

Capitolul al III-lea

Detectarea particulelor generate în ciocniri nucleare relativiste

III.1. Considerații generale asupra detectării radiațiilor nucleare

III.1.1. Introducere

Detectarea radiațiilor nucleare se bazează pe procesele de interacție dintre radiația nucleară și materie. De aceea, pentru orice tip de radiație nucleară – particule cu sarcină de mase diferite (de la electroni la ioni grei), particule neutre cu masă de repaus nenulă, radiații electromagnetice ș.a. – trebuie bine cunoscute aceste procese [12,14,15,31,32]. Prin procesul de interacție, radiațiile nucleare transferă o parte din energia lor – uneori,

toată energia disponibilă – mediului cu care interacționează. Acesta este principiul fundamental al detectării radiațiilor nucleare. *Particulele cu sarcină* transferă energia lor materiei prin ciocniri directe cu electronii atomilor, ceea ce provoacă *excitarea* sau *ionizarea atomilor*. *Radiația neutră (fără sarcină electrică)* trebuie să sufere o reacție cu materia care să conducă la particule cu sarcină care, la rândul lor, excită și/sau ionizează atomii mediului respectiv. Forma sub care apare energia convertită în mediu depinde de structura și proprietățile detectorului.

Trebuie menționat faptul că, uneori, prin *sistem de detecție* se înțelege *detectorul de radiații* și *sistemul de prelucrare a semnalului* [31,32].

Remarcă În curs, termenul de sistem de detecție este folosit, uneori, și pentru a descrie sisteme mari de detectori folosiți în experimente complexe de Fizică nucleară relativistă, cu luarea în considerare a sistemelor de prelucrare a semnalelor.

Orice detector de radiații nucleare este format din 3 părți componente importante, și anume:

volumul sensibil;

elementele de structură;

sistemul de formare a semnalului.

În volumul sensibil se produc interacțiunile dintre radiațiile nucleare și materie. În urma acestor interacții se obține informația necesară. Sistemul de formare a semnalului permite extragerea informației obținute în volumul sensibil și pregătirea ei pentru sistemul de prelucrare a semnalului. Elementele de structură implică acea parte a detectorului de radiații care permite menținerea volumului sensibil, sistemului de formare a semnalului și, eventual, a sistemelor de alimentare cu curent electric sau tensiune electrică, într-un tot unitar. La mulți detectori de radiații nucleare, printre elementele de structură se numără și *fereastra de intrare*. Această fereastră de intrare *trebuie să fie transparentă la radiația nucleară care este detectată*. Trebuie remarcat că *orice detector trebuie să dea un semnal de ieșire*.

Natura volumului sensibil al detectorului și *natura semnalului de ieșire* dat de detector sunt două *criterii* importante pentru *clasificarea* acestora. De aceea, se vorbește despre detectori cu gaz, detectori lichizi (cu lichid), detectori solizi (cu corp solid), respectiv, de *detectori cu semnal electric* și *detectori cu semnal neelectric*. Pentru fiecare

tip de detector se obțin diferite semnale de ieșire, iar pentru fiecare tip de semnal există metode diferite de prelucrare [12,14,15,31-35].

Prezentarea detectorilor de radiații nucleare se poate face din mai multe puncte de vedere. Cele mai des folosite sunt cele care discută *tipurile de detectori* în termeni de *structură* și *mod de operare*. O altă cale de interes este cea a *funcțiilor specifice* îndeplinite de detectori. Prima cale este de interes mai mare pentru cei care gândesc și construiesc diferite tipuri de detectori, iar cea de a doua cale este de folos pentru cei care utilizează diferiți detectori. *O tratare completă implică ambele căi.*

III.1.2. Proprietățile și funcțiile detectorilor

Aspectele menționate anterior referitoare la detectorii de radiații nucleare pot fi înțelese mai bine și sunt legate mai profund prin proprietățile fundamentale ale detectorilor și sistemelor de detecție. Trebuie arătat faptul că *tipul de detector* determină proprietățile fundamentale, iar proprietățile detectorului permit stabilirea funcțiilor detectorului.

Detectorii pot avea *șase proprietăți fundamentale*, și anume:

1. *Detecția*
2. *Formarea semnalului de ieșire*
3. *Discriminarea*
4. *Măsurarea de energie*
5. *Măsurarea de timp*
6. *Măsurarea de poziție*

Din cele 6 proprietăți prezentate *numai 2 sunt comune tuturor detectorilor*, anume: ***detecția și formarea semnalului de ieșire.***

Cele șase proprietăți fundamentale menționate determină *cinci funcții de bază* pentru detectorii de radiații. Acestea sunt:

1. *Numărarea*
2. *Măsurarea de energie (Spectrometria de amplitudine a pulsurilor)*
3. *Măsurarea de poziție (Formarea de imagini și traiectorii)*
4. *Măsurarea de timp (Obținerea de informații temporale)*
5. *Dozimetria radiațiilor nucleare*

Fiecare proprietate fundamentală este caracterizată printr-un parametru asociat și printr-o variabilă asociată. Variabila asociată stabilește domeniul de aplicare a unei proprietăți, iar parametrul asociat dă o măsură cantitativă a acesteia.

Parametrul asociat proprietății de detecție este eficacitatea de detecție. Variabila asociată acestei proprietăți este numărul de semnale/pulsuri înregistrate. Pentru proprietatea de formare a semnalului există diferiți parametri asociați, iar variabila asociată este, pentru oricare dintre ei, conținutul de informație. O situație similară se întâlnește și în cazul proprietății de discriminare; și în acest caz există diferiți parametri asociați, iar variabila asociată este, pentru oricare dintre ei, natura radiației. Rezoluția energetică este parametrul asociat proprietății de măsurare de energie. Variabila asociată este, în acest caz, energia. Cea de a cincea proprietate din lista prezentată anterior, măsurarea de timp, are ca parametru asociat rezoluția temporală, variabila asociată fiind timpul. În ceea ce privește proprietatea de măsurare de poziție, parametrul asociat este rezoluția spațială, iar variabila asociată este poziția.

În multe situații se preferă tratarea globală a unor aspecte legate de performanțele detectorilor și se folosește termenul de **caracteristici generale ale detectorilor**. Prin această formulare se regăsesc parametri asociați proprietăților detectorilor, cu unele componente ale lor. Printre aceste caracteristici generale ale detectorilor se numără: *sensitivitatea, răspunsul detectorului, rezoluția energetică, funcția de răspuns a detectorului, timpul de răspuns, eficacitatea de detecție și timpul mort al detectorului*.

Prin **sensitivitate** se înțelege capacitatea unui detector de radiații nucleare de a produce un semnal de ieșire utilizabil pentru un tip de radiație dat și o energie dată. Nici un detector nu este sensibil la toate tipurile de radiație și la toate energiile radiațiilor nucleare. Sensitivitatea unui detector depinde de secțiunile eficace ale proceselor de ionizare în volumul sensibil al detectorului, masa volumului sensibil al detectorului, zgomotul detectorului, natura elementelor de structură (natura materialului care înconjoară volumul sensibil al detectorului), inclusiv a materialului din care este realizată fereastra de intrare. Această caracteristică este legată, în principal, de proprietatea de formare a semnalului.

Răspunsul detectorului este definit ca fiind relația dintre energia radiației și sarcina totală sau amplitudinea pulsului pentru semnalul de ieșire. Este legat de

proprietatea de măsurare de energie. Relația dintre energia radiației și sarcina totală sau amplitudinea pusului pentru semnalul de ieșire este, în cele mai multe situații de interes, una liniară sau aproximativ liniară, pe anumite domenii de energie sau pentru anumite tipuri de radiații. Răspunsul detectorului este, de aceea, dependent și de mecanismele de reacție declanșate în volumul sensibil al detectorului de diferite particule, sau de același tip de particulă dar cu energii în domenii diferite.

Rezoluția energetică este parametrul asociat proprietății de măsurare de energie. Nu toți detectorii au această proprietate. Se definește ca fiind extinderea în energie pentru care detectorul de radiații mai poate detecta două radiații nucleare ca distincte. În mod ideal, maximul care trebuie observat la o măsurare de energie ar trebui să aibă forma unei funcții δ (Dirac). Datorită fluctuațiilor în numărul de excitări și ionizări, specifice proceselor la nivel atomic și nuclear, forma maximului este de tip gaussian. De aceea, rezoluția energetică absolută este definită ca lărgimea totală la semiînălțimea maximului. Rezoluția energetică relativă este definită ca raportul dintre rezoluția energetică absolută și energia pentru care a fost determinată rezoluția energetică absolută. Rezoluția energetică relativă are o anumită dependență de energie. Forma acestei dependențe este determinată de tipul de detector de radiații nucleare folosit. Este una din caracteristicile cele mai importante ale unui detector de radiații nucleare.

Funcția de răspuns a unui detector este legată tot de proprietatea de măsurare de energie. Ea ia în considerare faptul că forma spectrului de energie măsurat prezintă dependență de tipul radiației nucleare detectate. Funcția de răspuns a unui detector la o energie dată este determinată de mai mulți factori, și anume: natura interacțiilor pe care radiațiile nucleare le suferă în volumul sensibil al detectorului, natura volumului sensibil, forma detectorului și geometria de detectare. În mod obișnuit funcția de răspuns a detectorului ia forma spectrului de amplitudini ale pulsurilor radiațiilor nucleare detectate. Ea este diferită de la un tip de detector la altul. De exemplu, forma funcției de răspuns pentru energia de 661 keV a unor radiații γ este diferită pentru un detector cu semiconductor (cu germaniu, de exemplu) și pentru un detector cu scintilație (scintilator organic, de exemplu). În primul caz, datorită faptului că secțiunea eficace pentru producerea efectului fotoelectric este mare în raport cu secțiunea eficace pentru

împrăștiere Compton, la energia considerată, se va observa un maxim datorat efectului fotoelectric foarte înalt și îngust și o distribuție continuă datorată împrăștierii Compton foarte mică. În cel de al doilea caz, datorită faptului că scintilatorul organic are un număr atomic Z mic, se va observa în funcția de răspuns a detectorului numai distribuția continuă datorată împrăștierii Compton, împrăștiere care este predominantă pentru situația considerată.

Timpul de răspuns al detectorului reprezintă timpul necesar pentru formarea unui semnal de ieșire, timp considerat de la ajungerea radiației nucleare pe volumul sensibil al detectorului. Timpul de răspuns al detectorului este asociat proprietății de măsurare de timp. Pentru a îndeplini în condiții optime funcția de măsurare de timp este necesar ca semnalul de ieșire să fie format rapid astfel încât să aibă o lărgime mică (să fie îngust), cu un front de creștere cât mai rapid, aproape vertical. Este importantă și durata semnalului, deoarece în acest interval de timp nu mai poate fi înregistrat un al doilea eveniment. În funcție de natura volumului sensibil al detectorului pe durata înregistrării unui eveniment pot interveni două situații, și anume:

- (a) detectorul este insensibil pentru un al doilea eveniment;
- (b) din cauza prezenței primului eveniment, cel de al doilea eveniment se va suprapune peste primul eveniment; apare așa numitul fenomen de “îngrămădire” (“pile-up”) care contribuie la creșterea *timpului mort* al detectorului de radiații nucleare și la limitarea ratei de numărare.

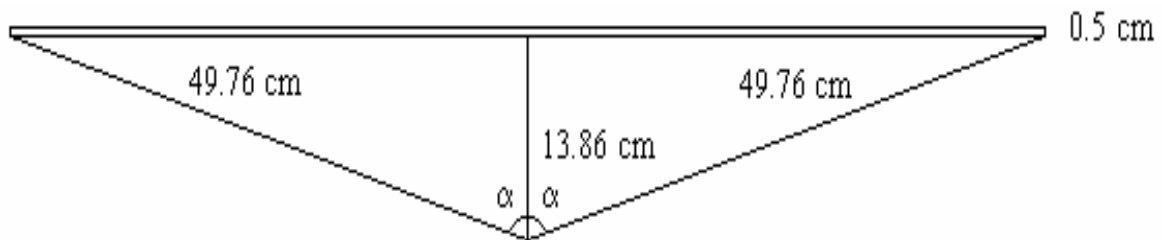
Eficacitatea de detecție este parametrul asociat proprietății de detecție. Se pot întâlni mai multe tipuri de eficacitate de detecție. Cele mai des folosite sunt *eficacitatea de detecție absolută* și *eficacitatea de detecție intrinsecă*. Eficacitatea de detecție absolută sau eficacitatea de detecție totală se definește ca raportul dintre numărul de radiații emise de către sursă și înregistrate (evenimente), în realitate, de către detector și numărul de radiații emise de sursă. De aceea, eficacitatea de detecție totală depinde de geometria detectorului, de distanța de la sursa de radiații la detector, precum și de probabilitatea de interacție în volumul sensibil al detectorului. În cazul în care lungimea traiectoriei străbătute de radiație prin detector nu variază prea mult pentru un anumit detector sau drumul liber mediu este foarte mic, eficacitatea de detecție absolută poate fi factorizată în două componente, și anume: *eficacitatea de detecție intrinsecă*, ϵ_{inb} , și *eficacitatea de*

detecție geometrică, ε_g . Se poate scrie următoarea relația de legătură: $\varepsilon = \varepsilon_{int} \cdot \varepsilon_g$. Trebuie amintit aici faptul că eficacitatea de detecție geometrică este denumită și acceptanță.

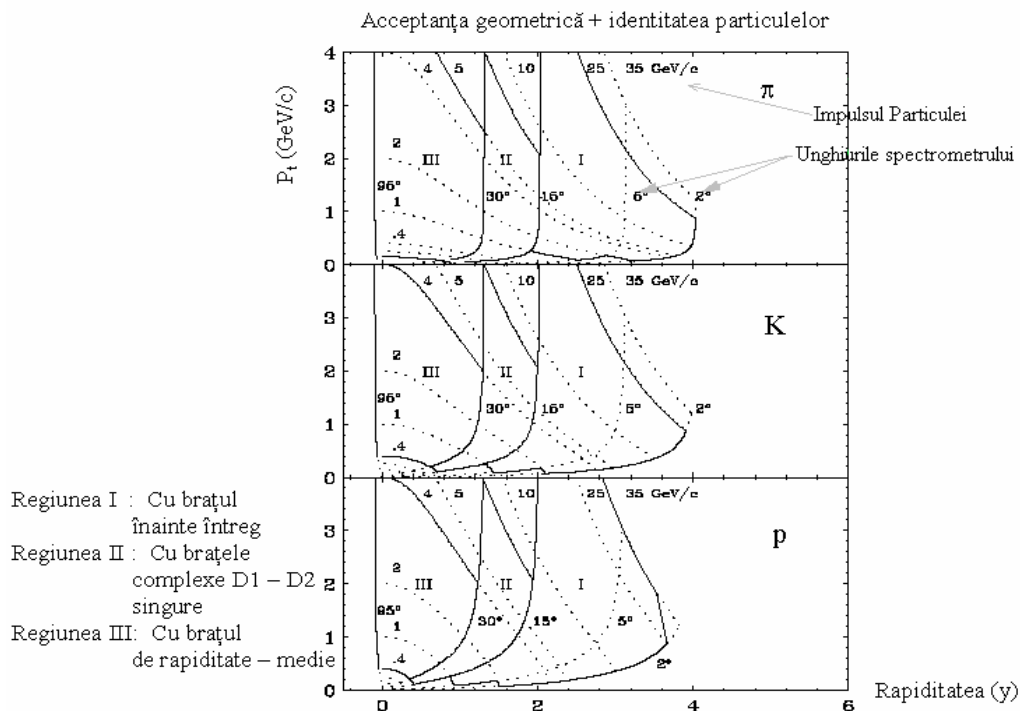
Eficacitatea de detecție intrinsecă este dată de raportul dintre numărul de radiații căzute pe detector și înregistrate de acesta și numărul total de radiații căzute pe detector. Cea mai importantă dependență a eficacității de detecție intrinsecă este cea de secțiunea eficace de interacție a radiației nucleare cu volumul sensibil al detectorului. De aceea, ea este o funcție de tipul de radiație, energia radiației și natura substanței din care este făcut volumul sensibil. În consecință, în multe situații de interes se pune problema dimensiunilor detectorilor pentru a avea o probabilitate de interacție suficient de mare pentru detectarea unor radiații nucleare.

Eficacitatea de detecție geometrică (acceptanța) se poate defini ca fracția din radiația emisă de către o sursă de radiații nucleare care este interceptată (“văzută”) de către detector. Ea depinde de configurația geometrică a detectorului și sursei. Pentru determinarea ei corectă este necesară cunoașterea distribuției unghiulare a radiației nucleare a sursei considerate în experiment.

În cazul aranjamentelor experimentale complexe este necesară realizarea unor simulări Monte Carlo pentru stabilirea acceptanței. În Fig.I.2 este prezentată acceptanța pentru un astfel aranjament experimental. Este vorba de experimentul BRAHMS de la Collider-ul de Ioni Grei Relativiști (RHIC) de la Laboratorul național Brookhaven (BNL) din SUA. El va fi prezentat mai detaliat în curs.



Acceptanța de la Brahms



O altă caracteristică de bază a unui detector este **timpul mort** . El este legat de proprietatea de detecție și de parametrul asociat acesteia, eficacitatea de detecție. Timpul mort reprezintă timpul necesar unui detector de a prelucra un eveniment (radiația nucleară înregistrată). Acest timp este finit și depinde de durata semnalului pentru pulsul considerat. Așa cum s-a mai arătat, un detector de radiații nucleare poate să rămână sau nu sensibil pe perioada prelucrării informației de la un eveniment înregistrat. În cazul în care detectorul nu este sensibil, orice altă radiație care ajunge în această perioadă în volumul său sensibil este pierdută. Dacă detectorul rămâne sensibil, atunci radiațiile care ajung în intervalul de timp necesar prelucrării informației pentru o radiație nucleară înregistrată se pot “îngrămădi” (suprapune) peste radiația înregistrată, ceea ce va determina distorsionarea semnalului de ieșire obținut și pierderi

ulterioare de informație pentru ambele radiații. Sunt afectate astfel ratele de numărare obținute (variabila asociată proprietății de detecție). De asemenea, este distorsionată distribuția temporală a sosirii radiațiilor nucleare pe volumul sensibil al detectorului, ceea ce poate conduce la pierderea unor informații importante. De exemplu, pentru o sursă care emite radiații nucleare în conformitate cu caracterul statistic al dezintegrărilor radioactive se poate ajunge la distribuție temporală care să nu mai fie descrisă de o distribuție de probabilitate de tip Poisson. Pentru reducerea valorilor timpului mort și pentru reducerea efectelor asupra informației experimentale obținute se preferă rate de numărare mai mici care să scadă probabilitatea apariției unui alt eveniment pe perioada înregistrării celui anterior. Există mai multe metode de determinare și măsurare a timpului mort, în funcție de tipul de detector (paralizabil – cu timp mort care se poate extinde, respectiv, neparalizabil – cu timp mort care nu se poate extinde) [14,15,31-37].

În folosirea oricărui detector trebuie avute în vedere proprietățile și funcțiile enumerate, precum și diferitele lor caracteristici. Trebuie ținut seama de faptul că un detector poate să nu aibă toate proprietățile menționate și, de aceea, nu poate îndeplini toate funcțiile. În plus, caracteristicile lor de bază îi pot face mai utili pentru anumite radiații nucleare sau pentru anumite energii ale acestora. În acest mod se poate obține o informație corectă și completă asupra proceselor și fenomenelor fizice investigate.

III.2. Detectori folosiți în experimente de Fizică nucleară relativistă

III.2.1. Informații generale

Gama sistemelor de detecție folosite în experimente de Fizică nucleară relativistă este extrem de largă și implică principii de detecție diverse. În majoritatea aranjamentelor experimentale propuse până în prezent – în absența unor principii de detecție noi – se încearcă combinarea multor tipuri de detectori, astfel încât informația fizică obținută să fie cât mai completă. De asemenea, electronica asociată detectorilor respectivi este tot mai sofisticată pentru ca raportul dintre semnal și zgomot să atingă valori care să permită o analiză adecvată a informației. În experimentele de Fizică nucleară relativistă se întâlnesc domenii extrem de largi de mase, sarcini și energii ale particulelor și fragmentelor detectate, ceea ce impune combinarea diferitelor metode de detecție. De

aceea, într-un aranjament experimental pentru studiul ciocnirilor nucleare relativiste se pot întâlni: spectrometre cu timp de zbor, detectori Cerenkov, detectori care pot măsura energia și pierderea de energie ($E-\Delta E$), scintilatori de diferite tipuri, detectori cu semiconductori, detectori solizi de urme, diferiți detectori cu vizualizare [emulsii nucleare, camere cu bule, camere cu streamer, camere proporționale multifilare, camere cu deplasare (drift), camere cu proiecție temporală ș.a.], spectrometre magnetice, calorimetre de diferite tipuri ș.a.

Trebuie avut în vedere faptul că prin ciocniri nucleare relativiste se produc, așa cum s-a menționat anterior, numeroase particule și fragmente nucleare în starea finală, iar masele, sarcinile și energiile lor sunt extrem de diverse. În aceste condiții o multitudine de aspecte trebuie avute în vedere pentru extragerea informației de interes asupra fiecărei dintre particulele și fragmentele detectate. De aceea, orice detector complex sau orice sistem de detectori trebuie să satisfacă câteva cerințe majore. Acestea ar fi: *localizarea în spațiu a traiectoriei particulei; măsurarea energiei particulei; identificarea particulei; localizarea în timp a particulei; obținerea de detalii asupra naturii interacției cu materia pentru fiecare din particulele considerate.*

Pentru a servi acestor scopuri detectorii trebuie să ofere o *separare spațială* suficientă a particulelor detectate. De asemenea, o bună *separare temporală* este necesară. Aceste două aspecte – diferite de rezoluția spațială, respectiv, rezoluția temporală – pot limita gama de detectori folosiți atunci când se pregătește un aranjament experimental. Așa cum s-a mai spus, detectarea unei particule presupune măsurarea unor observabile în procese distincte. Metodele de detecție sunt în strânsă legătură cu natura particulelor și cu natura proceselor de interacție cu materia. Ele pot fi clasificate după foarte multe criterii. Printre acestea se numără cele care au la bază *identitatea particulei detectate*. Dacă identitatea particulei este păstrată pe parcursul procesului de măsurare, permițând măsurători multiple, se consideră că *metodele de detecție sunt nedistructive*. Dacă identitatea particulei este distrusă prin procesul de detectare se poate vorbi de *metode de detecție distructive*. Alte criterii de clasificare a metodelor de detecție sunt legate de tipul de funcție care se are în vedere, în principal, de modul de prelucrare a informației ș.a.m.d.

În Tabelul I.1 sunt prezentate performanțele unor metode de detecție folosite în astfel de experimente.

Fiecare din marile laboratoare din lume care au posibilitatea de a efectua experimente de Fizică nucleară relativistă utilizează mai multe din aceste metode, implicând clase mari de detectori. De aceea, în curs, se vor trece în revistă, pe scurt, principiile de funcționare pentru cei mai întâlniți dintre detectorii utilizați. Prezentarea lor detaliată este făcută în alte lucrări [14,15,31-33].

<i>Metode de detecție</i>	<i>Energia primară</i>	<i>Multiplicități preexistente</i>	<i>Multiplicități create</i>	<i>Studii semi-exclusive</i>	<i>Declanșare</i>	<i>Rezoluție spațială</i>
<u>Metode electronice</u>						
<i>Timp de zbor</i>		<i>Numai pentru hodoscoape, în sistemul proiectilului</i>	<i>Numai pentru hodoscoape, în sistemul proiectilului</i>		<i>Da</i>	
<i>Detectori Cerenkov</i>					<i>Da</i>	
<i>Scintilatori</i>					<i>Da</i>	
<i>Detectori cu semi-conductori</i>					<i>Da</i>	
<i>Calorimetrie</i>	<i>Energia totală cedată prin cascade nucleare sau electro-</i>	<i>Pentru arii mari (de exemplu, "sfera" de plastic – Plastic Ball)</i>	<i>Pentru arii mari (de exemplu, "sfera" de plastic – Plastic Ball)</i>	<i>Da, pentru detectori de arii mari</i>	<i>Da</i>	<i>Relativ scăzută</i>

	<i>magneti ce</i>					
Spectrometria magnetică		<i>În principal, în sistemul proiectilului</i>	<i>În principal, pentru rapidități centrale și rapidități în sistemul proiectilului</i>	<i>Da, pentru arii foarte mari</i>	<i>Da</i>	
<u>Metode vizuale clasice</u>						
Emulsii nucleare	<i>Prin distribuții unghiulare ale fragmentelor proiectilului și/sau mezoni</i>	<i>≈ 4π sr, inclusiv fragmentele țintei cu parcurs mai mare de 5 μm</i>	<i>≈ 4π sr Acoperire completă la energii sub 0.5 A MeV</i>	<i>Da Rapidități pentru țintă și pseudo- rapidități pentru sistemul proiectilului</i>	<i>Numai pentru sisteme hibride care conțin emulsii potrivite</i>	<i>0.5-5 μm</i>
Plastici		<i>≈ 4π sr Numai dacă structura este de tip “sferă” de plastic</i>	<i>≈ 4π sr Numai dacă structura este de tip “sferă” de plastic</i>	<i>Da În principal, pentru regiunea centrală de rapiditate și regiunea de rapiditate a proiectilului</i>	<i>Numai pentru sisteme hibride</i>	<i>Relativ scăzută</i>
Camera cu bule		<i>≈ 4π sr Fragmentele țintei care au energie mică sunt pierdute dacă au parcursul mai mic de 100 μm</i>	<i>≈ 4π sr</i>	<i>Da În principal, pentru regiunea centrală de rapiditate și regiunea de rapiditate a proiectilului</i>	<i>Numai pentru sisteme hibride</i>	<i>1-10 μm</i>
Camera cu streamer		<i>≈ 4π sr Fragmentele țintei de energii mici sunt pierdute în țintă</i>	<i>≈ 4π sr Informații despre particule secundare cu sarcină (mai</i>	<i>Da În principal, pentru regiunea centrală de</i>	<i>Da</i>	<i>> 10 μm</i>

			ales pentru cele negative)	rapiditate și regiunea de rapiditate a proiectilului		
--	--	--	----------------------------	--	--	--

Tabelul I.1. Performanțele unor metode de detecție folosite în experimente de Fizică nucleară relativistă

III.2.2. Descrierea unor detectori folosiți în experimente de Fizică nucleară relativistă

Printre detectorii mai des folosiți în experimente de Fizică nucleară relativistă se numără: emulsiile nucleare, camerele cu bule, camerele cu streamer, camerele proporționale multifilare, camerele cu deplasare, camerele cu proiecție temporală, detectori cu siliciu (microstrip-uri), scintilatorii plastici, calorimetrele hadronice și electromagnetice. În cele ce urmează vor fi prezentate pe scurt aceste tipuri de detectori.

Emulsiile nucleare au fost folosite în primele experimente de Fizică nucleară relativistă. Ele sunt plăci fotografice cu un conținut ridicat de argint și pot înregistra traiectoriile particulelor cu sarcină, chiar și la ionizare minimă. Obținerea informațiilor de interes se face din determinarea densității de granule și combinarea cu diverse alte măsurători pentru determinarea vitezei și masei particulei.

Fiind mici și având sensitivitate continuă ele au fost foarte utile în experimente implicând radiația cosmică primară. Au cea mai bună rezoluție spațială dintre toți detectorii cu vizualizare folosiți. Acest fapt este datorat dimensiunilor foarte mici ale granulelor din emulsiile nucleare (sub 0.5 μm) și a distanțelor mici dintre acestea, anume 1-2 μm . În multe cazuri sunt obținute rezoluții spațiale similare, de 1-2 μm . De aceea, ele pot fi folosite pentru determinarea timpilor de viață foarte scurți ai unor particule. Dacă, inițial, emulsiile nucleare au fost folosite singure, într-un strat sau în straturi multiple, în prezent ele sunt folosite în sisteme complexe de detectori. Asociate cu camere cu bule și detectori cu semnal electric ele pot da informații privind localizarea interacțiilor de interes. Datorită acestui fapt ele sunt încă folosite în unele experimente de Fizică nucleară relativistă.

Camera cu bule este o dezvoltare directă a camerei cu ceață (Wilson, 1912) și a fost construită de Glasser în anul 1952. Volumul sensibil al acestui tip de detector este un lichid, iar informația este înregistrată pe film sau, mai nou, pe placă holografică. În camera cu bule se creează o stare instabilă a unui lichid prin supraîncălzire. Această supraîncălzire a lichidului se realizează prin reducerea bruscă a presiunii lichidului. În general, reducerea presiunii se face prin intermediul unui piston care se află în contact cu lichidul din cameră. O cantitate foarte mică de energie depozitată de o particulă cu sarcină care interacționează cu volumul sensibil al camerei cu bule este suficientă pentru a crea instabilitatea și a produce fierberea lichidului. De exemplu, pentru camere cu bule cu hidrogen lichid cantitatea de energie minimă care trebuie să fie depozitată este în jur de 20 MeV/m (3.2×10^{-12} J/m). În aceste condiții, traiectoriile particulelor cu sarcină devin vizibile sub forma unor curbe alcătuite din mici bule.

Ca volume sensibile pentru camere cu bule se folosesc: hidrogen lichid (H_2), deuteriu lichid (D_2), heliu lichid (He), propan lichid (C_2H_6), freon lichid (CF_3Br), xenon lichid (Xe). Parametrii de operare pentru lichidul din cameră sunt: temperatura, presiunea, densitatea, indicele de refracție și lungimea de radiație. Ei au valori diferite pentru lichidele folosite în mod curent ca volume sensibile (Tabelul I.2). Pentru fiecare lichid în parte trebuie luate măsuri corespunzătoare, având în vedere că unele lichide sunt extrem de explozive – H_2 , de exemplu – inflamabile (propanul) sau foarte scumpe (Xe).

O problemă importantă la operarea camerei cu bule este timpul de expansiune. Este necesar ca fasciculul incident să intre în camera cu bule atunci când presiunea este la valoarea minimă sau în vecinătatea valorii minime. În acest moment sensibilitatea camerei cu bule este maximă. Iluminarea camerei pentru înregistrarea informației pe film sau placă holografică este întârziată în raport cu momentul intrării fasciculului incident în cameră cu până la 1 milisecundă. Durata aceasta este legată de dimensiunea dorită a bulei, având în vedere că pentru fiecare tip de volum sensibil (lichid) există anumiți timpi de creștere ai bulei. La stabilirea momentului iluminării camerei pentru a permite creșterea suficientă a bulei trebuie luate în considerare și caracteristicile filmului sau plăcii holografice folosite pentru înregistrarea informației.

Lichidul care reprezintă volumul sensibil	T [°C]	p [atm]	ρ [g/cm ³]	n Indice de refracție	Lungime de radiație [m]	Observații
Hidrogen	-246	5	0.06	1.09	11.45	Se folosește ca țintă de protoni pură; este foarte exploziv
Deuteriu	-240	7	0.13	1.10	9.50	Se folosește ca țintă de neutroni
Heliu	-270	1	0.12	1.03	9.00	Foarte utilă ca sursă de hiperfragmente; are spin 0 și izospin 0
Propan	58	21	0.43	1.22	1.18	Este foarte inflamabil
Freon	30	18	1.5		0.11	Nu este inflamabil
Xenon	-19	26	2.2	1.18	0.035	Este foarte scump

Tabelul I.2. Parametrii de operare pentru camere cu bule având diferite volume sensibile

Camera cu bule nu poate fi folosită pentru înregistrarea unui alt eveniment de interacție până în momentul reîntoarcerii pistonului la poziția inițială și atingerea presiunii inițiale. Perioada scursă de la începerea detentei pistonului până la atingerea presiunii inițiale mai este cunoscută ca fiind ciclul camerei cu bule. Ratele de repetiție pentru o cameră cu bule obișnuită sunt cuprinse între 20 cicluri pe secundă și 30 de cicluri pe secundă. De aceea, ea este un detector bun pentru experimente implicând fascicule de protoni și ioni grei și mai puțin adecvat pentru fascicule de alt tip (în principal, electroni).

Pentru multe experimente, camerele cu bule pot fi plasate în câmpuri magnetice perpendiculare pe direcția fasciculului incident și paralele cu axa optică a sistemului de stereofotografie. Valorile câmpurilor magnetice folosite sunt de până la 3 T (magneți supraconductori).

În cazul înregistrării holografice a informației trebuie avut în vedere, la un sistem optic convențional, faptul că utilizarea unei aperturi largi pentru îmbunătățirea rezoluției poate să reducă adâncimea de focalizare. De aceea, se poate obține rezoluția necesară pentru studierea particulelor de viață scurtă, dar se pot folosi și fascicule largi incidente pe camera cu bule deoarece straturile de adâncimi diferite nu interferă unul cu celălalt.

Experimentele de Fizica energiilor înalte pot folosi camere cu bule de dimensiuni diferite, în acord cu obiectivele urmărite. Astfel, camerele cu bule de dimensiuni mici, cu rezoluție spațială mare și rată de repetiție mare, pot fi folosite ca detectori de vertex de interacție în sisteme de detectori complexe, hibride, care implică mai multe tipuri de detectori. Prezintă avantajul că în astfel de sisteme se poate face declanșarea camerei cu bule în vederea înregistrării informației doar pentru interacțiile de interes, în acord cu informația dată de ceilalți detectori din sistem. În cazul în care este folosită doar camera cu bule nu se poate face declanșarea.

S-au construit și camere cu bule de dimensiuni mari (lungimi de 3-4 m) pentru experimente în care secțiunea de interacție a particulei de interes cu substanța este foarte mică (de exemplu, la CERN a fost construită o cameră cu bule de 3.5 m destinată, în principal, detectării neutrinilor). Dimensiunile tipice ale majorității camerelor cu bule folosite în prezent sunt de 2m, în lungime, respectiv, 0.5 m, în înălțime.

Camerele cu bule pot fi folosite pentru reconstrucția completă a traiectoriilor particulelor cu sarcină. Procesul de reconstrucție se bazează pe explorare (scanning) și măsurare [3,8]. Ambele operații necesită un timp de lucru mare, mai ales dacă informația este înregistrată pe film.

Pentru o bună funcționare și păstrarea caracteristicilor legate de proprietatea de măsurare de poziție – rezoluție spațială bună, separarea vertex-urilor de interacție și de dezintegrare, posibilitatea determinării masei din densitatea de granule ș.a. – este necesar ca fasciculul incident să aibă intensitate mică pentru particule cu sarcină. Având în vedere dezvoltările actuale din Fizica acceleratoarelor, trebuie menționat faptul că nu pot fi folosite camere cu bule pentru acceleratori de tip “collider”.

Un alt detector cu vizualizare folosit în multe experimente de Fizică nucleară relativistă – mai ales în prima perioadă din etapa sistemelor de acceleratori – este camera cu streamer.

Camera cu streamer este un detector care are ca volum sensibil un gaz și poate înregistra informația de interes pe film sau placă holografică. De aceea, ca și camera cu bule, camera cu streamer este clasificată ca detector cu vizualizare. Primele camere cu streamer au fost construite la IUCN Dubna de către Chikovani și Dolgoshein și colaboratorii lor [38,39], urmați de grupuri de la CERN, din 1966 [40].

Principiul de funcționare al camerei cu streamer se bazează pe interacția particulelor cu sarcină cu gazul din cameră și pe teoria descărcărilor electrice în gaze [40]. Într-o cameră cu streamer descărcările electrice sunt limitate la momentele inițiale prin aplicarea pe o durată foarte scurtă a pulsurilor de tensiune înaltă. La trecerea unei particule cu sarcină printr-o cameră cu streamer, pe electrozii căreia s-a aplicat un astfel de puls de tensiune, se produc ionizări ale gazului din cameră care determină apariția unor electroni de ionizare primară (electroni primari). Electronii primari pot genera avalanșe. Avalanșele se pot transforma în streamer-i atunci când câmpul intern al sarcinii spațiale (avalanșei) devine comparabil cu câmpul electric aplicat. După câteva nanosecunde avalanșele devin vizibile și acțiunea câmpului electric extern trebuie să înceteze. De aici vine necesitatea unui puls de tensiune înaltă cu o durată foarte scurtă.

Trebuie menționat faptul că, în general, numărul streamer-ilor formați este mai mic decât numărul electronilor primari. Acest lucru se poate explica simplu luând în considerare faptul că doi sau mai mulți electroni primari pot participa la crearea aceleași sarcini spațiale (avalanșe). O altă explicație importantă este legată de faptul că unele avalanșe se transformă în streamer-i înaintea altora.

Streamer-ii la a căror formare au participat doi sau mai mulți electroni primari se dezvoltă mai aproape de traiectoria reală a particulei cu sarcină.

În funcție de strălucirea streamer-ilor formați, pentru înregistrarea pe film sau placă holografică a informației este necesară sau nu folosirea unor intensificatori de imagine (Fig.I.3).

Elementele principale ale unei camere cu streamer sunt: incinta - cea care conține gazul folosit ca volum sensibil, electrozii – pe care se aplică pulsul de tensiune înaltă și de durată foarte scurtă, sistemul de asigurare a tensiunii înalte, sistemul de formare a pulsurilor, sistemul de asigurare a gazului, sistemul de purificare a gazului din incintă, sistemul de înregistrare și stocare a informației.

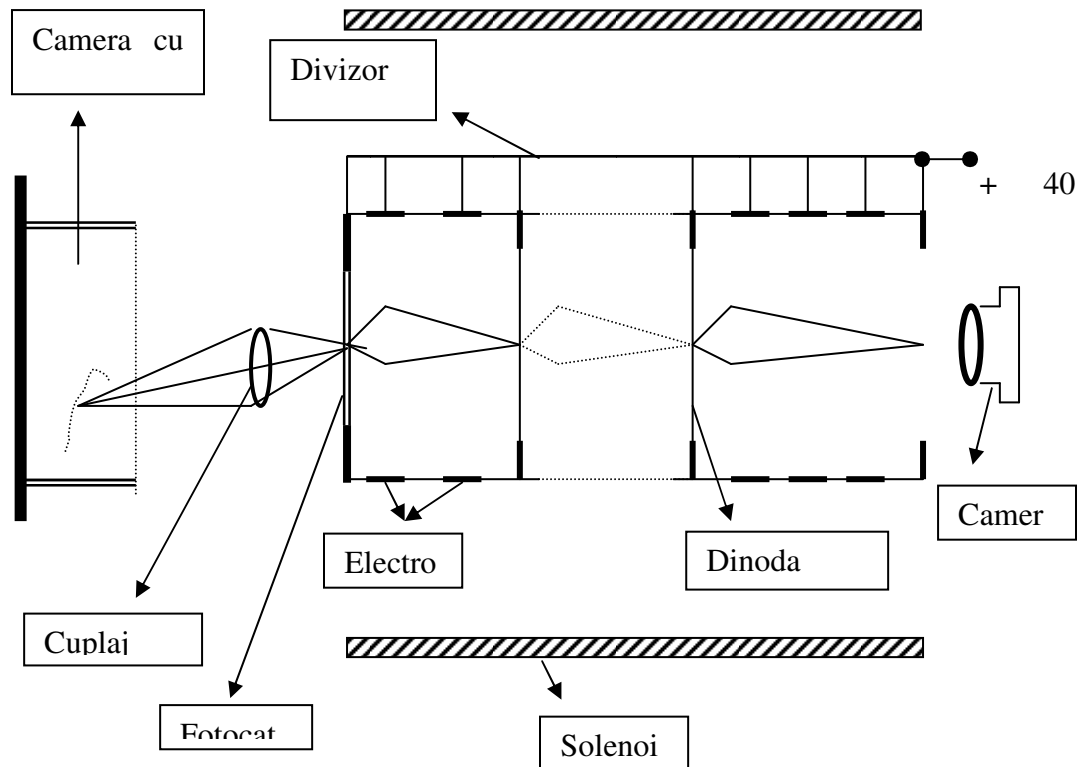


Fig.I.3. Intensificator de imagine pentru camera cu streamer. Schemă de principiu

Deoarece camera cu streamer poate fi inclusă în aranjamente experimentale complexe ea este prevăzută cu un sistem de declanșare pentru evenimente de interes. Deoarece se poate selecta atât tipul de particulă sau fascicul incident, cât și tipul de eveniment de interacție, se poate considera că o cameră cu streamer are sistem de declanșare primară și sistem de declanșare secundară. Un sistem de detecție cu cameră cu streamer, cu sistem de declanșare, este prezentat în Fig.I.4.

La camera cu streamer incinta este umplută cu un gaz nobil sau cu o combinație de gaze nobile. Datorită interacțiilor care se produc în volumul sensibil poate apare o degradare a gazului din cameră. De aceea, gazul din cameră trebuie să fie înlocuit. Înlocuirea sa se poate face în mod continuu sau în trepte. Pentru acest lucru incinta este în legătură cu sistemul de asigurare a gazului, precum și cu sistemul de purificare a gazului, sistem care asigură valori extrem de mari ale purității lui (până la 99.9%). Presiunea gazului din cameră este, pentru majoritatea camerelor cu streamer construite până în prezent, în jurul

presiunii atmosferice. Dacă înregistrarea informației se face pe placă holografică se preferă presiuni mari ale gazului din incinta camerei cu streamer (până la 10 atmosfere). În acest caz rezoluția spațială este mult mai bună (circa 25 μm) [41,42].

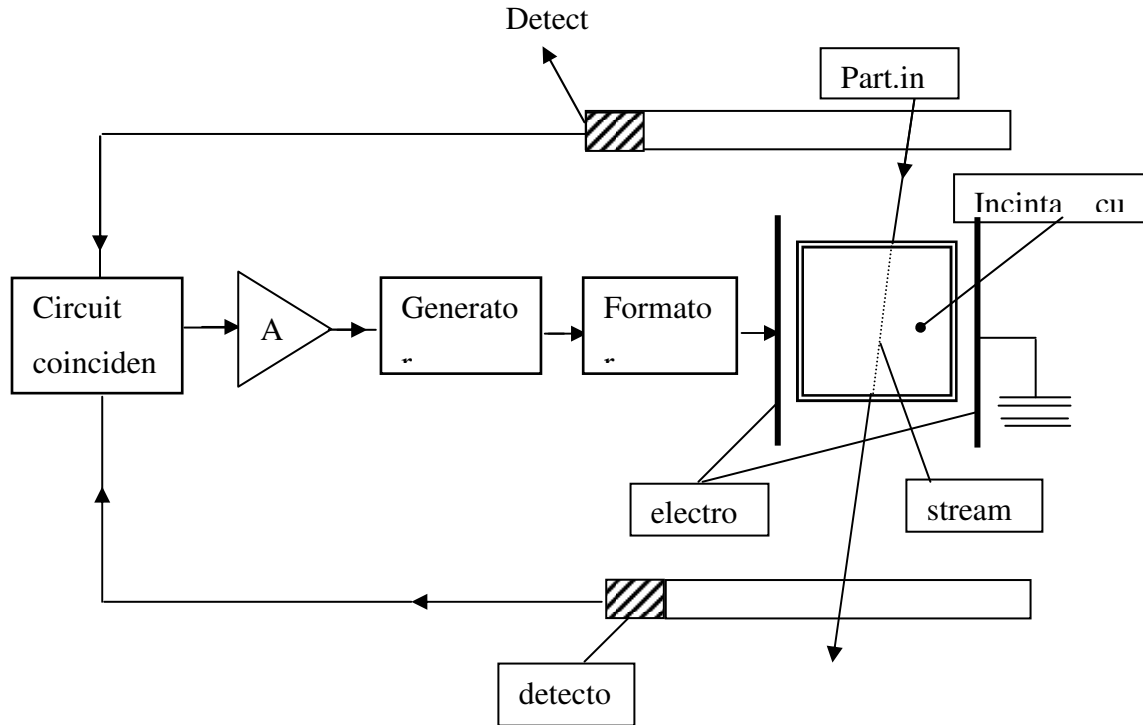


Fig.I.4. Sistem de detecție cu cameră cu streamer

Pentru a se putea înregistra informația pereții incintei sunt – în majoritatea cazurilor – transparenți sau semitransparenți. Există unele camere cu streamer care au doar o fereastră transparentă pentru înregistrarea informației prin stereofotografiere.

În funcție de numărul de electrozi utilizați incinta poate avea mai multe spații de lucru. La camera cu streamer nu este necesar ca particulele cu sarcină să treacă printre electrozi sau prin vecinătatea acestora. De aceea, electrozii unei camere cu streamer pot avea forme și dimensiuni diferite. În general, se utilizează electrozi sub formă de fire sau plăci. Materialele din care se construiesc electrozii – aluminiu, cupru, oțel inox ș.a. – determină forma și dimensiunea aleasă pentru un electrod. Împreună, ele influențează alegerea

materialului din care sunt construiți pereții incintei și regimul de operare și de stereofotografiere al camerei cu streamer.

Pe electrozi se aplică tensiunea înaltă furnizată de un generator de tip Marx [40]. Pentru a limita descărcarea la etapele de început ale formării avalanșei, pe electrozi se aplică tensiuni de ordinul sutelor de kV pentru timpi foarte scurți (10-20 ns). De aceea, tensiunea înaltă trebuie să fie aplicată în pulsuri. O cameră cu streamer trebuie să fie dotată cu un formator de pulsuri care să asigure atingerea valorii dorite a tensiunii în câteva nanosecunde, iar pe toată durata pulsului volumul sensibil al camerei cu streamer să aibă aceleași condiții de câmp electric.

Există mai multe moduri de formare a pulsurilor. Cele mai cunoscute sunt cele bazate pe intervale de descărcare – plasate între generatorul Marx și camera cu streamer – și cele bazate pe considerarea camerei ca o linie de transmisie și pe existența condițiilor de terminare completă a pulsului la capătul camerei depărtat de generator – mai este cunoscut ca și linie “Blumlein”.

Performanțele camerei cu streamer – precizia localizării traiectoriei particulei în spațiu, capacitatea de a distinge și de a număra streamer-i individuali – sunt dependente și de modul de înregistrare a imaginii pe film sau placă holografică. Acesta este influențat de poziția relativă dintre sistemul de înregistrare a imaginii și electrozi. De aceea, se pot considera trei regimuri de operare a camerei cu streamer, anume: (a) regim de streamer-i uniți; (b) regim de streamer-i izolați, în vedere laterală; (c) regim de streamer-i izolați, în vedere de la un capăt al camerei – în raport cu direcția fasciculului incident. Regimul de streamer-i uniți prezintă avantajul unei luminozități mai mari, ceea ce ușurează înregistrarea stereoscopică a urmei traiectoriei particulei.

În cazul înregistrării pe placă holografică a imaginii există avantajul decuplării adâncimii câmpului optic de rezoluția spațială, ceea ce permite mărirea rezoluției spațiale (până la câțiva zeci de micrometri). De asemenea, se înregistrează un număr mare de interacții într-o singură imagine și se poate elimina folosirea intensificatorilor de imagine.

Caracteristicile tehnice și performanțele determină folosirea camerei cu streamer în numeroase experimente de Fizica particulelor elementare și Fizică nucleară relativistă.

Un alt detector care folosește un gaz ca volum sensibil și procesele de ionizare în gaze pentru determinarea traiectoriei unei particule cu sarcină este camera proporțională

multifilară. Ea a fost creată de Georges Charpak în anul 1968 [12,14,15,31,40]. Spre deosebire de ceilalți detectori care permiteau localizarea în spațiu a traiectoriei unei particule cu sarcină folosind mijloace optice (detectori cu semnal neelectric), camera proporțională multifilară permitea obținerea de informații folosind semnale electrice.

La început s-au întâmpinat o serie de dificultăți constructive legate de faptul că acest tip de detector era văzut ca o arie de tuburi de contori proporționali. Charpak a reușit să demonstreze că o arie de multe fire anodice foarte apropiate spațial în aceeași cameră poate să acționeze fiecare ca un contor proporțional independent.

Datorită dezvoltării electronicii a devenit posibilă realizarea de amplificatori proprii pentru fiecare fir anodic, ceea ce a făcut ca acest tip de detector să fie un detector sensibil la poziție. Posibilitatea obținerii de semnale electrice – mult mai rapid prelucrabile – și sensibilitatea la poziție au determinat folosirea pe scară largă a camerelor proporționale multifilare atât în experimente de Fizica energiilor înalte, cât și în aplicații ale Fizicii atomice și nucleare în diferite domenii (formare de imagini în experimente cu raze X și γ , Astrofizică, Medicină, Cristalografie ș.a.).

O cameră proporțională multifilară constă dintr-un plan de fire anodice egal depărtate spațial centrat între două plane catodice. Pe cele două tipuri de plane se aplică un câmp electric de câțiva kV (de obicei, 3-4 kV). Se creează astfel, cu excepția unei regiuni foarte mici din vecinătatea firelor, linii de câmp electric paralele și aproape constante. O particulă cu sarcină care trece prin cameră ionizează gazul din cameră. Ionizarea produsă este amplificată printr-o ionizare în avalanșă și ionii produși se îndreaptă spre electrozi sub influența câmpului electric înalt aplicat pe ei.

Pentru a asigura condițiile necesare, distanța dintre firele anodice este de până la 2 mm – dar nu mai mică de 0.5 mm - iar distanța dintre planul firelor anodice și planul catodic este de 7-8 mm. Diametrele firelor anodice trebuie să fie foarte mici – între 10 μm și 50 μm – pentru a asigura câmpurile electrice înalte care să producă avalanșele. În vecinătatea firelor câmpul variază ca $\frac{1}{r}$ și poate atinge valori de $10^4 - 10^5$ V/cm.

Gazul folosit în mod obișnuit în camera proporțională multifilară este un amestec de argon și metan; ponderea metanului în amestec nu depășește 10 % . Există și alte combinații de gaze folosite pentru camerele proporționale multifilare. Un astfel de gaz,

cunoscut și sub numele de “gaz magic” est eformat din argon (75%), isobutan (24.5%) și freon-13B1(0.5%). Proporțiile date sunt în volume.

În condițiile optime menționate mai sus se pot obține rezoluții spațiale mai mici sau cel mult egale cu 100 μm. Valoarea rezoluției depinde de distanța dintre fire și valoarea câmpului electric aplicat.

În modul proporțional propriu-zis semnalele de ieșire sunt proporționale cu ionizarea primară. De aceea, sunt posibile amplificări ale semnalului de până la 10^4 . Pentru amplificări mai mari de 10^5 poate apare un domeniu de neproporționalitate, ceea ce determină formarea de streamer-i saturați și apariția unor scânteii, fenomene specifice camerei cu streamer, camerei cu scânteii sau tuburilor cu scânteiere (“flash”), precum și a unor camere proporționale multifilare mai robuste.

În general, la o cameră proporțională multifilară timpul de creștere al avalanșei este de circa 100 ps. Mobilitatea ionilor din cameră determină timpul de descreștere. Acesta este în jur de 20 ns. Timpul de răspuns al camerei este determinat de distanța dintre fire și de timpul necesar electronilor pentru deplasare pe o distanță egală cu jumătate din spațiul dintre fire. De aceea, pentru soluțiile constructive uzuale – cu distanțe între fire între 0.5 mm și 2 mm – rezoluția temporală este cuprinsă între 20 ns și 30 ns.

Folosirea de straturi succesive de camere proporționale multifilare cu fire orientate în direcții diferite permite măsurarea traiectoriilor particulelor cu sarcină. Straturile succesive de camere proporționale multifilare cu orientări diferite ale firelor formează un telescop. Ele pot fi folosite și în câmpuri magnetice, ceea ce permite determinarea impulsului particulei cu sarcină a cărei traiectorie a fost măsurată.

Semnalele electrice obținute, pentru o singură particulă cu sarcină, în două straturi ortogonale determină un punct unic în spațiu. Dacă sunt prezente mai multe particule pot să apară ambiguități în asocierea semnalelor de la diferite straturi. De aceea, în cele mai multe cazuri, se folosesc module cu plane orientate de lungul axei Ox, respectiv, Oy. Se obține o cameră proporțională multifilară x-y. Utilitatea camerelor proporționale multifilare în determinarea caracteristicilor unor particule cu sarcină detectate este strâns legată de calitatea electronicii asociate. Acest lucru este cel mai bine definit de metodele specifice de prelucrare a semnalelor de ieșire de la camere proporționale multifilare (metoda centrului de greutate, metoda divizării sarcinii ș.a.) [12,14,15,31,40].

Eficacitatea intrinsecă a camerei proporționale multifilare depinde de numărul de perechi electron-ion formate și colectate în cameră. Având în vedere că acest număr depinde de o multitudine de caracteristici constructive și de parametrii de funcționare ai camerei proporționale multifilare – pierderea de energie pe unitatea de parcurs în gazul care umple camera, distanța dintre plane, presiunea gazului, ponderea gazelor electronegative din amestecul de gaze din cameră, valoarea tensiunii electrice aplicate, valorile de prag pentru amplitudinile semnalelor stabilite pentru electronica asociată, metoda de prelucrare a semnalelor de ieșire (metoda centrului de greutate, metoda divizării sarcinii ș.a. [12,14,15,31,40]) – pentru folosirea unei camere proporționale multifilare la parametrii optimi este necesară cunoașterea exactă, experimentală, a tuturor acestor dependențe. În aceste condiții eficacitatea intrinsecă a camerei proporționale multifilare poate atinge 98-99 %.

Camera cu deplasare (camera cu “drift”) s-a dezvoltat odată cu camera proporțională multifilară. Încă de la început s-a observat că se poate obține informație spațială măsurând timpul de deplasare până la fir, într-un câmp electric uniform, a ionilor sau electronilor proveniți dintr-un eveniment de ionizare. Dacă se cunoaște viteza de deplasare, atunci, cunoscând timpul cât durează deplasarea, se poate determina cu precizie mare coordonata spațială [12,14,15,31,40]. Este necesar un semnal de start de la un alt detector din sistemul de detectori pentru determinarea timpului. În acest caz, electronica asociată camerei proporționale multifilare este schimbată pentru un număr limitat de canale temporale.

Principiul de operare a unei camere cu deplasare se bazează pe existența unei structuri de fire care să determine apariția unui câmp electric de deplasare uniform. Se definește o celulă de deplasare printr-un electrod de înaltă tensiune la unul din capete, respectiv, prin anodul unui contor proporțional simplu, la celălalt capăt. Pentru a crea câmpul electric uniform se folosesc serii de fire catodice de câmp, puse la tensiuni corespunzătoare, în regiunea de deplasare. Pentru semnalarea sosirii unei particule cu sarcină se plasează un detector cu scintilație care să acopere întreaga arie sensibilă a camerei cu deplasare. Plasarea detectorului cu scintilație se poate face înainte sau după camera cu deplasare. O particulă care traversează camera și scintilatorul eliberează electroni în gaz. Acești electroni încep să se deplaseze către anod. În același timp, scintilatorul dă un semnal

rapid care pornește un “ceas”. Semnalul creat la anod, prin sosirea electronilor pe firul respectiv, va da semnalul de oprire a “ceasului”. Se obține astfel timpul de deplasare. Regiunile de deplasare tipice actuale sunt de 5-10 cm. În aceste condiții tensiunile electrice aplicate nu trebuie să fie foarte mari. În prezent se obțin viteze de deplasare de până la 5 cm/ μ s și timpi de deplasare de 1-2 μ s. Acest timp mai este cunoscut ca și memoria camerei. Pentru acoperirea unei suprafețe mai mari se pot folosi mai multe celule de deplasare adiacente. Se pot construi astfel camere cu deplasare cu lungimi de câțiva metri. Pentru obținerea mai multor puncte de pe traiectoria unei particule cu sarcină se pot folosi câteva camere cu deplasare cu orientări diferite ale firelor.

Multe din caracteristicile constructive ale camerelor cu deplasare sunt apropiate de cele ale camerelor proporționale multifilare. Spațiile dintre fire sunt ceva mai mari, iar câmpul electric asociat scade (în mod obișnuit, este de circa 1 kV/cm). Este necesară luare de măsuri suplimentare pentru a păstra uniformitatea câmpului electric în spațiul dintre anodi. Problemele se rezolvă, de obicei, prin introducerea de fire suplimentare interanodice.

Alegerea gazului care umple o cameră cu deplasare depinde de tipul de experiment în care acest detector este folosit. Dacă se dorește operarea la rate de numărare mari se urmărește obținerea de viteze de deplasare mari pentru a minimiza pierderile datorate timpului mort. În cazul în care se dorește obținerea unei rezoluții spațiale bune se va considera o viteză de deplasare mai mică, ceea ce va determina minimizarea erorilor în determinarea timpului. Pentru prima situație este preferat ca gaz tetraflorura de carbon (CF_4) și o hidrocarbură, ca gaz de “stingere”. În cel de al doilea caz se pot folosi gaze precum bioxid de carbon (CO_2), sau amestecuri de tip heliu-propan ($\text{He-C}_2\text{H}_6$), argon-hidrocarbură ș.a.

Rezoluția spațială a camerei cu deplasare depinde, direct proporțional, de coeficientul de difuzie al electronilor și de poziție și, invers proporțional, de mobilitate și de câmpul electric aplicat. De asemenea, rezoluția spațială a camerei cu deplasare este determinată de distanța de difuzie. Pentru distanțe mai mici rezoluția spațială este mai bună (are valori mai mici). Pentru camere cu deplasare obișnuite această rezoluție spațială este în jur de 100 μ m. Pentru camere realizate în condiții speciale ea poate să scadă la circa 50 μ m sau mai puțin.

În cazul în care camera cu deplasare este folosită în câmp magnetic traiectoriile electronilor care se deplasează și vitezele de deplasare vor fi afectate de forța Lorentz. De aceea, este necesară o cunoaștere precisă a câmpului magnetic pentru a corela timpul de deplasare cu poziția. În anumite situații se poate realiza o compensare a efectelor câmpului magnetic prin modificarea corespunzătoare a direcției câmpului magnetic.

Camerele cu deplasare sunt din ce în ce mai folosite în experimente de Fizică nucleară relativistă și de Fizica energiilor înalte.

O cameră cu deplasare mult mai complexă este camera cu proiecție temporală. Este considerată ca fiind cel mai sofisticat detector cu ionizare. Camera cu proiecție temporală este un detector care permite determinarea tridimensională a traiectoriilor particulelor cu sarcină. Alături de informația asupra unor puncte de pe traiectoria unei particule camera cu proiecție temporală oferă informații asupra pierderii de energie pe unitatea de parcurs pentru particula considerată. De aceea, acest tip de detector este considerat ca o cameră cu bule electronică. Ea poate fi folosită cu succes în experimente de Fizica energiilor înalte la sisteme de accelerare de tip “collider”.

Camera cu proiecție temporală are forma unui cilindru mare care este umplut cu un gaz și care are un electrod central subțire pe care se aplică tensiunea electrică înaltă. Pentru acceleratori de tip “collider” dimensiunile detectorului - atât ca lungime, cât și ca diametru - pot atinge 2 m. La aplicarea tensiunii electrice înalte apare un câmp electric uniform orientat de-a lungul generatoarei cilindrului (electrodului central). Simultan cu câmpul electric este aplicat un câmp magnetic paralel. La capetele cilindrului, în plane perpendiculare pe direcția de deplasare, sunt plasați detectori bidimensionali, sectoriali, de tipul unei camere proporționale multifilare. De-a lungul direcției de deplasare coordonata este măsurată temporal. De aceea, pentru determinarea traiectoriei tridimensionale a unei particule cu sarcină în gaz se determină mai multe semnale de ieșire succesive, în poziții diferite, pe detectorul de la capătul camerei cu proiecție temporală.

Datorită distanței lungi pe care se face deplasarea, difuzia – mai ales cea pe direcție laterală – poate să creeze o serie de probleme. Pentru rezolvarea acestora intervine câmpul magnetic aplicat simultan și paralel cu câmpul electric. Acesta are rolul de a confina (strânge) electronii la traiectorii elicoidale în jurul direcției de deplasare. În

acest fel difuzia poate fi redusă cu un factor de 10. Pentru a realiza acest lucru cele două câmpuri trebuie să fie aliniat foarte precis și uniforme pe întregul volum al camerei (precizie în jur de 10^{-4} sau mai bună). Alte probleme care apar în funcționarea camerei cu proiecție temporală sunt determinate de acumularea unei sarcini spațiale în volumul de deplasare. Rezolvarea acestei probleme se poate face prin introducerea unei grile legate la pământ, grilă plasată înaintea firelor anodice. Ea servește și la separarea regiunii de deplasare de regiunea descărcărilor în avalanșă și permite un control independent asupra fiecăreia dintre ele.

Sarcina colectată la capetele camerei cu proiecție temporală este proporțională cu energia pierdută de particulă. De aceea, amplitudinile semnalelor provenite de la anod pot fi folosite pentru a determina energia pierdută pe unitatea de parcurs. Deoarece câmpul magnetic aplicat permite determinarea impulsului particulei, din toate informațiile specificate până acum se poate face identificarea particulei. Trebuie menționat aici că pentru obținerea unor informații corecte trebuie să fie luați în considerare foarte mulți factori, cum ar fi: rezoluție foarte bună în determinarea pierderii de energie pe unitatea de parcurs, pierderea de electroni prin atașare la diferiți ioni, variații în amplificarea pentru fire, calibrarea firelor, efecte de saturație, tipul și presiunea gazului din cameră ș.m.a.

Deoarece la o cameră cu proiecție temporală sunt obținute foarte multe date pentru fiecare eveniment este importantă selectarea unor dispozitive de citire a semnalului de ieșire și de stocare a informației corespunzătoare. Printre ele se numără dispozitive cu sarcină (încărcate electric) cuplate (charged-coupled devices = CCD) și convertori analog digitali cu “scânteiere” (flash).

Folosirea camerelor cu proiecție temporală la acceleratori de tip “collider” oferă posibilitatea plasării centrului detectorului în punctul de interacție și acoperirea unei geometrii apropiate de 4π . Acest lucru justifică folosirea acestui tip de detector în experimentele noi de Fizică nucleară relativistă de la sistemul de acceleratori RHIC de la BNL și la sistemul de acceleratori LHC de la CERN.

O categorie de detectori extrem de utilă în experimente de Fizică nucleară, Fizica particulelor elementare și Fizică nucleară relativistă este cea a detectorilor cu scintilație. Răspândirea lor este legată de faptul că foarte multe substanțe scintilează (produc lumină)

la trecerea unei particule cu sarcină prin ele. Ele sunt folosite ca volume sensibile pentru astfel de detectori.

Astfel de detectori au fost folosiți încă de la primele experimente de Fizică nucleară. În anul 1903 Crooks a inventat “spintariscopul”. Acest detector consta dintr-un ecran de sulfură de zinc (ZnS) care producea scintilații atunci când o particulă α cădea pe el. Aceste scintilații puteau fi urmărite cu un microscop sau cu ochiul liber, într-o cameră întunecată. Acest tip de detector cu scintilație a fost folosit în experimentele de împrăștiere a particulelor α pe nuclee efectuate de Rutherford, Geiger și Marsden [17,18].

Abia după 40 de ani, detectorii cu scintilație au reintrat în atenția experimentatorilor. Dezvoltările din Fizică și Tehnologie au permis înlocuirea ochiului uman cu un tub fotomultiplicator (1944 – Curran și Baker), ceea ce a mărit considerabil eficacitatea detectorului, făcându-l compatibil cu detectorii cu ionizare în gaz, folosiți de obicei în experimente de Fizică nucleară. După 1950 detectorii cu scintilație, cu o electronică asociată mult mai sofisticată, devin sistemele de detecție cele mai folosite. Tuburile fotomultiplicatoare sunt sistemele de formare a semnalului pentru detectorii cu scintilație.

Substanțele scintilatoare pot fi solide sau lichide. Cele solide sunt cristale anorganice (iodură de sodiu, florură de cesiu, gemanat de bismut ș.a.), cristale organice (de exemplu, antracen) sau plastice. Se mai folosesc substanțe scintilatoare sub formă de lichide organice, cum este toluenul.

De obicei, cristalele anorganice sunt dopate cu un activator corespunzător. Activatorul permite ca un astfel de cristal să poată da o radiație luminoasă detectabilă. Principiul de funcționare se bazează pe faptul că atunci când o particulă cu sarcină trece prin cristal produce electroni liberi și goluri care sunt capturați de activator. Se obține o stare excitată a acestuia care prin dezexcitare produce lumină.

În cazul scintilatorilor organici mecanismul de producere a luminii se bazează pe excitarea stărilor moleculare și dezexcitarea acestora. Lumina obținută este în domeniul ultraviolet. De aceea, în astfel de scintilatori trebuie să fie introduse substanțe fluorescente adecvate pentru convertirea în lumină vizibilă.

Pentru toate tipurile de detectori cu scintilație tuburile fotomultiplicatoare permit o multiplicare a numărului inițial de electroni de până la 10^9 ori. Acest lucru se bazează

pe fereastra fotosensibilă de intrare a tubului (catodul fotomultiplicatorului), sistemul de electrozi din interiorul tubului – cunoscuți sub numele de dinode - și pe electrodul final, numit și anodul fotomultiplicatorului. Semnalul final obținut este prelucrat suplimentar și amplificat de electronica asociată detectorului cu scintilație.

Folosirea scintilatorilor plastici în experimente de Fizică nucleară, Fizica particulelor elementare și Fizică nucleară relativistă are la bază atât caracteristicile acestui tip de volum sensibil, cât și prețul de cost, mult mai scăzut decât la scintilatorii cu cristale. Trebuie subliniată rezoluția temporală foarte bună a scintilatorilor plastici, precum și posibilitatea de a fi realizați în forme și de dimensiuni diferite. O astfel de formă – de interes în Fizica energiilor înalte – este cea de matrice de contori subțiri.

În anumite situații – legate de structura aranjamentului experimental – nu este posibilă punerea în contact direct a volumului sensibil cu sistemul de formare a semnalului. În aceste cazuri se pot folosi “conduce de lumină” realizate din lucită sau fibră optică. Acest lucru poate să determine, de exemplu, funcționarea în condiții optime a fotomultiplicatorului (de exemplu, absența câmpurilor magnetice puternice poate permite operarea în condiții optime a acestora).

Pentru scintilatori lichizi se pot folosi – în anumite situații – materiale care să permită deplasarea lungimilor de undă din diferite domenii de lungimi de undă în domeniul vizibil (de exemplu, un acril dopat cu molecule complexe, cum sunt cele de tetra fenil).

Detectorii cu scintilație pot fi folosiți – datorită proprietăților lor – la declanșarea unor alte tipuri de detectori (de exemplu, camera cu streamer) sau pentru obținerea semnalelor de “start” și “stop” la sistemele de detecție cu timp de zbor. Ei sunt tot mai mult introduși în aranjamentele experimentale complexe de Fizică nucleară relativistă.

O altă categorie de detectori folosită, inițial, cu rezultate deosebite în Fizica nucleară la energii joase și introdusă ulterior, cu succes, în experimente de Fizica energiilor înalte este cea a detectorilor cu semiconductori.

Primele studii privind utilizarea semiconductoarelor pentru realizarea unor detectori de radiații nucleare datează din anii '30, dar abia în anii '50 a început folosirea lor în experimente de Fizică nucleară. Folosirea detectorilor cu semiconductori a fost legată de o mai mare putere de stopare a volumului sensibil construit din materiale

semiconductoare decât cea a gazelor, ceea ce implica o eficacitate de detecție mai mare, și de rezoluția lor energetică deosebită, ceea ce i-a impus în experimente de tip spectroscopic. În ultimele două decenii ei s-au impus atenției experimenterilor pentru rezoluția spațială, ceea ce i-a impus și în experimente de Fizica energiilor înalte pentru determinarea traiectoriilor particulelor.

Principiul de funcționare pentru un detector cu semiconductor se bazează pe existența celor două tipuri de purtători de sarcină: electronii și golurile. Pentru crearea volumului sensibil se aplică pe joncțiunea semiconductoare o tensiune inversă de polarizare. Aceasta va determina apariția unei regiuni sărăcite în purtători de sarcină, regiune care devine volum sensibil pentru detectorul respectiv. Comportarea ei poate fi asemănată cu cea a unei camere cu ionizare. La trecerea unei particule cu sarcină se poate detecta un semnal mic, cu o valoare mai mare decât a semnalului de fond datorat curenților de scăpări.

Cel mai utilizat dispozitiv cu semiconductor folosit în experimente de Fizică nucleară relativistă este cel cunoscut sub numele de “microstrip”-uri (“microbenzi”). Materialul semiconductor folosit în mod obișnuit pentru realizarea unui astfel de detector este siliciul.

Detectorul cu “microstrip”-uri (“microbenzi”) permite obținerea de rezoluții spațiale foarte bune și de aceea este folosit adesea pentru determinarea vertex-ului de interacție. Într-un astfel de detector se pot realiza electrozi multipli sub forma unor “benzi” foarte fine, de circa 10 μm . Folosind straturi multiple, succesive, de astfel de plane cu electrozi în formă de “benzi” se poate obține un detector tridimensional. El se poate folosi ca “țintă activă”. Dacă se constată o creștere a semnalului de la un start la stratul următor, atunci se poate considera că a avut loc o dezintegrare a unei particule neutre în particule cu sarcină. De aceea, astfel de detectori sunt foarte utili în detectarea particulelor cu timpi de viață foarte scurți. De exemplu, în experimente de Fizică nucleară relativistă sunt foarte utili pentru detectarea producerii de hipernuclee.

Determinarea traiectoriei se bazează pe măsurarea “centrului de greutate” al semnalelor provenite de la “benzi”. Valoarea rezoluției spațiale obținute depinde de lățimea “benzii”, de distanța dintre electrozi (“benzi”), grosimea stratului de siliciu. De exemplu, pentru un cristal de siliciu cu o grosime de 280 μm pe care s-au implantat benzi

cu grosimea de 10 μm , separate între ele printr-un interval de 10 μm , se obține o rezoluție spațială de câțiva micrometri. Pentru detectori cu “microbenzi” care acoperă suprafețe mari – peste 10 mm^2 – este necesară creșterea pasului dintre “benzi”, până la 100 μm . Și în această situație rezoluția spațială este foarte bună, anume sub 10 μm .

Alături de detectorii cu “microbenzi”, în experimente de Fizica energiilor înalte sunt din ce în ce mai des folosiți și alți detectori sensibili la poziție. Gatti și Rehak au propus camera cu deplasare cu siliciu [14,15,31-33]. La detectorii de acest tip se crează un canal de deplasare de-a lungul planului central al unei plachete de siliciu prin sărăcirea completă a plachetei la suprafețele plate și la unul din capete. Cu un astfel de detector cu funcționare similară unei camere cu deplasare, cu volum sensibil gazos, care nu necesită o electronică prea voluminoasă pentru prelucrarea semnalului, se pot obține rezoluții spațiale în jur de 5 μm .

De tot mai mare interes se bucură folosirea dispozitivelor cu sarcină (încărcate electric) cuplate (charged-coupled devices = CCD) ca detectori pentru experimente de Fizica energiilor înalte. Un astfel de detector este realizat din siliciu și este format din două suprafețe de “gropi de potențial” din staniu, fiecare cu o suprafață de câțiva micrometri pătrați. Când o radiație nucleară cade pe dispozitiv sunt eliberați electroni care sunt captați de către “gropile de potențial”. Informația de sarcină obținută este analizată prin deplasarea succesivă a sarcinii de la o “groapă” la alta, până la ajungerea la electronica asociată prelucrării semnalului de ieșire. De la astfel de detectori se speră obținerea unor rezoluții spațiale sub 2 μm . Acest lucru este posibil deoarece sunt detectori cu zgomot foarte mic.

În experimentele de Fizica energiilor înalte sunt foarte des folosite – pentru măsurători de energie – dispozitive mari în care particulele își pierd practic toată energia, prin diferite procese de interacție. Aceste dispozitive se numesc calorimetre deoarece energia pierdută este convertită în căldură. Măsurarea energiei depozitate în calorimetru se face pe baza determinării energiei pierdute în procesele de excitare și ionizare din volumul sensibil (volumele sensibile) al calorimetrului. Un astfel de detector mai este clasificat și ca detector bazat pe metode distructive de detecție, deoarece particulele nu mai pot fi folosite pentru alte studii.

Natura procesului dominant care conduce la pierderea de energie în calorimetru determină caracteristicile de bază ale acestuia. De aceea, se consideră două categorii mari de calorimetre, anume: calorimetre electromagnetice și calorimetre hadronice.

Calorimetrele electromagnetice sunt cele în care predominante sunt interacțiile electromagnetice ale electronilor și radiațiilor γ – radiație de frânare, producere de perechi, împrăștiere Compton. În astfel de cazuri contribuțiile proceselor nucleare sunt mici. Ca urmare a proceselor de interacție care apar într-un calorimetru electromagnetic sunt produse generații secundare de electroni, generații care pot provoca – la rândul lor – apariția unor fotoni. Se produce astfel o jerbă electromagnetică de fotoni, electroni și pozitroni. Particulele dintr-o astfel de jerbă se pot multiplica până la atingerea unui număr maxim de particule. Valoarea acestui număr este legată de energia inițială și de energia medie de ionizare. La atingerea lui nu mai este suficientă energie pentru continuarea procesului de multiplicare. După acest moment jerbele electromagnetice încep să se dezintegreze. Particulele cu sarcină pierd energie prin ionizare, iar fotonii prin împrăștiere Compton. Există relații semiempirice pentru descrierea acestor procese [6,8,12,14,15,31-33].

La realizarea unui calorimetru electromagnetic pentru măsurarea energiei electronilor și/sau fotonilor trebuie avută în vedere obținerea unei rezoluții energetice maxime. În acest fel se poate localiza cât mai precis posibil poziția electronului sau fotonului. De aceea, trebuie luate în considerare caracteristicile unei jerbe electromagnetice. Sunt avute în vedere – în principal – extinderea longitudinală, împrăștierea transversală și rata de pierdere a energiei de-a lungul traiectoriei străbătute în volumul sensibil. La discutarea lor trebuie avută în vedere energia critică. Aceasta se definește ca energia electronului pentru care pierderile de energie prin emisie de radiație devin egale cu pierderile de energie prin ciocnire și ionizare. Ea are valori specifice pentru diferitele materiale din care se realizează calorimetrele electromagnetice (de exemplu, la argon este de 30 MeV, iar la plumb este de 7 MeV). În funcție de tipul de material se poate stabili grosimea la care se atinge numărul maxim de particule din jerba electromagnetică [6,8,12,14,15,31-33].

Rezoluția energetică a calorimetrului electromagnetic depinde, în primul rând, de fluctuațiile de eșantionare ale energiei depozitate în volumul sensibil al acestuia. La

determinarea ei trebuie avut în vedere faptul că un calorimetru este construit, în cele mai multe cazuri, din straturi succesive, alternante, de material absorbant și detectori [12,14,15,31,33].

Calorimetrele hadronice detectează particule care interacționează tare. De aceea, procesele de degradare a particulelor și de detectare a lor sunt mai complexe decât în cazul calorimetrelor electromagnetice. Ele depind de diferitele reacții nucleare, de excitări și dezintegrări ale particulelor elementare. La calorimetrele electromagnetice măsurile de interes – grosime maximă, rezoluție energetică – erau dependente de lungimea de radiație. Prin analogie, la calorimetrele hadronice măsurile de interes depind de lungimea de absorbție nucleară, definită astfel:

$$\lambda_{abs} = \frac{A}{N_A \rho \sigma_{int}},$$

unde A este numărul de masă, N_A este numărul lui Avogadro, ρ este densitatea volumului sensibil, σ_{int} este secțiunea eficace inelastică nucleonică. De aceea, pentru energii peste 2 GeV lungimea de absorbție nucleară este aproape independentă de energie.

La realizarea unui calorimetru hadronic și la stabilirea caracteristicilor sale trebuie luate în considerare unele aspecte legate de faptul că sunt particule care nu își pierd energia în volumul său sensibil, mai ales unele particule neutre (neutroni lenți, neutrini ș.a.) Din aceste motive rezoluția energetică a unui calorimetru hadronic este mai slabă decât a unui calorimetru electromagnetic (apar fluctuații mai mari în dezvoltarea jerbei). În plus, modul de dezintegrare a pionilor neutri contribuie la creșterea variațiilor în energia depozitată în volumul sensibil. În general, circa 95% din energie este depozitată într-un cilindru de rază λ_{abs} . Principalele materiale din care se construiesc calorimetrele hadronice sunt plumbul și fierul. Ele sunt dispuse în straturi succesive, alternante, de material și detectori. Pot fi folosite în câmpuri magnetice.

Pentru experimentele de Fizică nucleară relativistă care urmăresc reconstrucția tridimensională a traiectoriilor particulelor sunt des utilizați și detectorii Cerenkov.

Indiferent de tipul lor – detectori Cerenkov cu prag, detectori Cerenkov diferențiali, detectori Cerenkov inelari pentru formare de imagini (Ring Image Cerenkov Counter - RICH) – toți se bazează pe faptul că la trecerea unei particule printr-un mediu cu o viteză

mai mare decât viteza luminii în mediul respectiv este emisă o radiație electromagnetică (efectul Cerenkov).

Orice detector Cerenkov folosește unul sau mai multe tuburi fotomultiplicatoare pentru a detecta lumina Cerenkov și a înregistra trecerea unei particule. Detectorii Cerenkov au proprietatea de discriminare între particule care au viteze diferite. Dacă este posibilă măsurarea impulsurilor acestor particule, atunci se poate face discriminare și după masa particulelor.

Un detector Cerenkov este format dintr-un container umplut cu un material transparent la lumina Cerenkov – material aflat într-una din cele trei stări de agregare uzuale – cu indice de refracție ales în mod corespunzător.

Dacă detectorii Cerenkov cu prag și cei diferențiali sunt folosiți, în principal, pentru identificarea unor particule și separarea lor pe intervale unghiulare mici, detectorii Cerenkov inelari pentru formare de imagini pot fi folosiți pentru identificarea particulelor emise dintr-o interacție într-un domeniu unghiular mare. În acest caz este necesară folosirea unui sistem optic care să focalizeze lumina emisă într-un con Cerenkov într-un detector de rază determinată de unghiul la vârf al conului, deci de viteza particulei. Este util în spectrometre mari care folosesc câmpuri magnetice intense pentru identificarea particulelor emise în anumite intervale unghiulare.

Folosirea detectorilor cu radiație de tranziție are la bază apariția unei radiații electromagnetice atunci când o particulă cu sarcină străbate suprafața de contact dintre două materiale care au proprietăți dielectrice diferite. Detecția s-ar putea baza pe producerea de către particulă a unui câmp electric dependent de timp, atunci când variația constantei dielectrice este la nivel microscopic. Se produce o polarizare tranzientă a mediului și curentul de polarizare determină apariția radiației de tranziție. Detectorii sunt sub formă de straturi din două materiale diferite, ceea ce permite apariția radiației de tranziție la toate interfețele. Performanțele unui astfel de detector depind de geometria și materialele folosite.

Primii detectori cu radiație de tranziție au fost folosiți în experimente de raze cosmice pentru identificarea electronilor și a pionilor de energii foarte mari. În prezent a început folosirea lor și în experimente la acceleratori.

Cunoscând principiile de funcționare ale principalelor tipuri de detectori folosiți în experimente de Fizică nucleară relativistă se poate înțelege mai ușor de ce au fost selectați unii dintre ei în diferite aranjamente experimentale complexe.

III.3. Sisteme de detecție complexe pentru experimente de Fizică nucleară relativistă

III.3.1. Considerații generale

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 și sisteme de detecție asociate 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 sistemele de detecție care se folosesc în prezent în experimente de Fizică nucleară relativistă nu au la bază principii de detecție noi [3,4,6,8,11]. 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 altor sisteme de detecție, fie – în viitor – a unor principii de detecție noi [8,11,13-15].

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

deteție deosebit de complexe, dedicate unor anumite tipuri de experimente [11,15,28-30].

Orice detector complex sau orice sistem de detectori trebuie să satisfacă câteva cerințe majore. Acestea ar fi :

- (i) localizarea în spațiu a traiectoriei particulei;
- (ii) măsurarea energiei particulei;
- (iii) identificarea particulei;
- (iv) localizarea în timp a particulei.

Fiecare tip de detector va permite o acoperire mai mică sau mai mare a acestor cerințe în funcție de proprietățile pe care le are și, prin acestea, în raport cu funcțiile pe care poate să le îndeplinească.

III.3.2. Sisteme de deție folosite în unele experimente de Fizică nucleară relativistă

În marile laboratoare care dispun de sisteme de accelerare a ionilor grei relativști se folosesc numeroase tipuri de detectori. În cele mai multe situații, mai ales în ultimele două perioade din etapa sistemelor de accelerare, se folosesc aranjamente experimentale complexe care include multe tipuri de detectori, astfel încât informația obținută să fie cât mai bogată și diversă. Deoarece multe din datele experimentale care vor fi considerate în cadrul laboratorului asociat cursului de Fizică nucleară relativistă au fost obținute de autorii cursului în cadrul a două colaborări internaționale în care și-au desfășurat și își desfășoară activitatea de cercetare științifică se vor prezenta mai întâi aranjamentele experimentale cu ajutorul cărora au fost obținute, anume: spectrometrului SKM 200 de la IUCN Dubna (Colaborarea SKM 200) și sistemul de spectrometre BRAHMS de la Laboratorul Național Brookhaven (Colaborarea BRAHMS).

III.3.2.1. Descrierea spectrometrului SKM 200

Institutul Unificat de Cercetări Nucleare (IUCN) de la Dubna a fost primul care a obținut și a folosit fascicule de ioni grei relativști. De-a lungul timpului aici s-au folosit mai multe sisteme de detectori pentru experimente de Fizică nucleară relativistă. Unul dintre cele mai importante este Spectrometrul SKM 200.

Spectrometrul SKM 200 de la IUCN Dubna are următoarele părți componente importante:

- (i) camera cu streamer;
- (ii) generatorul de pulsuri de înaltă tensiune;
- (iii) sistemul de asigurare a gazelor;
- (iv) magnetul analizor;
- (v) sistemul de declanșare;
- (vi) sistemul de stereofotografiere.

Camera cu streamer a fost construită la IUCN Dubna în perioada 1972-1974. Ea a intrat în funcțiune în anul 1974 fiind folosită intens pentru studii de Fizică nucleară relativistă, atât pentru studiul generării multiple de particule și mecanismelor de producere [1-6,43-47] cât și pentru producerea de hipernuclee în ciocniri nucleare relativiste [16,48].

Dimensiunile acestei camere ($2m \times 1m \times 0.6m$) [49] au făcut ca, până în anul 1986 - anul intrării în funcțiune, la CERN Geneva, a unei camere cu streamer având dimensiunile: $2m \times 1.2m \times 0.72m$ [50] - să fie cea mai mare cameră cu streamer construită.

Cele 2 spații de lucru - determinate de prezența a 3 electrozi - pot fi observate prin două ferestre având dimensiunile următoare: $1.91m \times 0.88m$; ele sunt acoperite etanș cu peliculă de "lavsan" de $0.15 mm$ grosime. Camera este montată pe o carcasă ecran și este instalată pe un cărucior mobil, ghidabil, și plasată în spațiul special creat în magnetul analizor (Fig.I.5).

Cei trei electrozi ai camerei au forme diferite și sunt plasați astfel: la partea superioară, la mijlocul și la baza camerei. Primii sunt cilindrici, din sârmă, iar cel inferior este sub formă de placă. Formele și dimensiunile optime ale acestor electrozi au fost stabilite prin determinări experimentale, astfel încât să nu apară descărcări prin efect corona [49]. Diametrele electrozilor cilindrici au următoarele valori: $0.1 mm$, respectiv, $0.25 mm$. Pașii corespunzători sunt de $0.6 mm$, respectiv, $1.8 mm$. O placă de duraluminu prevăzută cu 9 ferestre pentru fotografierea reperelor de referință este cel de al treilea electrod al camerei cu streamer. Placa de duraluminu este înnegrită pentru a reduce reflexia luminii și a crește astfel calitatea imaginilor obținute.

Intrarea fasciculului în camera cu streamer se face printr-o fereastră de intrare plasată la circa $80 mm$ de electrodul mijlociu.

Ținta este plasată în interiorul camerei cu streamer, la circa $30-40 cm$ de fereastra de intrare. De obicei, aceasta este sub formă de disc subțire și este montată în interiorul

unui cilindru din material electroizolant și transparent, vidat și închis, ceea ce permite evitarea unor descărcări electrice parazite în timpul funcționării, precum și alte disfuncționalități în exploatare.

O altă problemă de interes este cea a **generatorului de pulsuri de înaltă tensiune**. Pe electrozii camerei se aplică pulsuri de înaltă tensiune cu amplitudini de până la 700 kV și durate de zeci de nanosecunde folosind un generator Marx [40,49] și un formator de pulsuri bazat pe un cablu dublu coaxial. Cu cât durata unui puls este mai mică, la aceeași valoare a amplitudinii, cu atât este mai mare strălucirea streamer-ilor. În condițiile date durata nu a putut fi mai mică de 10 ns, deoarece pentru valori mai mici creștea brusc contribuția efectului corona și exista pericolul defectării instalației experimentale.

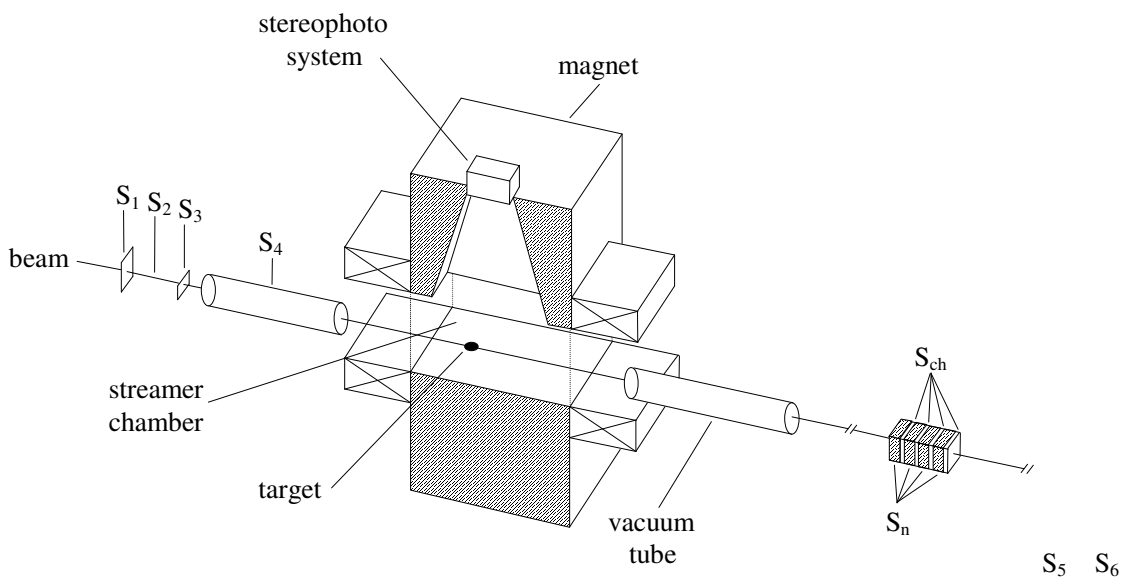


Fig.1.5. Spectrometrul SKM 200 de la IUCN Dubna

Camera cu streamer de la IUCN Dubna poate funcționa cu două tipuri de gaze nobile: heliu și neon. În cazul umplerii cu neon a camerei amplitudinea pulsului de tensiune a fost de 500 kV, iar durata pulsului a fost de 10.5 ns. La umplerea cu heliu amplitudinea pulsului poate atinge 700 kV, iar durata sa se apropie de 20 ns. Întârzierea totală a pulsurilor de înaltă tensiune este de 1 ns.

Sistemul de asigurare a gazelor pentru această cameră cu streamer *permite suflarea permanentă a gazului de lucru - heliu sau neon - în cameră, precum și colectarea și regenerarea gazului degradat. Regenerarea gazului se poate face, în funcție de necesitățile de puritate a gazului din cameră, și după întreruperea funcționării sistemului de detecție.*

Presiunea gazului în camera cu streamer este egală cu presiunea atmosferică și este păstrată pe toată durata funcționării sistemului de detecție. Urmărirea automată a presiunii din camera cu streamer se face cu ajutorul unui gaz special ("gaz holder").

Debitele necesare pentru păstrarea presiunii gazului din cameră sunt cuprinse între 5 și 500 l/h. Valoarea debitului depinde și de durata "memoriei" camerei cu streamer (circa 10 ns). Productivitatea sistemului de regenerare a gazului este de minim 3 m³/h pentru impurități mai mici de 0.01 %.

Magnetul analizor în al cărui spațiu dintre cei doi poli se introduce camera cu streamer - *magnetul ISP-41 modificat* - are suprafețele polilor de 2m x 1m, iar spațiul dintre ele de 0.5 m. Ulterior, acest spațiu a crescut la 0.76 m.

Pe polul inferior al magnetului se află ghidajele pentru introducerea camerei, precum și placa cu reперele de referință. În polul superior al magnetului s-a creat un spațiu sub formă de trunchi de piramidă, cu baza mare (1.8m x 0.8m) spre camera cu streamer, pentru plasarea sistemului de stereofotografiere. Aceste modificări ale magnetului ISP-41 au determinat scăderea valorii câmpului magnetic sub 1 T, dar nu au produs neomogenități mari ale câmpului magnetic în camera cu streamer. Astfel, în partea centrală a camerei (1.6m x 0.6m x 0.4m) neomogenitățile nu depășesc 5 %.

Sistemul de stereofotografiere este legat rigid de magnet. În funcție de experiment s-au folosit 2 până la 4 camere. *Varianta obișnuită a fost cea cu 3 camere. Planul de focalizare al obiectivelor camerelor se poziționează pe axa fasciculului incident. Distanța de fotografiere este de 2300 mm, ceea ce conduce la un raport 1:40. Fotografierea se face pe filme de mare sensibilitate (3000-4500 unități GOST și coeficient de contrast 1.6-1.8) cu lățimea de 35 mm. În general, dimensiunile unui cadru sunt de 22mm x 50 mm. Introducerea în cadrul fotografiei a unor informații de interes - numărul filmului, numărul cadrului, numărul proiecției ș.a. - furnizate de un sistem de afișare a informației*

numerice se face cu ajutorul unui *sistem optic*. De aceea, evenimentul din camera cu streamer și informația numerică corespunzătoare se fotografiază simultan.

Spectrometrul SKM 200 face parte din categoria sistemelor de detecție care dispun de declanșare primară și de declanșare secundară [3-5,12-15].

Declanșarea sa se face prin două sisteme de detectori cu scintilație plasate înainte și după camera cu streamer (Fig.I.5.). Primul sistem de detectori are rolul de a selecta fasciculul incident de tipul dorit (precizie în numărul de masă și numărul atomic al nucleului incident mai bună de 99%) și de energia dorită (același nivel de precizie). Cel de al doilea sistem de detectori permite diferențierea între ciocniri centrale și ciocniri periferice (inelastice). Modurile de declanșare ale spectrometrului SKM 200 se notează prin $T(\theta_{ch}, \theta_n)$. θ_{ch} , respectiv, θ_n , reprezintă valorile minime ale unghiurilor de emisie acceptate pentru fragmente cu sarcină, respectiv, fragmente neutre ale nucleului incident. Pentru $\theta_{ch} = 0$ și $\theta_n = 0$ se obține modul de declanșare periferic (inelastic), notat $T(0,0)$, iar pentru $\theta_{ch} > 0$ și $\theta_n \geq 0$ se obține modul de declanșare central; de exemplu $T(2,0)$, $T(3,3)$, $T(5,0)$ sunt moduri de declanșare centrale. În cazul ciocnirilor nucleu-nucleu la 4.5 A GeV/c se consideră ca fragmente de tip "stripping" ale nucleului proiectil cele pentru care impulsul este mai mare de 3.5 GeV/c pe nucleon al fragmentului.

Modurile de declanșare sunt legate de geometria și dinamica ciocnirii. Cu creșterea valorilor unghiurilor minime acceptate pentru fragmentele nucleului incident crește și gradul de centralitate a ciocnirii, ceea ce înseamnă scăderea parametrului de ciocnire. De aceea, discutarea datelor și rezultatelor experimentale se face în cadrul fiecărui mod de declanșare.

III.3.2.2. Descrierea aranjamentului experimental BRAHMS

Particule detectate cu aranjamentul experimental BRAHMS sunt: π^\pm , K^\pm , p^\pm . Detectarea se face pe un domeniu larg de rapidități și impulsuri transversale pentru toate tipurile de fascicul și la toate energiile disponibile la sistemul de acceleratori tip "collider" RHIC-BNL. Condițiile experimentale sunt foarte diferite, iar domeniile de valori ale mărimilor fizice de interes implică un aranjament experimental complex. El include 2 spectrometre magnetice care se pot roti, fiecare conținând mai multe tipuri de detectori: (a) Spectrometrul "Înainte" sau "Forward Spectrometer" (FS) ($2.3^\circ < \theta < 30^\circ$; $1.3 \leq y \leq 4.0$); (b) Spectrometrul de rapiditate mediană sau "Mid Rapidity Spectrometer" (MRS)

($30^\circ < \theta < 95^\circ$; $-0.1 \leq y \leq 1.3$). Fiecare are o structură complexă. Astfel, Spectrometrul “Înainte” este format din: 4 dipoli magnetici (D1÷D4), 2 camere cu proiecție temporală (T1, T2), 3 “pachete” de camere cu deplasare (drift) (T3÷T6), 2 hodoscoape (H1,H2) pentru măsurători de timp de zbor - 48, respectiv, 32 detectori cu scintilație - folosite la identificarea de particule cu sarcină cu impulsuri în domeniul 1-20 GeV/c, contor Cerenkov cu prag (C1), detector Cerenkov inelar cu formare de imagine (RICH). Structura Spectrometrului de rapiditate mediană include: 2 camere cu proiecție temporală (TPC1, TPC2) umplute cu un amestec de gaze Ar-CO₂; un magnet dipolar (D5) – pentru măsurători de impuls; perete de timp de zbor (TOFW); detector Cerenkov segmentat cu gaz (GASC) – pentru identificare de particule cu $p \leq 5$ GeV/c. Rezoluția în impuls a sistemului de detecție este: $\delta p/p \leq 0.01$

Celor 2 spectrometre li se adaugă detectori pentru informația globală, anume:

- a. Contori fascicul-fascicul – pentru declanșare inițială, informație de vertex, start pentru măsurători de timp de zbor - bazat pe detectori Cerenkov (35,42);
- b. Detector de multiplicitate – pentru centralitatea ciocnirii în regiunea mediană de rapiditate; conține 24 detectori de Si segmentați (168 canale; declanșare rapidă pentru selectarea centralității ciocnirii) și 40 “țigle” scintilatoare; cu ei se acoperă domeniul de rapiditate $-2.2 \leq y \leq 2.2$;
- c. Calorimetre de zero grade (ZDC) – de același tip cu cele pentru celelalte experimente de la RHIC; sunt situate în spatele celor doi magneți ai fasciculului (DX); se folosesc pentru măsurători de luminozitate și stabilirea condițiilor geometrice ale ciocnirii (măsurători de neutroni emiși înainte).

Cele 3 sisteme de detecție dau informații asupra centralității în domeniile: $-2.2 \leq y \leq 2.2$, $3.2 \leq |\eta| \leq 4.3$, precum și la 0° . În Fig.I.6 este prezentat aranjamentul experimental BRAHMS.

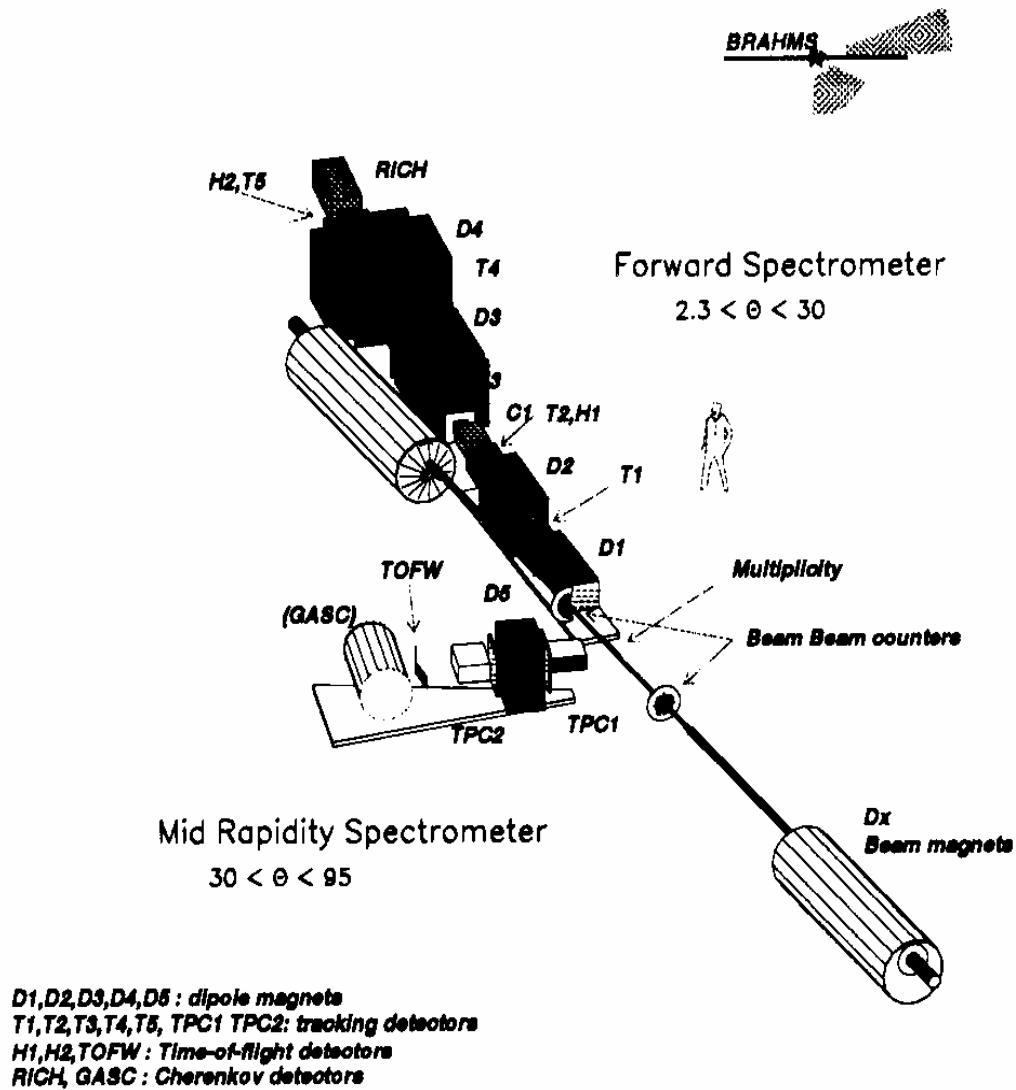


Fig.I.6. Aranjamentul Experimental BRAHMS de la RHIC-BNL

III.4. Remarci finale asupra metodelor și mijloacelor experimentale folosite în experimente de Fizică nucleară relativistă

Pentru realizarea unui aranjament experimental complex, care să permită extragerea de informații fizice cât mai complete este necesară folosirea unor mijloace și

metode experimentale adecvate. De aceea, nu se poate gândi corect un experiment în absența cunoștințelor specifice din diferite domenii ale Fizicii nucleare experimentale. Datorită faptului că dezvoltările științifice și tehnologice actuale nu permit unei singure persoane să stăpânească toate cunoștințele, atât în plan experimental, cât și în plan teoretic, experimentele sunt gândite și realizate practic, astăzi, de grupuri din ce în ce mai mari de fizicieni. Lor li se adaugă ingineri specializați în probleme de accelerare, câmpuri magnetice, criogenie, tehnica vidului, transmiterea și stocare informației, tehnici asistate de calculator. Unele din aceste aspecte au reieșit, probabil, din prezentarea făcută în această parte a cursului unor metode și mijloace experimentale specifice Fizicii nucleare relativiste.

Nu se poate concepe realizarea unui experiment corect în absența unor modalități corecte, repetabile și reproductibile de obținere a datelor experimentale. De aceea, pentru orice fizician care dorește să facă cercetări în domeniul Fizicii nucleare relativiste, obținerea unui bagaj minim de cunoștințe în domeniul metodelor și mijloacelor experimentale este obligatorie, chiar dacă dorește să se implice în probleme precum modelarea dinamicii acestor ciocniri sau investigarea tranzițiilor de fază din materia nucleară creată în astfel de ciocniri.

Pentru a se ajunge la informația fizică dorită este necesară o atentă și corectă selectare și prelucrare a datelor experimentale primare în vederea obținerii informației asupra mărimilor fizice de interes. Acestui nou pas în obținerea rezultatelor experimentale îi este consacrată a doua parte a cursului.

Bibliografie la partea I-a

- [1]. A.S.Goldhaber, H.H.Heckman - Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.28(1978)161
- [2]. D.K.Scott - Prog.Part.Nucl.Phys.IV(1981)5
- [3]. Al.Jipa - Teză de doctorat - Universitatea București, Facultatea de Fizică, 1989
- [4]. C.Beșliu, N.Ghiordănescu, M.Penția - Studii și Cercetări de Fizică 29(1977)817
- [5]. A.M.Baldin - Prog.Part.Nucl.Phys.IV(1981)95
- [6]. E.M.Friedlander, H.H.Heckman - Treatise on Heavy Ion Science - Plenum Press, New York and London, 1984, vol.IV, pag.460
- [7]. R.Stock - Phys.Rep.135(1986)259
- [8]. C.W.Fabjan - Preprint CERN CERN-EP 88-73(1988)
- [9]. K.D.Gross - GSI Report GSI-93-44(1993)
- [10]. H.Geissel - Preprint GSI-94-70(1994)
- [11]. Courier CERN - colecția pe anii 1991-1996
- [12]. C.W.Fabjan, H.G.Fisher - Rep.Prog.Phys.43(1980)1003
- [13]. G.Jarlskog, D.Rein (editors) - Large Hadron Collider Workshop, Aachen, 4-9.X.1990, Preprint CERN CERN 90-10(1990), Preprint ECFA 90-133(1990)
- [14]. Th.Farbel - Experimental Techniques in High Energy Nuclear and Particle Physics - World Scientific, Singapore, 1991
- [15]. W.R.Leo - Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments - Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 1995
- [16]. C.Beșliu, Al.Jipa, Irina Tudorașcu, R.Zaharia - Analele Universității București - Fizica XLIII(1994)26
- [17]. Max Born - Fizica atomică - Editura Stiintifică și Enciclopedică, București, 1974
- [18]. K.N.Muhin - Fizică nucleară experimentală - Editura Tehnică, București, 1981 (vol.I)
- [19]. H.Crawley-Milling - Rep.Prog.Phys.46(1983)51
- [20]. M.Pignanelli - Prog.Part.Nucl.Phys.XV(1985)483
- [21]. S.Nagamiya et al - Phys.Rev.C24(1981)971
- [22]. S.Nagamiya - Prog.Part.Nucl.Phys.XV(1985)363
- [23]. R.Stock - Prog.Part.Nucl.Phys.XV(1985)455
- [24]. H.J.Specht - Prog.Part.Nucl.Phys.XV(1985)479

- [25]. V.Metag - Prog.Part.Nucl.Phys.XXX(1993)75
- [26]. P.J.Bussey, I.G.Knowles (editors) - Proceedings of the XXVII International Conference on High Energy Physics, 20-27 July 1994, Glasgow, Scotland, UK - IOP Publishing Ltd, Brristol and Philadelphia, 1995
- [27]. A.K.Wroblewski et al (editors) - XXVIII-th International Conference on High Energy Physics, 25-31.VII.1996, Warsaw (Poland), World Scientific, Singapore, 1997
- [28]. ***** - <http://www.rhic.bnl.gov>
- [29]. ***** - <http://www.cern.ch>
- [30]. Colaborarea BRAHMS – Experimentul BRAHMS. Stadiul actual și perspective - Conferința Națională de Fizică, Constanța, 21-23.IX.2000 – comunicare orală prezentată de către I.S.Zgură
- [31]. W.H.Tait – Radiation detection – Butterworths, London, Boston, Sydney, Wellington, Toronto, Durban, 1980
- [32]. I.S.Hughes - Elementary particles - Cambridge University Press, Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney, 1991
- [33]. C.W.Fabjan, R.Wigmans – Rep.Prog.Phys.52(1989)1519
- [34]. H.H.Gutbrod, A.M.Poskanzer, H.G.Ritter – Rep.Prog.Phys.52(1989)1267
- [35]. R.P.Mount – Rep.Prog.Phys.55(1992)1385
- [36]. A.Foglio Para, M.Mandelli Bettoni – Nucl.Instr.Meth.Phys.Res.70(1969)52
- [37]. J.W.Muller – Nucl.Instr.Meth.Phys.Res.112(1973)47
- [38]. G.E.Chikovani et al – Nucl.Instr.Meth.Phys.Res.29(1964)261
- [39]. B.A.Dolgoshein et al – Nucl.Instr.Meth.Phys.Res.29(1964)270
- [40]. P.Rice-Evans – Spark, Streamer, Proportional and Drift Chambers – The Richelieu Press, London, 1974
- [41]. S.P.K.Tavernier - Nucl.Instr.Meth.Phys,Res.225(1984)642
- [42]. V.Eckardt et al - Nucl.Instr.Meth.Phys.Res.225(1984)651
- [43]. V.D.Aksinsnko et al – Nucl.Phys.A348(1980)518
- [44]. A.U.Abdurakhimov et al – Nucl.Phys.A362(1981)376
- [45]. M.Anikina et al – Phys.Rev.C33(1986)895
- [46]. Al.Jipa, C.Beșliu, Maria Iosif, R.Zaharia – Il Nuovo Cimento A112(1999)179
- [47]. C.Beșliu, Al.Jipa et al – Nucl.Phys.A662(2000)446

- [48]. E.Okonov – ANOMALON Project. Lettetr of intents – JINR Dubna 1991
- [49]. A.U.Abdurakhimov et al – Preprint JINR 13-10692(1977)
- [50]. A.Bamberger et al – Phys.Lett.B184(1987)271
- [51]. I.Lazanu – Introducere în Fizica acceleratorilor de particule – Editura Universității din București, 1997
- [52]. E.O.Lawrence, N.E.Edlefsen – Science 72(1930)376
- [53]. E.O.Lawrence, M.S.Livingston - Phys.Rev.40(1932)19
- [54]. V.Veksler – J.Phys. (USSR)9(1945)153
- [55]. E.M.McMillan – Phys.Rev.68(1945)143
- [56]. H.D.W.Kerst et al – Phys.Rev.102(1956)590
- [57]. G.K.O’Neill – Phys.Rev.102(1956)1418
- [58]. R.Hagedorn – Relativistic Kinematics - W.A.Benjamin Inc., New York, Amsterdam, 1964