

Partea I-a

Mijloace și metode experimentale

în Fizica nucleară relativistă

Capitolul I

Apariția Fizicii nucleare relativiste.

Direcții de dezvoltare

Studiile intense întreprinse după cel de al doilea război mondial în domeniul *Fizicii nucleare și particulelor elementare* au inclus și multe experimente care foloseau radiația cosmică primară pentru inducerea unor interacții de interes. Aceste studii au permis descoperirea **componentei de ioni grei relativști a radiației cosmice primare**. Această descoperire – făcută în anul 1948 de către Freier și colaboratorii săi – au pus bazele unui domeniu nou și extrem de interesant al *Fizicii nucleare*, anume: ***Fizica nucleară relativistă***. Există foarte multe moduri de definire pentru acest domeniu. Una din definiții consideră că *Fizica nucleară relativistă este fizica fenomenelor multibarionice care se produc atunci când pătratul impulsului pe nucleon este mai mare decât pătratul masei de repaus a nucleonului: $p_N^2 \geq m_N^2$ (relație scrisă folosind sistemul natural de unități)*.

Primele studii de Fizică nucleară relativistă făcute în experimente cu ioni grei relativști din radiația cosmică primară au evidențiat unele caracteristici fundamentale ale ciocnirilor nucleu-nucleu la energii înalte. Printre acestea se numără: *secțiuni eficace de interacție mari, multiplicități mari ale particulelor cu sarcină, existența unor fragmente*

nucleare grele, abundența particulelor neutre în starea finală, dependența dinamicii ciocnirii de geometria ciocnirii. Etapele următoare din evoluția Fizicii nucleare relativiste au confirmat complexitatea deosebită a interacțiilor specifice domeniului.

Complexitatea deosebită a ciocnirilor nucleu-nucleu la energii înalte și foarte înalte impune mijloace și metode experimentale deosebite pentru obținerea de informații experimentale semnificative, utile în cunoașterea structurii materiei nucleare și a interesantelor procese și fenomene fizice care se produc aici. De aceea, este necesar ca experimentele să asigure toate condițiile pentru obținerea unei informații experimentale cât mai complete și să permită o analiză rapidă, corectă și completă a acesteia. Pentru asigurarea acestora este necesară cunoașterea principiilor de bază ale principalelor mijloace experimentale existente în prezent, precum și a fundamentelor fizice ale metodelor experimentale folosite. De complexitatea și performanțele mijloacelor experimentale, precum și de profunzimea bazelor fizice și adecvarea metodelor experimentale depinde calitatea informației fizice obținute. De aceea, este necesară cunoașterea acestora, iar prima parte a cursului se va ocupa de prezentarea celor mai importante aspecte referitoare la mijloacele și metodele experimentale din Fizica nucleară relativistă. Prezentarea lor va ține seama de cele două etape majore din istoria acestui domeniu, anume:

(i) etapa razelor cosmice [1-3];

(ii) etapa sistemelor de accelerare [1-3].

Remarcă În curs, prin sistem de accelerare se înțelege aceea combinație de mai mulți acceleratori folosită pentru obținerea energiei finale pe nucleon pentru tipul de ion accelerat, fiecare dintre acceleratori având un rol bine definit în obținerea tipului de fascicul dorit și a energiei acestuia.

Prima din aceste etape a debutat în anul 1948 odată cu descoperirea de către Freier și colaboratorii săi a componentei de ioni grei relativiști a radiației cosmice primare și folosirea ei în experimente care foloseau ca detectori emulsiile nucleare. Acestei prime etape din dezvoltarea Fizicii nucleare relativiste îi revine meritul de a fi relevat - în pofida dificultăților legate de condițiile experimentale - problemele fundamentale ale domeniului.

*Cea de a doua etapă a început odată cu intrarea în funcțiune a primului sistem de accelerare pentru ioni grei relativiști, în luna august a anului 1970, la **Institutul Unificat de Cercetări Nucleare (IUCN) de la Dubna** (azi, în Rusia) [1-6]. Acest sistem de accelerare a fost Sincrofazotronul U-10 - care accelera, până atunci, numai protoni la energii până la 10 GeV - dotat cu o nouă sursă de ioni și un accelerator liniar intermediar pentru injectarea fasciculului dorit în sincrofazotron.*

În cadrul acestei a doua etape putem distinge câteva **perioade** care au trăsături specifice, atât în plan experimental, cât și în cel al abordărilor teoretice. Obiectivele urmărite în experimente au depins de acestea. Se pot distinge **trei perioade** importante în cadrul etapei sistemelor de accelerare. Prima perioadă este cuprinsă între anii 1970 și 1986. Ea se caracterizează prin *sisteme de accelerare care permit energii de accelerare de câțiva GeV/nucleon și are ca obiective fundamentale determinarea unor caracteristici generale ale ciocnirilor nucleare relativiste și stabilirea unor mecanisme de producere de particule*. Cea de a doua perioadă începe în anul 1986, prin intrarea în funcțiune a unor sisteme de accelerare care permit energii de accelerare de zeci și sute de GeV/nucleon, cum sunt cele de la **Centrul European de Cercetări Nucleare** [*Centre Européen des Recherches Nucléaires (CERN)*] din Geneva (Elveția) și de la **Laboratorul Național Brookhaven** [*Brookhaven National Laboratory (BNL)*] din Upton, New York, SUA. Obiectivelor anterioare ale experimentelor de Fizică nucleară relativistă le pot fi adăugate *căutări mai sistematice ale semnalelor experimentale ale unor tranziții de fază în materia nucleară*, cu accent deosebit pe căutarea *tranziției de fază la plasma de cuarci și gluoni*. Această perioadă a etapei a doua este continuată de cea de a treia perioadă, anume cea a *sistemelor de accelerare de tip "collider"*. Ea debutează în anul 1999 prin intrarea în funcțiune a **Collider-ului pentru ioni grei relativiști** [*Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)*] de la **Laboratorul Național Brookhaven (SUA)**. Obiectivul major al celei de a treia perioade este *punerea în evidență a tranziției de fază la plasma de cuarci și gluoni în ciocniri nucleu-nucleu la energii peste 100 A GeV, în sistemul laboratorului*. Evidențierea formării plasmei de cuarci și gluoni va permite *stabilirea unor conexiuni cu fenomenele care au avut loc în prima microsecundă de la "Explozia primordială" ("Big Bang")*. Se va împlini astfel ceea ce *David Scott* spunea cu aproape două decenii în urmă: **"Fizica nucleară relativistă a început în ceruri și tot acolo se va împlini"** [2]. Prin

aceasta se va demonstra rolul fundamental al Fizicii nucleare relativiste, anume cel de punte de legătură între Fizica nucleară clasică, Fizica particulelor elementare și Cosmologie [3,7].

Sistemele de accelerare construite în cele trei perioade ale etapei a doua coexistă, aducându-și contribuțiile specifice la dezvoltarea domeniului Fizicii nucleare relativiste.

O problemă majoră care se pune în studiul ciocnirilor nucleu-nucleu la energii înalte este aceea a detectării numeroaselor particule și fragmente create în astfel de ciocniri. Datorită ratei mari de informații și necesității stabilirii unui număr mare de mărimi care să caracterizeze o particulă detectată sau un fragment detectat este de dorit ca în astfel de experimente să se folosească sisteme de detectori care să dispună de un anumit număr de **nivele de decizie**. În prezent se consideră 5 nivele de decizie pentru un sistem de detectori dintr-un aranjament experimental pentru studiul ciocnirilor nucleu-nucleu la energii înalte, și anume:

- (i) declanșare primară;*
- (ii) declanșare secundară;*
- (iii) lucrul "în linie" cu microprocesoare programabile;*
- (iv) filtrare "în linie" a informației înainte de înregistrare;*
- (v) monitorare și control "în linie" cu ajutorul calculatorului.*

Detectorii care fac parte din astfel de sisteme folosite în prezent în experimente de Fizică nucleară relativistă **nu** au la bază principii de detecție noi [1,3,5-12]. Ei sunt incluși în *aranjamente experimentale complexe* pentru a se *obține maxim de informație experimentală* în problema de interes abordată. Intrarea în funcțiune a sistemelor de accelerare de tip "collider" va face necesară apariția unor principii de detecție noi [13-15].

Gama de detectori folosiți în experimentele de până acum este extrem de largă - de la emulsii nucleare la detectori solizi de urme și calorimetre - iar aranjamentele experimentale cuprind mai multe tipuri de astfel de detectori. Toate marile laboratoare care lucrează în domeniul Fizicii nucleare relativiste dispun de mai multe sisteme de detectori deosebit de complexe, dedicate unor anumite tipuri de experimente [1,3,6-12].

Metodele experimentale asociate sunt în concordanță cu sistemele de accelerare și sistemele de detectori folosite. În cele ce urmează se vor prezenta unele noțiuni de bază pentru Fizica acceleratorilor și Fizica detectării radiațiilor nucleare pentru o mai bună înțelegere a problemelor care se pun într-un experiment de Fizică nucleară relativistă. Sunt prezentate și cele mai folosite sisteme de acceleratori și de detectori în câteva mari laboratoare din lume care fac studii în domeniu.

Capitolul al II-lea

Obținerea fasciculelor de ioni grei relativști

II.1. Etapa razelor cosmice

În cazul radiației cosmice primare componenta de ioni grei relativști se caracterizează printr-o intensitate slabă, iar erorile experimentale în determinarea sarcinii, masei și energiei ionilor componenți sunt mari. Controlul extrem de limitat asupra condițiilor experimentale - incluzând imposibilitatea plasării sistemelor de emulsii nucleare în câmpuri magnetice adecvate - nu a permis crearea de aranjamente experimentale care să permită "pași" prea numeroși în aprofundarea domeniului. Totuși, experimentele făcute au permis să se sublinieze rolul hotărâtor al geometriei ciocnirii în dinamica ciocnirii, determinarea unor caracteristici de bază - secțiuni eficace mari și multiplicități mari pentru diferite tipuri de particule - precum și evidențierea unor fenomene "exotice", cum ar fi producerea de hipernuclee [4,16].

Remarcă. Un hipernucleu este un nucleu în care unul sau mai mulți nucleoni au fost înlocuiți cu hiperoni. Hiperonii sunt de diferite tipuri (Λ , Ω , Σ , Ξ ...).

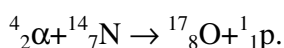
Multe din rezultatele obținute în această etapă au fost legate și de dezvoltări în alte domenii ale Fizicii nucleare și particulelor elementare. De aceea, Fizica nucleară relativistă nu a fost percepută totdeauna, în această etapă, ca un domeniu distinct.

II.2. Etapa sistemelor de accelerare

II.2.1. Acceleratori de particule. Caracteristici generale

De acceleratori de particule sunt legate multe din rezultatele fundamentale ale Fizicii nucleare, Fizicii particulelor elementare și Fizicii nucleare relativiste. Apariția acceleratoarelor a fost determinată de necesitatea investigării structurii nucleare și stabilirii proprietăților dinamice ale nucleelor. Se cunoaște faptul că, una din ideile fundamentale ale începuturilor Fizicii nucleare a fost aceea de a investiga structura atomică folosind radiațiile α și β avute atunci la dispoziție [17,18]. Dacă încercările lui Lenard, bazate pe folosirea radiației β , nu au fost încununate de succes, cele ale lui Rutherford, bazate pe folosirea radiației α , au fost cele care au confirmat discontinuitatea materiei la nivel atomic, existența unei structuri atomice și existența nucleului atomic.

Studiile făcute de către Geiger și Nuttall, concretizate în anul 1912 prin legea care le poartă numele [17,18], au arătat faptul că energiile cinetice ale particulelor α emise de nucleeele radioactive erau cuprinse între 2 MeV și 9 MeV. Aceste energii nu păreau suficiente pentru a putea evidenția o posibilă structură a nucleului atomic. Ele au fost, totuși, suficiente pentru a pune în evidență doi constituenți fundamentali ai nucleului atomic: **protonul și neutronul** [17,18]. Descoperirea primului este legată de realizarea primei transmutații nucleare, anume:



Ea a fost descoperită în anul 1919 de către **Ernest Rutherford**. Cea de a doua componentă a nucleului a fost descoperită tot pe baza studiului transmutațiilor nucleare. Autorul descoperirii este tot un fizician englez, din școala lui Rutherford, anume: **James Chadwick**. El a studiat atent unele fenomene observate de către Bothe și Becker, în anul 1930, fenomene confirmate de către Iréne Joliot Curie și Frédéric Joliot Curie, în anul 1932. Aceste fenomene apăreau la bombardarea nucleelor de beriliu și litiu cu particule α . Ele erau legate de apariția unor presupuse cuante γ care dădeau naștere, în parafină,

unor protoni de recul. Măsurătorile sale, făcute cu o cameră de ionizare, confirmate de măsurătorile lui Feather (1932), precum și calculele sale, au confirmat existența unei noi particule: neutronul.

Între cele două evenimente majore pentru destinul Fizicii nucleare s-au consemnat alte descoperiri la fel de importante, fără de care Fizica nucleară și Fizica nucleară relativistă nu ar fi atins nivelele actuale de dezvoltare.

O serie dintre descoperirile majore care s-au făcut a fost determinată de introducerea ideii de masă de repaus de către **Albert Einstein**, în anul 1905, în cadrul **teoriei relativității**.

O alta a fost determinată de introducerea ipotezei dualismului undă-corpusul de către **Louis de Broglie**, în anii 1924-1925. Conform acestei ipoteze, unei particule cu masă de repaus nenule, având un impuls \vec{p} , îi poate fi asociată o lungime de undă, λ_B . Legătura dintre cele două mărimi definitorii pentru comportamentul corpuscular, respectiv, ondulatoriu, este dată de următoarea relație de legătură:

$$\lambda_B = \frac{h}{p} \quad . \quad (\text{I.1})$$

Prin această definiție lungimea de undă asociată (lungimea de undă de Broglie) devenea o măsură cantitativă a micimii necesare sistemului nuclear incident pentru a “vedea” structura țintei. Se confirma faptul că particulele α emise de nuclee care prezentau fenomenul de radioactivitate naturală nu puteau fi folosite pentru evidențierea structurii interne a nucleului, datorită lungimii de undă de Broglie mult pre mari.

O idee contemporană cu ipoteza dualismului undă-corpusul este cea a lui **Ising**, din anul 1924. Ea se referea la posibilitatea accelerării particulelor cu sarcină în câmp electric variabil. S-a avut în vedere faptul că o accelerație paralelă cu viteza determină o modificare în mărime, fără a afecta direcția, iar o accelerație perpendiculară pe viteză determină o modificare în direcție, fără a schimba mărimea vitezei. Apare astfel idea folosirii câmpurilor magnetice pentru confinarea mișcării la limite practice. Odată cu ea se impune, alături de sarcina specifică ($\frac{q}{m}$), o mărime importantă pentru definirea tipurilor de acceleratori de particule și ioni: rigiditatea magnetică a particulelor. Ea se definește ca produsul dintre inducția magnetică și raza de curbură. Rigiditatea magnetică rezultă din egalitatea forței Lorentz cu forța centripetă, pentru o particulă dată; se obține:

$$Br = \frac{mv}{q} \quad , \quad (\text{I.2})$$

unde B este inducția magnetică, r este raza de curbură, m este masa particulei/ionului, q este sarcina particulei/ionului, iar v este viteza de accelerare a sistemului nuclear considerat.

Se poate stabili o legătură între dimensiunea sistemului de investigat, d, impulsul sistemului nuclear incident (particulă sau ion), p, și valoarea câmpului electric accelerator, E. Din relația (I.1) se obține:

$$\lambda_B \leq d \quad . \quad (\text{I.3})$$

Folosind constanta Planck redusă, $\hbar = h/2\pi$, se poate introduce lungimea de undă asociată redusă, $\lambda_B = \lambda_B/2\pi$. Condiția (I.3) se poate scrie astfel:

$$p \geq \frac{\hbar}{d} \quad . \quad (\text{I.4})$$

Folosind, pentru energia cinetică, o relație de forma $E_{cin} = \frac{p^2}{2m}$ se obține, din relațiile anterioare, următoarea expresie:

$$\frac{E_{cin}}{mc^2} = \frac{1}{2d^2} \left(\frac{\hbar}{mc} \right)^2 \quad . \quad (\text{I.5})$$

Considerând lungimea de undă redusă Compton a sistemului nuclear folosit pentru investigare, $\lambda_C = \frac{\hbar}{mc}$, se obține relația:

$$\frac{E_{cin}}{mc^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\hbar}{d} \right)^2 \quad . \quad (\text{I.6})$$

Forța electrică care acționează asupra particulei este dată de relația: $\vec{F} = q\vec{E}$.

Considerând modulul câmpului electric accelerator de forma:

$$|\vec{E}| = \frac{V}{d},$$

se ajunge la următoarea expresie a energiei necesare pentru accelerarea particulei:

$$E = qV.$$

Experiența anterioară, legată - în principal - de spectrometria de masă, sugera necesitatea unui vid cât mai bun pentru a nu se pierde energie prin ciocniri suplimentare cu atomii mediului respectiv.

Au fost stabilite astfel elementele de bază ale unui accelerator de particule. Ele sunt:

- sursa de particule/ioni;
- camera de accelerare;
- camera de reacție - include ținta;
- dispozitiv de putere pentru sursa de ioni, camera de accelerare ș.a.;
- sistem de alimentare cu atomi pentru sursa de ioni;
- pompe de vid și sistem de asigurare a vidului;
- colector de fascicul.

În Fig.I.1. este prezentată schema bloc a unui accelerator.

Pentru orice accelerator sau sistem de accelerare este foarte important să se estimeze rata de reacție pentru un anumit tip de interacție, la o energie dată. Rata de reacție, R , se definește ca fiind produsul dintre secțiunea eficace a procesului de interacție la energia respectivă, σ , și luminozitatea fasciculului, L :

$$R = \sigma.L \quad (I.7)$$

Luminozitatea fasciculului, L , este dată de relația următoare:

$$L = (vnN_i)/A \quad (I.8)$$

unde v este frecvența, pentru fascicul, n este numărul de “mănunchiuri” de particule, N_i este numărul de particule dintr-un “mănunchi” (bunch), iar A este aria fasciculului. Pentru sisteme de accelerare de tip “collider” trebuie să se ia în considerare numărul de particule din fiecare “mănunchi” și relația (I.8) se va scrie astfel:

$$L = (vnN_{i1}N_{i2})/A \quad (I.9)$$

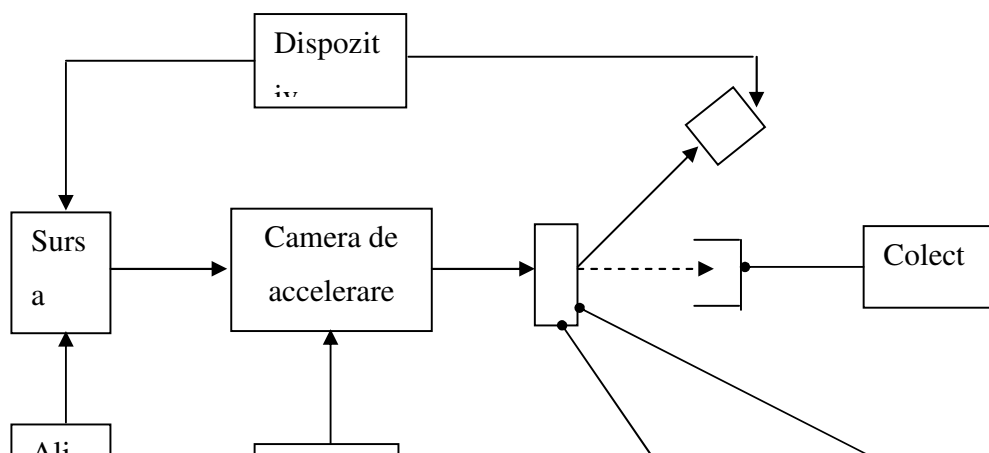


Fig.I.1. Schema bloc a unui accelerator

De la primul accelerator liniar realizat de către fizicianul norvegian Wideroe, în anul 1928, și de la primul accelerator circular realizat de către fizicianul american Lawrence, între anii 1928 și 1932, [17,18] acceleratori de particule și de ioni grei au cunoscut numeroase dezvoltări și perfecționări, de la sursa de ioni și sistemul de obținere a vidului la forma și intensitatea câmpului accelerator [19,20]. În experimentele de interes din Fizica nucleară, Fizica particulelor elementare și Fizica nucleară relativistă se folosesc, de cele mai multe ori, sisteme complexe de acceleratori pentru obținerea naturii, energiei și intensității dorite pentru fascicule. De aceea, este utilă cunoașterea caracteristicilor generale ale unora dintre acceleratorii folosiți în astfel de sisteme de acceleratori.

II.2.2. Tipuri de acceleratori pentru experimente de Fizică nucleară relativistă

În sistemele complexe de acceleratori folosite în experimente de Fizică nucleară relativistă cele mai folosite tipuri de acceleratori sunt: *acceleratori liniari (tip Alvarez sau tandem), ciclotroane, sincrotrane sau sicrofazotroane de diferite tipuri (cu focalizare slabă, cu focalizare tare, cu gradient alternant), inele de stocare, collider-i*. În unele situații, pentru preaccelerarea și injecția fasciculului de ioni grei se mai pot folosi și alte tipuri de acceleratoare liniare. Unele acceleratoare de electroni pot fi folosite pentru “dezbrăcarea” de electroni a unor ioni care trebuie să fie accelerați, ceea ce mărește sarcina specifică și ușurează procesele de accelerare.

Clasificarea acceleratoarelor se poate face după foarte multe criterii. Unul din cele mai utilizate criterii este cel al formei traiectoriei particulelor care sunt accelerate. Conform acestui criteriu avem de a face cu *acceleratori liniari* și cu *acceleratori circulari (ciclici)*.

Un alt criteriu este legat de modul de producere a tensiunii înalte necesare pentru accelerare. Printre cele mai răspândite metode sunt cele legate de folosirea *generatorilor electrostatici* (acceleratorii respectivi sunt numiți și *acceleratori statici*) și a *oscilatorilor de înaltă frecvență* (acceleratorii respectivi sunt numiți și *acceleratori de rezonanță*). În multe situații de interes există posibilitatea combinării celor două criterii.

Acceleratorii statici cei mai cunoscuți sunt: *acceleratori cu generatori tip Van de Graaff*; *acceleratori cu generatori tip Crockcroft-Walton*; *acceleratori cu transformator cu miez izolator*. Toți sunt acceleratori care determină traiectorii liniare ale particulelor/ionilor accelerați. Dintre aceștia, cel mai folosit în experimente de Fizică nucleară relativistă este *acceleratorul tandem*. El face parte din categoria acceleratoarelor cu generatori tip Van de Graaff. Într-un astfel de accelerator, tip Van de Graaff, o sarcină electrică Q este transportată la unul din capetele unui condensator având capacitatea C . Tensiunea

electrică obținută, $V = \frac{Q}{C}$, este folosită pentru accelerarea ionilor. Sarcinile electrice

pozitive sunt pulverizate pe o bandă izolatoare folosind o tensiune de 20-30 kV. Ele sunt transportate la terminalul condensatorului de către banda izolatoare, mișcată cu ajutorul unui motor. Transferul sarcinilor electrice pe terminal este asigurat de un sistem de perii aflat în interiorul electrodului condensatorului. Ionii pozitivi sunt produși în sursa de ioni și sunt accelerați în coloana de accelerare. Fasciculul care iese din această coloană este, în cele mai multe cazuri, deflectat de către un magnet pe țintă. Sistemul care permite accelerarea poate fi plasat în aer sau într-o încălț care conține un gaz izolator aflat la presiune înaltă. În primul caz, tensiunile care se pot obține sunt mai mici decât tensiunile care se pot obține în cel de al doilea caz. Valoarea maximă este în jur de 12 MV. Acceleratorul de tip *tandem* care folosește un generator de înaltă tensiune de tip Van de Graaff are avantajul că poate dubla această tensiune. La acest tip de accelerator terminalul se află la mijlocul încălț care conține gazul la presiune înaltă. La unul din capete se află sursa de ioni care asigură *ioni negativi*. Aceștia sunt accelerați spre terminalul central. Aici ei sunt “dezbrăcați” de cel puțin doi electroni prin trecerea printr-o foiță de “dezbrăcare” sau printr-un canal care conține un gaz de “dezbrăcare”. Ionii pozitivi obținuți sunt accelerați spre celălalt capăt al încălț și ating o energie corespunzătoare unei tensiuni de accelerare duble. Cu acceleratori de tip tandem se pot

obține fascicule de intensitate mare (până la 100 μA) și cu o rezoluție energetică bună (până la 10 keV). Nu se pot obține energii prea mari (maxim 40 MeV pentru protoni, în prezent). Pot fi foarte utili în experimente de stabilire a structurii nucleare și pot fi folosiți ca sisteme de preaccelerare și injecție în experimente de Fizică nucleară relativistă.

Energii de accelerare mai mari pot fi obținute cu ajutorul unor acceleratori liniari care folosesc oscilatori de înaltă frecvență. Sunt cunoscute două căi de realizare a procesului de accelerare. Prima este legată de ideea inițială a lui Wideroe. O serie de tuburi cilindrice, cu lungimi care cresc după fiecare interval de accelerare, sunt conectate la un oscilator de înaltă frecvență. Tuburile succesive au polarități opuse. Sursa de ioni asigură injectarea ionilor pe axa tuburilor de accelerare. În interiorul tuburilor de accelerare câmpul electric este nul. În spațiile dintre tuburi valoarea câmpului electric alternează cu frecvența oscilatorului. Pentru a asigura accelerarea particulelor/ionilor de interes este necesară asigurarea unei legături între lungimea tubului, viteza de deplasare a particulelor/ionilor în tub și frecvența câmpului electric accelerator. Această legătură impune necesitatea ca particula cu sarcină accelerată să ajungă în intervalul de accelerare dintre tuburi atunci când câmpul electric (tensiunea de accelerare) este în zona valorii maxime. Deoarece viteza particulei/ionului crește în fiecare interval de accelerare este necesar ca lungimea unui tub să crească după fiecare interval de accelerare, ceea ce face ca lungimile atinse de astfel de acceleratori să devină foarte mari. De exemplu, un accelerator liniar care asigură accelerarea electronilor la energii de 20 GeV atinge o lungime de 3.2 km (2 mile) { *Centrul pentru Acceleratori Liniari de la Stanford [Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)], SUA* }. Cel mai mare accelerator liniar de protoni se află la Los Alamos, SUA. Aici sunt accelerați protoni la 800 GeV, valoarea curentului obținut fiind de 1 mA. *Un ajutor deosebit în accelerarea cu astfel de mașini îl dă folosirea magneților supraconductori și a vidului foarte înalt.*

Folosirea acceleratoarelor liniari ridică probleme de *optica fasciculului de particule cu sarcină* deosebite [19,32]. O altă problemă importantă este legată de lungime mare pe care trebuie să o aibă un accelerator liniar pentru a se obține energii foarte mari. De aceea, încă de la începuturile activității în domeniul Fizicii acceleratoarelor s-a pus problema înlocuirii acestui mod de accelerare cu un altul care să permită mișcarea particulelor cu sarcină pe traiectorii circulare și câștigarea de energie suplimentară prin

treceri succesive prin același interval de accelerare. Prima realizare de acest fel aparține fizicianului american *E.O.Lawrence* [19,32,51]. Între 1928 și 1930 el a conceput un nou tip de accelerator, care a fost denumit *ciclotron* [52,53].

Ciclotronul este primul *accelerator ciclic* realizat. El folosește un câmp magnetic extern. Într-un plan perpendicular pe câmp se mișcă particula cu sarcină pe o traiectorie circulară. Pentru particule accelerate la viteze nerelativiste raza de curbură este proporțională cu viteza. Crescând raza de curbură crește și energia. De aceea, la ciclotronul clasic se poate accelera continuu particula utilizând o frecvență de accelerare fixă. Câmpul magnetic este constant și se aplică perpendicular pe două piese cu forme semicirculare, numite *duanți*. Între cei doi duanți se aplică tensiunea electrică de frecvență mare și în acest interval se face accelerarea particulei. În interiorul duanților acționează numai câmpul magnetic și de aceea traiectoria este semicirculară într-un duant. Ca urmare a trecerii prin intervalul de accelerare dintre duanți particula cu sarcină câștigă energie și își modifică raza de curbură, în sensul creșterii ei. Acest lucru se repetă la fiecare trecere prin intervalul de accelerare. De aceea, *traiectoria completă* a particulei în ciclotron este sub formă de *spirală*. La un ciclotron sursa de ioni se află în centru, în spațiul dintre duanți. Extragerea fasciculului se face cu ajutorul unor electrozi de extracție.

Ciclotronul nu este util pentru accelerarea electronilor, deoarece ei devin repede relativități și realizarea condițiilor necesare pentru frecvență și câmp magnetic sunt extrem de dificil de rezolvat din punct de vedere tehnologic. Pentru electroni se folosește, ca accelerator ciclic, cu diferite aplicații, *betatronul*. În acest caz traiectoria este circulară și raza crește la fiecare trecere prin intervalul de accelerare, până la atingerea razei maxime, corespunzătoare tensiunii de accelerare maxime și energiei maxime pentru care a fost construit.

Pentru cazul în care efectele relativiste devin importante – pentru alte particule cu sarcină decât electronul – folosirea ciclotronului clasic nu mai este indicată. Pentru energii mari, la care efectele relativiste sunt importante, s-a construit *ciclotronul izocron* sau *sincrociclotronul*. Se bazează pe modularea în frecvență și este extrem de util pentru injectarea de particule cu sarcină sau ioni grei în alți acceleratori. Cu ajutorul unui astfel

de ciclotron se pot accelera protoni până la 10 GeV și ioni grei cu energii până la 1 GeV/nucleon.

Construirea sincrociclotronului este un pas intermediar spre unul din cele mai folosite tipuri de acceleratori în Fizica energiilor înalte și Fizica nucleară relativistă, anume: sincrotronul. Acest tip de accelerator a fost propus independent de către Veksler [54] și McMillan [55], în anul 1945. Ei au plecat de la observația că se poate folosi un câmp magnetic mai mic la momentul injectării particulei cu sarcină, urmând să fie crescut ulterior, succesiv, corespunzător cu câștigul de energie al particulei accelerate. În acest fel se puteau înlocui duanții – ale căror dimensiuni trebuiau să crească foarte mult cu creșterea energiei – cu cavități de radiofrecvență mai simple. Apăreau 2 probleme noi legate de stabilitatea de fază și de focalizare. Veksler și McMillan au considerat că datorită *trecerii periodice a fasciculului prin câmpul de radiofrecvență și faptului că timpul cât stă pe orbită o particulă depinde de energia sa* trebuie să apară *tendința particulelor de a se grupa la o anumită fază a câmpului de radiofrecvență*. În consecință, particulele cu exces de energie se mișcă mai rapid pe orbită și ajung la o anumită fază mai devreme decât cele care se mișcă cu viteze mai mici. De aceea, ele “văd” un câmp de radiofrecvență mai mic. În schimb, cele care au energii mai mici și se mișcă mai lent pe orbită ajung să “vadă” câmpul de radiofrecvență pentru o fază ulterioară și sunt mai puternic accelerate. Din aceste motive particulele cu sarcină injectate într-un domeniu de faze, corespunzător caracteristicilor câmpului de radiofrecvență avut la dispoziție, vor avea energii în jurul energiei dorite. Pentru fiecare accelerator de acest tip se definește o *arie de stabilitate*. Într-o reprezentare Δp (*depărtarea de la impulsul corect*)- $\Delta\varphi$ (*depărtarea de la faza corectă*) aria de stabilitate are o formă specifică cunoscută sub numele de *diagramă “pește”*. În interiorul arie de stabilitate avem stabilitatea procesului de accelerare, iar în exterior avem instabilitatea acestuia.

În acest fel este rezolvată problema stabilității de fază. Rămâne de rezolvat problema focalizării la astfel de acceleratori. Necesitatea focalizării este determinată de împrăștierea în viteze transversale și poziții a particulelor cu sarcină injectate, în raport cu traiectoria ideală a fasciculului, la energia considerată. În plus, efectele de sarcină spațială cresc aceste divergențe. De aceea, sunt necesare mecanisme care să împiedice creșterea acestor divergențe. Trebuie spus că *problema focalizării se pune pentru toate tipurile de*

acceleratori. Primele tipuri de acceleratori au fost cu *focalizare slabă*. Cea mai delicată problemă în realizarea focalizării este determinată de oscilațiile în plan vertical, în raport cu un câmp magnetic uniform. Efectele de focalizare sunt legate de *indicele câmpului magnetic*. Mărimea se definește astfel:

$$n = -\frac{\frac{dB}{dr}}{r} \quad (I.10)$$

Se cunosc trei tipuri de acceleratori de tip *sincrotron*: cu *focalizare slabă*, cu *focalizare tare*, cu *gradient alternant*.

Acceleratorii de acest tip se numesc, în general, sincrotrone. În țările din fost Uniune Sovietică ele au fost denumite – datorită necesității stabilității de fază, care implică sincronizarea fazelor – *sincrofazotroane*.

Principiul de funcționare al sincrotronului este următorul: *injectorul* trimite particulele cu sarcină cu o energie inițială E_{in} în *inelul de accelerare*. *Dipolii magnetici* montați pe inelul de accelerare determină curbarea traiectoriilor particulelor cu sarcină. Colimarea fasciculului este menținută cu ajutorul *magneților cuadrupolari*. Accelerarea particulelor se face cu ajutorul unui număr de *cavități de radiofrecvență*. *Traectoria reală* a particulelor cu sarcină în sincrofazotron implică *segmente în linie dreaptă* - în interiorul cavităților care determină accelerarea particulelor cu sarcină, *elementelor de focalizare*, precum și a altor elemente - și *segmente circulare* - în interiorul magneților de curbare a traiectoriei. Raza inelului de accelerare, R , este mai mare decât raza de curbură, ρ .

Deoarece în sincrotron nu se poate face accelerarea direct la energia finală E_f într-un singur inel de accelerare este necesar ca particulele cu sarcină să fie *preaccelerate* în acceleratori mai mici.

Cu ajutorul sincrotranelor s-au accelerat, inițial, electroni și protoni. La accelerarea acestor particule la energii mari se pierde energie prin radiație. Pierderea aceasta este cunoscută ca *radiație sincrotronică*. Folosind Electrodinamica clasică se poate arăta că pierderea este semnificativă pentru electroni. Raportul energiilor pierdute este proporțional cu puterea a patra a inversului raportului maselor, anume:

$$\frac{\Delta E(e)}{\Delta E(p)} = \left(\frac{m_p}{m_e} \right)^4 \approx 10^{13}$$

Primul sincrotron de protoni a fost construit în anul 1952, la *Laboratorul Național Brookhaven, Upton, New York, SUA*. El accelera protoni la o energie maximă de 3 GeV și purta numele de *Cosmotron*. În anul 1957 s-a construit – la IUCN Dubna (fosta URSS) – cel mai mare sincrofazotron. El accelera protoni la 10 GeV și s-a numit, de aceea, *U-10* (“uscariteli” înseamnă accelerator în limba rusă; de aici vine litera U în denumirea sa).

Datorită calităților și particularităților constructive sincrotronele au fost folosite ca acceleratori de bază pentru sistemele de accelerare folosite în primele experimente de Fizică nucleară relativistă.

Necesitatea reducerii costurilor mari implicate de folosirea acceleratoarelor în experimente *cu țintă fixă* - experimente desfășurate în *sistemul laboratorului (SL)* – a impus construirea de acceleratori care să permită realizarea unor experimente cu fascicule care se ciocnesc, experimente realizate direct în *sistemul centrului de masă (SCM)*. Ideea aparține lui Kerst și colaboratorilor săi [56], precum și lui O’Neill, din anul 1956 [57]. Ea a fost pusă în aplicare în deceniul al VII-lea al secolului XX. Pentru punerea ei în aplicare a fost necesară rezolvarea unor probleme legate de: *obținerea unui vid înalt, creșterea intensității fasciculelor care se ciocnesc, realizarea focalizării tari a fasciculelor*.

Primele sisteme de accelerare care au permis ciocniri în sistemul centrului de masă au fost cele bazate pe *inele de stocare care se intersectează*. Ele au fost construite pentru prima oară la *Centrul European de Cercetări Nucleare (CERN)* de la Geneva. Primele au fost folosite pentru accelerarea protonilor. Modul de operare pentru un astfel de sistem de accelerare este următorul: particulele cu sarcină (protonii) sunt accelerate într-un sincrotron. După accelerare, sunt extrași printr-un canal tangent la traiectorie și îndreptați către un dispozitiv de stocare și comutare. Un magnet analizator permite trimiterea de “mănunchiuri” de particule, alternativ, pe cele două ramuri ale unui sistem de tip “furcă” cu două brațe. De pe fiecare ramură a “furcii” particulele sunt injectate în câte un inel de stocare. Direcțiile de deplasare sunt opuse. Cele două inele de stocare, practic, se suprapun. Ambele au cavități de accelerare cu radiofrecvență care cresc energia fiecărui “mănunchi” de particule cu cantitatea minimă necesară depărtării de la orbita de injectare inițială. Următorul puls poate fi și el plasat într-o manieră similară, ș.a.m.d. În acest fel

multe particule cu sarcină (protoni) pot fi stocate în inel. Un astfel de inel poate accepta până la 400 de pulsuri, iar curenții care se pot obține pot avea până la 20 A. Ciocnirile dintre fascicule se pot produce într-un anumit număr de intersecții.

Sistemele de accelerare construite în ultimii ani care permit obținerea de ciocniri în sistemul centrului de masă sunt cunoscute sub numele de *collider-i*. Ele pot accelera inclusiv ioni grei cu număr de masă mare ($A \approx 200$). Primul sistem de accelerare pentru protoni și ioni grei relativști a fost construit la *Laboratorul Național Brookhaven* din Upton, Long Island, New York, SUA și se numește *Collider-ul pentru Ioni Grei Relativști [Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)]*. Performanțele sale sunt prezentate la sfârșitul acestei părți a cursului.

Energia obținută este foarte mare, în raport cu cele obținute în experimente cu țintă fixă. Folosind *cinematica relativistă* [58] se poate stabili câștigul imens de energie care îl asigură un astfel de accelerator care permite experimente direct în sistemul centrului de masă.

Un invariant relativist important este masa totală a particulelor generate, M , definită în modul următor:

$$\left(\sum_{j=1}^N E_j \right)^2 - \left(\sum_{j=1}^N \vec{p}_j \right)^2 = M^2 \quad , \quad (I.11)$$

unde N este numărul total de particule din starea finală.

Pătratul energiei disponibile în sistemul centrului de masă se poate determina folosind cuadrivectorii energie-impuls pentru particula/ionul proiectil, P_P , respectiv, pentru particula/ionul țintă, P_T . Se poate scrie:

$$s = (P_P - P_T)^2 \quad . \quad (I.12)$$

Pentru experimente cu țintă fixă expresia pătratului energiei disponibile în sistemul centrului de masă este de forma următoare:

$$s = m_P^2 + m_T^2 + 2E_P m_T \quad , \quad (I.13)$$

unde m_P este masa particulei/ionului proiectil, m_T este masa particulei/ionului țintă, iar

$$E_P = \sqrt{m_P^2 + p_P^2}$$

este energia totală a particulei/ionului proiectil.

În cazul sistemelor de accelerare de tip inele de stocare sau collider pătratul energiei disponibile în sistemul centrului de masă se poate scrie astfel:

$$s = m_p^2 + m_T^2 + 2E_p E_T + 2p_p p_T \quad . \quad (I.14)$$

Având în vedere faptul că la astfel de acceleratori particulele sau ionii care se ciocnesc sunt de același tip – deci $m_p^2 = m_T^2 = m^2$ - și că $p^2 \gg m^2$, pătratul energiei disponibile în sistemul centrului de masă se poate scrie în forma următoare:

$$s = 4E_p E_T \quad . \quad (I.15)$$

Folosind relațiile de mai sus se poate arăta că există într-adevăr o mare economie de energie folosind sisteme de acceleratori de tip “inele de stocare” sau “collider”. Într-un experiment desfășurat la CERN Geneva, folosind sistemul de accelerare cu inele de stocare (ISR = **I**nterscating **S**torage **R**ing), se pot accelera protoni cu impulsul de 30 GeV/c. Energia disponibilă în sistemul centrului de masă, conform relației (I.15) este de 60 GeV. Pentru a obține aceeași energie într-un experiment cu țintă fixă este necesară o energie a fasciculului incident de protoni de circa 1920 GeV! Se observă ușor economia realizată folosind astfel de acceleratori!

II.2.3. Sisteme de acceleratori pentru experimente

de Fizică nucleară relativistă

Cea de a doua etapă a început odată cu intrarea în funcțiune a primului sistem de accelerare pentru ioni grei relativiști, în luna august a anului 1970, la *Institutul Unificat de Cercetări Nucleare (IUCN)* de la *Dubna* (azi, în Rusia) [3-6,19,20]. Acest sistem de accelerare a fost Sincrofazotronul U-10 - care accelera până atunci *protoni* la *energii de 10 GeV* - dotat cu *o nouă sursă de ioni și un accelerator liniar intermediar* pentru *injectarea fasciculului* dorit în sincrofazotron. Dacă la început se puteau accelera numai deuteroni la 4.5 A GeV/c, *după anul 1974* - când s-a pus în funcțiune *o nouă sursă de ioni* - s-au putut accelera, la aceeași *energie pe nucleon, nuclee cu numere de masă $A \leq 20$* . Sursa de ioni folosită era cu *fascicul de electroni și criogenizată*. Ea se numește *CREBIS* (*CREBIS = C*R*yogenic* E*lectron* B*eam* Ion S*ource*). Ea necesită un *vid înalt* (10^{11} Torr) și *un câmp magnetic longitudinal intens*. Principiul de funcționare este următorul: *o anumită cantitate de ioni unisarcină ai elementului de accelerat este introdusă într-un fascicul de electroni de densitate foarte mare (sute de A/cm²), ionii suferă oscilații radiale sub acțiunea câmpului electric al sarcinii spațiale electronice, iar în urma interacțiilor electron-ion se produc ionizări multiple ale ionilor unisarcină*

inițiali, ceea ce face mai ușoară accelerarea acestora. Intensitățile atinse sunt cuprinse între 10^4 (^{20}Ne) și 10^{12} (d) nuclee/puls.

Până în anul 1986 s-au pus în funcțiune și alte sisteme de accelerare pentru ioni grei relativiști, energia la care se făcea accelerarea fiind de câțiva GeV/nucleon. Astfel, în anul 1971 s-a pus în funcțiune - pentru numai 1 an - un sistem de accelerare pentru ioni grei relativiști la Princeton (S.U.A.) [3-6,19,20].

Tot în anul 1971, la Lawrence Berkeley Laboratory (S.U.A.), s-au făcut primele experimente de Fizică nucleară relativistă folosindu-se tot un sincrotron de protoni modificat, anume Bevatron-ul [3-6,19-23]. În acest tip de experimente s-au folosit două variante de sisteme de acceleratori, anume:

(a) Bevatron-ul - care implică sursa de ioni, un accelerator liniar de ioni grei de energii joase (5 MeV/nucleon) - ca injector - și sincrotronul Bevatron;

(b) Bevalac-ul - care implică aceeași sursă de ioni, un accelerator liniar de ioni grei de energii joase, cunoscut sub numele de *Superhilac* (8.5 MeV/nucleon) - ca injector - și sincrotronul Bevatron.

Sistemul de acceleratori *Bevatron* permite accelerarea numai a nucleelor de ^4He și ^{12}C la energii cuprinse între 0.1 și 2.1 GeV/nucleon, iar sistemul de accelerare *Bevalac* permite accelerarea nucleelor cu numere de masă cuprinse între 6 și 20 la energii cuprinse tot între 0.1 și 2.1 GeV/nucleon. Intensitățile fasciculelor sunt cuprinse între 10^8 - 10^{10} nuclee/fascicul la ambele sisteme de accelerare, iar ratele de extragere a fasciculelor sunt cuprinse între 10 fascicule/min (pentru energii mai mari de 0.4 GeV/nucleon) și 15 fascicule/min (pentru energii mai mici de 0.4 GeV/nucleon).

Trebuie menționat faptul că sistemul de acceleratori *Bevalac* permite accelerarea unor nuclee cu numere de masă mult mai mari, și anume: ^{40}Ar , ^{56}Fe , ^{93}Nb , ^{238}U , la energii până la 1.8 GeV/nucleon și intensități între 10^4 și 10^8 nuclee/fascicul.

Pentru unele studii de Fizică nucleară relativistă a fost folosit și sistemul de accelerare Saturne de la Saclay (Franța). Acest sistem de accelerare permite accelerarea nucleelor de ^4He la energia de 1.2 GeV/nucleon, iar intensitatea fasciculului era de $2 \cdot 10^{10}$ nuclee/fascicul la o rată de 15 fascicule/min. Alte tipuri de nuclee, cu numere de masă mai mari, se pot accelera numai până la energii de câteva sute de MeV/nucleon.

Din anul 1986 s-au folosit pentru studii de Fizică nucleară relativistă și alte sisteme de accelerare care erau menite să asigure energii de accelerare mai mari pentru unele nuclee cu numere de masă mai mari [8-11,13,24].

Astfel, la *Brookhaven National Laboratory (Laboratorul Național Brookhaven) din S.U.A.* a intrat în funcțiune, pentru experimente de Fizică nucleară relativistă - în toamna anului 1986 - *Sincrotronul cu gradient alternant* [**Alternating Gradient Synchrotron (AGS)**], folosit anterior numai pentru accelerarea protonilor. Cu ajutorul acestui sistem de accelerare nuclee cu numere de masă până la $A = 32$ sunt accelerate la energii de până la 15 GeV/nucleon. În acest caz sincrotronului de protoni i-a fost atașată o sursă de ioni corespunzătoare și un accelerator de tip tandem ca injector. Ulterior, aici s-au accelerat și nuclee cu numere de masă $A < 200$, la energii în jur de 11 A GeV.

Tot din toamna anului 1986 *Supersincrotronul de protoni de la CERN Geneva* [**Super Proton Synchrotron (SPS)**] a început să fie folosit și el în studii de Fizică nucleară relativistă. În acest caz se pot obține ioni grei relativiști având energii de 60 GeV/nucleon, respectiv, 200 GeV/nucleon [8,11,13,24]. Numerele de masă erau, inițial, până la 32. Apoi ele au fost crescute până la numere de masă mari, specifice aurului (197), plumbului (208) sau uraniului (238) [8,11,13,24]. De această dată între sursa de ioni cu rezonanță ciclotronică și sincrotron se află un întreg sistem de acceleratori care cuprinde: un preaccelerator de tip Alvarez [9], un accelerator liniar de energii joase (de ordinul energiei de legătură pe nucleon în nucleu), un sincrotron. Acest din urmă sincrotron din sistemul de acceleratori folosit ca injector permite obținerea de ioni complet "dezbrăcați" cu o energie de 10 GeV/nucleon.

După anul 1986 în "familia" laboratoarelor care dispun de sisteme de accelerare pentru studii de Fizică nucleară relativistă a intrat și *Institutul de Cercetări pentru Ioni Grei* [*GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung)*] din *Darmstadt, Germania*. Din anul 1990 funcționează sistemul de accelerare format din sincrotronul de ioni grei și inelul de stocare și răcire cu electroni SIS-ESR [2,25]. Marele avantaj al acestui sistem de accelerare constă în faptul că poate accelera ioni grei cu numere de masă $A \leq 238$ la orice energii până la 2 GeV/nucleon. Inelul de stocare și răcire cu fascicul de electroni permite "dezbrăcarea" completă de electroni a atomilor, indiferent de numărul de masă. Cu acest

sistem de accelerare se obțin cele mai mari luminozități; se pot obține, de asemenea, și fascicule radioactive [10].

Sistemul de accelerare complet este format din: sursă de ioni cu rezonanță ciclotronică, accelerator liniar care furnizează fascicule de ioni grei pentru toate elementele cu energii până la 20 MeV/nucleon și care reprezintă un injector pentru următoarea componentă a sistemului, anume sincrotronul de ioni grei de energie medie, iar ca ultimă componentă se numără inelul de stocare și răcire. Mai este prevăzut și cu un separator de fragmente care permite, în principal, obținerea de fascicule secundare, radioactive. Acest sistem de accelerare mai este dotat și cu alte facilități ceea ce îl face extrem de manevrabil, performant și relativ ușor de modificat pentru creșterea performanțelor tehnice.

II.2.3. Perspective în dezvoltarea sistemelor de accelerare

În general, toate marile laboratoare care dispun de sisteme de accelerare pentru ioni grei relativști au fost și sunt preocupate de creșterea performanțelor tehnice ale sistemelor de accelerare de care dispun. Eforturile sunt îndreptate, în principal, spre creșterea energiei pe nucleon a nucleelor incidente, creșterea numerelor de masă ale nucleelor incidente, mărirea intensității și luminozității fasciculului incident. Pe de altă parte, o atenție deosebită s-a acordat introducerii sistemelor de accelerare de tip "collider".

Printre sistemele de accelerare intrate în funcțiune recent se numără și Nuclotronul de la IUCN Dubna [26,27] - care asigură accelerarea unor nuclee cu $A \leq 30$ la energii în jur de 7 GeV/nucleon - și a Numatron-ului de la Tokyo. Sunt în pregătire și alte sisteme de accelerare, cum ar fi: Tevalac-ul de la LBL (S.U.A.), Saturne+Mimas de la Saclay (Franța) ș.a.

Cele mai importante eforturi ale comunității științifice internaționale au fost și sunt, însă, concentrate pentru realizarea - la sfârșitul mileniului al doilea, respectiv, în primul deceniu al mileniului al treilea - a două mari sisteme de accelerare, de tip "collider", la BNL și, respectiv, CERN [26-29], sisteme care să confirme intrarea în cea de a treia perioadă a etapei sistemelor de accelerare.

Sistemul de accelerare de la BNL, numit RHIC - adică **Relativistic Heavy Ion Collider** (Collider-ul de Ioni Grei Relativști) - are la bază Sincrotronul cu Gradient

Alternant și acceleratoarele de injecție existente. Lor le-au fost adăugate o nouă sursă de ioni, un ciclotron - intrat deja în funcțiune înainte de 1999, un sincrotron și un "collider". Acest sistem de accelerare permite ciocniri de nuclee cu $A \leq 200$ la energii de câteva sute de GeV/nucleon, în sistemul centrului de masă. În prezent, collider-ul de ioni grei relativiști de la Laboratorul Național Brookhaven din SUA poate accelera ioni de aur la energii disponibile în sistemul centrului de masă cuprinse între 56 A GeV și 200 A GeV (28 A GeV/c, respectiv, 100 A GeV/c, în sistemul laboratorului). Primele testări au fost făcute în cursul anului 1999, iar primele experimente s-au desfășurat în vara anului 2000 la toate sistemele de detectori asociate, la energii în SCM de 56 A GeV și 130 A GeV. Ele au continuat în anul 2001 la energii în SCM de 200 A GeV, tot pentru ciocniri Au-Au. Fizicienii români au participat activ la desfășurarea achiziției de date experimentale pentru ciocniri Au-Au folosind sistemul de detectori BRAHMS [28,30].

La CERN este în lucru un alt sistem de accelerare, care va fi folosit pentru studii în domenii diverse ale Fizicii energiilor înalte, inclusiv de Fizică nucleară relativistă. El se numește *LHC (Large Hadron Collider)* și va intra în funcțiune în primul deceniu al secolului XXI. Ca și marea majoritate a celorlalte sisteme el folosește sistemele de accelerare anterioare. În acest caz este vorba despre *SPS (Super Proton Sincrotron – Supersincrotronul de protoni)* și *sistemele asociate*. Este important de arătat că noul sistem de accelerare va permite *accelerarea unor nuclee cu $A \approx 200$ până la energii de câțiva TeV/nucleon*. De exemplu, se vor putea accelera nuclee de *plumb* ($A = 208$) asigurându-se energii totale disponibile în sistemul centrului de masă de *1262 TeV*, luminozități în jur de $1.8 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ și intensități de 5×10^{10} ioni/fascicul [26]. Rezultatele preliminarilor sunt încurajatoare, având în vedere faptul că s-a reușit deja - cu o nouă sursă de ioni la SPS - să se accelereze ioni de Pb la 168 GeV/nucleon încă din toamna anului 1994 [11,13].