \frac{1}{2} \left(\frac{Z_P}{A_P} + \frac{Z_T}{A_T} \right)$, iar $F\left(\theta, E, \frac{E_P}{A}\right)$ este

o funcție universală care descrie cinematica de “knock-out”.

Mecanismul de ciocnire de tip “knock-out” se poate folosi pentru descrierea rezultatelor experimentale obținute în ciocniri nucleu-nucleu care au loc la energii până la 800 A MeV.

Trebuie arătat că, deși mecanismul de ciocnire de tip “knock-out” implică energii de ciocnire pe nucleon la care împrăștierea nucleon-nucleon este neimportantă sau este interzisă din punct de vedere cinematic, utilitatea modelului este dată de faptul că protonii de “knock-out” dau informații asupra unor *stări de neechilibru* din regiunea de suprapunere a nucleelor care se ciocnesc, precum și asupra materiei nucleare din vecinătatea acesteia. De asemenea, corelațiile dintre protoni sunt sensibile la cinematica mecanismului de “knock-out”, cu deosebire cele de doi protoni. De aceea, ele pot fi folosite la separarea experimentală a protonilor după tipul de împrăștiere (împrăștiere simplă sau împrăștiere multiplă). În cazul ciocnirilor nucleu-nucleu la energii la care împrăștierea inelastică devine importantă compararea predicțiilor modelului cu rezultatele experimentale devine dificilă sau imposibilă (în funcție de energia incidentă și de procesele care au loc în regiunea de suprapunere).

XII.3. Potențiale folosite în modele clasice pentru ciocniri nucleare relativiste

Printre potențialele folosite se numără și unul care ia în considerare diferite interacții de două corpuri și este format din 4 termeni, anume: *interacție tare* (descrisă de un potențial Yukawa, V_Y), *interacție locală* (potențial de tip Skyrme, V_l), *interacție coulombiană*, V_{Coul} , *interacție dependentă de impuls*, V_p . Potențialul total se poate scrie astfel:

$$V = V_Y + V_l + V_{Coul} + V_p \quad . \quad (III.6)$$

Formele unora dintre potențiale folosite în relația anterioară sunt:

$$V_Y = V_{0Y} \frac{e^{-a|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} \quad , \quad (III.7)$$

$$V_l = V_{0l} \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \quad , \quad (III.8)$$

$$V_{Coul} = V_{oCoul} \frac{Ze^2}{r}, \quad (III.9)$$

$$V_p = V_{op} \left\{ \left[\ln^2 \left(t_5 \left(\vec{p}_1 - \vec{p}_2 \right)^2 + 1 \right) \right] \delta \left(\vec{r}_1 - \vec{r}_2 \right) \right\}. \quad (III.10)$$

Termenul Yukawa se introduce, de obicei, pentru a îmbunătăți proprietățile interacției la suprafața nucleului. Acestea sunt importante pentru descrierea proceselor de fragmentare.

Trebuie menținut faptul că există mai multe moduri de rezolvare a problemei interacției care are loc. Ele depind și de forma funcției de stare și de tipurile de interacții considerate. Astfel, se poate aproxima funcția de stare (de undă) pentru interacția a doi nucleoni prin o expresie care să includă forme Gauss, în aproximația impulsului. În acest caz, se poate scrie:

$$\psi_i(\vec{r}, t) = \frac{1}{\sqrt{(\pi R)^3}} e^{\left[\frac{i \vec{p} \cdot \vec{r} - \frac{(\vec{r} - \vec{r}_i(t))^2}{R}}{\hbar} \right]}. \quad (III.11)$$

Pentru o astfel de funcție de stare termenul de interacție de tip Skyrme include un potențial de mai multe corpuri care poate determina repulsii între nucleoni pentru densități nucleare mari. Acest potențial este de forma următoare:

$$V = V_{01} \sum_{i,j \neq i} \frac{e^{\left[\frac{-(\vec{r}_i - \vec{r}_j)^2}{2R} \right]}}{\sqrt{(2\pi R)^3}} + V_{03} \sum_i \left\{ \sum_{j \neq i} \frac{e^{\left[\frac{-(\vec{r}_i - \vec{r}_j)^2}{2R} \right]}}{\sqrt{(2\pi R)^3}} \right\}^\gamma. \quad (III.12)$$

La determinarea valorilor lui V_{01} și V_{02} se folosesc unele proprietăți ale materiei nucleare în stare fundamentală. Cele mai folosite sunt *energia de legătură* (-16 MeV) și *densitatea nucleară normală* ($\rho = \rho_0 = 0.17 \text{ Fm}^{-3}$).

Parametrul γ care apare în al doilea termen al relației (III.12) are valori diferite în funcție de tipul de *ecuație de stare*. El este introdus pentru a fixa *compresibilitatea materiei nucleare în stare fundamentală*. De exemplu, pentru o *ecuație de stare* “moale” (“soft”) se consideră o *compresibilitate* a materiei nucleare în starea fundamentală $K=200 \text{ MeV}$, ceea ce determină un *parametru* $\gamma=7/6$. În cazul unei *ecuații de stare* “tari” (“hard”)

valoarea cea mai folosită a parametrului γ este $\gamma=2$, ceea ce implică o *compresibilitate* a materiei nucleare în starea fundamentală $K=380 \text{ MeV}$.

Există numeroase alte tipuri de potențiale și parametrizări folosite în studiul ciocnirilor nucleare la energii intermediare și înalte. Unele dintre ele sunt legate și de alte tipuri de modele ale mecanismelor de ciocnire și vor fi discutate în capitolele următoare. Altele pot fi găsite în referințele bibliografice date în curs.

XII.4. Câteva remarci finale

În folosirea modelelor clasice pentru descrierea dinamicii ciocnirilor nucleare la energii intermediare și înalte există unele rezultate de interes în cunoașterea proprietăților și structurii materiei nucleare aflate în condiții de densitate și temperatură diferite. Aceste rezultate sunt legate de faptul că există posibilitatea ca în acest mod să se producă *o apropiere de soluția pentru problema a n corpuri în interacție*. Se pot studia, de asemenea, *efectele miezului repulsiv asupra comportării suprafeței nucleare și proprietăților materiei nucleare* aflate la diferite densități și temperaturi. Un alt rezultat important al folosirii modelelor clasice în studiul mecanismelor de ciocnire la energii intermediare și înalte este legat de posibilitatea *studierii efectelor de retrardare*.

Pe lângă succesele menționate, modelele clasice folosite în studiul dinamicii ciocnirilor nucleare la energii intermediare și înalte, cu deosebire cele de forțe newtoniene clasice, prezintă unele dezavantaje. Cele mai importante sunt cele determinate de faptul că *potențialele clasice dau o aproximație săracă a proprietăților împrăștierii nucleon-nucleon și legăturii nucleare*. De asemenea, *există dificultăți la realizarea unor generalizări relativiste*.

Concluzia la descrierea folosirii modelelor clasice pentru descrierea dinamicii ciocnirilor nucleare la energii intermediare și înalte este aceea că *aceste modele descriu cu succes parțial interacțiile ionilor grei la energii intermediare*.