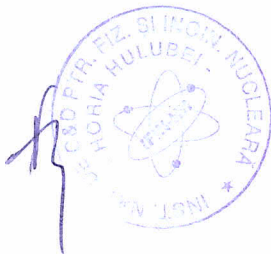


Contractor: IFIN-HH
Cod fiscal : RO 3321234

Anexa 10 la Contract nr. 21N/2023
(anexa la procesul verbal de avizare interna nr. 1400/20.11.2024)

De acord,
DIRECTOR GENERAL
Dr. Nicolae Marius Mărginean



Avizat,
DIRECTOR DE PROGRAM
Dr. Mihai Radu

A handwritten signature in blue ink, belonging to Dr. Mihai Radu, is located below the 'Avizat' section.

RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI

Contractul nr.: 21N/01.01.2023

Proiectul: PN 23 21 01 03

Cercetare fundamentală a dinamicii și structurii materiei nucleare pe domenii largi de temperatură, presiune, densități de energie și cercetare aplicativă a straturilor subțiri.

Faza: Nr. 4

Testarea TRD în condiții similare cu cele specifice aranjamentului CBM.

Termen de încheiere a fazei: 20.11.2024

1. Obiectivul proiectului:

Dezvoltarea activităților de cercetare fundamentală în fizica atomică și nucleară și domenii conexe

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:

Dezvoltarea unor noi generații de detectori

3. Obiectivul fazei:

Dezvoltarea lanțului de achiziție, transport și procesare de date asociat TRD2D în cadrul mCBM în vederea pregătirii producției pentru CBM.

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

Participarea la campaniile de achizitie de date de la mCBM. Testarea in mCBM a componentelor TRD. Dezvoltarea componentelor software specifice in cadrul CbmRoot. Reconstructia de traiectorii.

5. Rezumatul fazei:

Detectorul de particule TRD2D si electronica de procesare asociata (Front-End Electronics [FEE]) a fost dezvoltat (C&D) in cadrul proiectelor NUCLEU realizate in DFH al IFIN-HH pentru a fi instalat in cadrul experimentului CBM. Acest experiment este o parte importanta a proiectului international FAIR care se construiesc pe langa institutul GSI Darmstadt Germania la care ROMANIA este tara membra fondatoare.

Avand la baza o camera proportionala (Multi Wire Proportional Chamber [MWPC]) optimizata pentru fluxul si multiplicitatea de particule prevazute pentru zonele centrale ale CBM, detectorului TRD2D are extensii originale. Printre acestea se numara

i. electrodul de citire (pad-plane [PP]) cu o partitie in forma de triunghi pentru masurarea in doua dimensiuni (de aici extensia "2D" a numelui)

ii. ASIC-ul FEE, FASP, capabil de imperechere a electrozilor de citire (pad) si pre-procesare a semnalului pentru estimarea cu precizie a timpului si amplitudinii. Deasemenea, timpul mort foarte scurt este esential pentru acest chip, care permite masuratori de peste 1.0 MHz frecventa de repetitie pentru valori medii preconizate in experiment de cca. 0.7 MHz, etc.

iii. Placa de integrare FEE (Front-End Board [FEB]) este o alta componenta originala a sistemului care contine facilitati de digitizare, impachetare si transport al datelor compatibile cu cerintele zonelor centrale ale CBM si cu sistemul de achizitie de date (DAQ) al acestuia; DAQ dezvoltat independent, identic pentru toate sistemele de detectie din componenta CBM.

In vederea armonizarii tuturor solutiilor tehnice propuse pentru CBM de diferiti membrii ai colaborarii (peste 500 participanti), un experiment de fezabilitate a fost pus la punct, mini CBM (mCBM), folosind fascicule livrate de acceleratorul existent SIS18, care urmareste testatarea, in conditii realiste, a sistemelor propuse pentru CBM cum ar fi: detectori / senzori, FEE, transport de date, software de selectie si analiza si semnale fizice (reconstructii de particule lambda) cu potential de benchmark. Participarea cu success la toate aceste faze ale experimentului este obligatorie pentru acceptarea solutiei noastre, TRD2D, ca si componenta principala a experimentului CBM chiar din prima zi de achizitie de date (probabil 2028). In continuare vom detalia elementele de calibrare dezvoltate de noi pentru a estima preformantele detectorului nostru, rezultate in completarea celor deja prezentate intr-un raport anterior [1].

Calibrarea amplificarii si a etichetei de timp pentru FEE

Pentru obtinerea de informatii obiective cu privire la particulele incidente efectele care tin de instrumentul de masura trebuie sa fie minime in raport cu semnalul de

masurat (e.g. pozitie, energie, timp). Pentru aceasta se impune egalizarea raspunsului detectorilor cu privire la o referinta cunoscuta cu o precizie relativa suficient de buna.

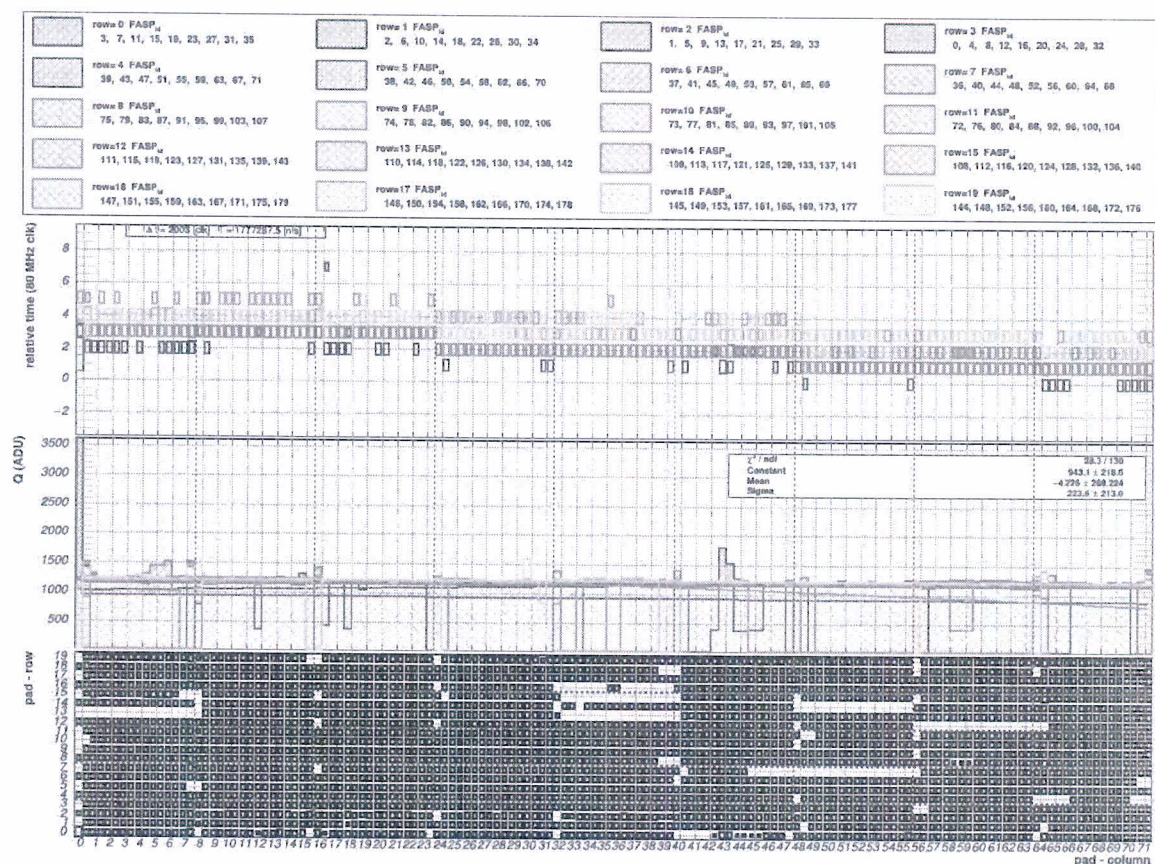


Fig. 1: Inregistrarea unui semnal de pulser cu un modul TRD2D; Lista FASP-uri (panel 1), distributia in timp pe canal (panel 2), distributia de semnal pe canal (panel 3) si distributia spatiala (panel 4).

Caracteristicile de amplificare si timp ale fiecarui canal de electronica, din cele 2880 care sunt folosite pentru o camera TRD2D complet echipata, variaza de la canal la canal ca urmare a variabilitatii procesului de fabricatie a FASP si/sau a variabilitatii parametrilor tehnici al celorlalte componente aflate pe placa FASPRO. Pentru a compensa aceasta variabilitate, o procedura de injectarea a unui semnal cunoscut, identic si sincron pe toate canalele care opereaza o camera, a fost pus la punct prin design. Punctul de inserare al acestui semnal este electrodul anodic.

In Fig.1 se poate urmări, in raport cu diferite observabile, inregistrarea unui semnal de la pulser intr-o camera TRD2D. Lista FASP-urilor este prezentata in panel-ul 1 (sus), acestea fiind grupate pe cele 20 de randuri de pad-uri ale unei camere TRD2D marcate in culori diferite, fiecare rand fiind operat de 9 FASP-uri. In al doilea panel este prezentat raspunsul in timp al FEE la semnalul sincron introdus. Se observa un efect de intarziere al raspunsului electronicii de la dreapta la stanga in limita a 2 clk (25 ns) ca urmare a distribuirii etichetei de timp la cele 180 FASP. Acest efect sistematic este semnificativ, fiind egal cu rezolutia temporală a unui semnal FASP si trebuie calibrat. In panelul 3 avem distributia in amplitudine a semnalului pentru cele 2880 de canale. Estimarea si

calibrarea variatiile constructive de la canal la canal vor fi explicate in continuare. In panelul 4 al Fig. 1 este prezentata distributia spatiala a canalelor care raspund la semnalul de pulser. Zonele albe reprezinta zone neoperate.

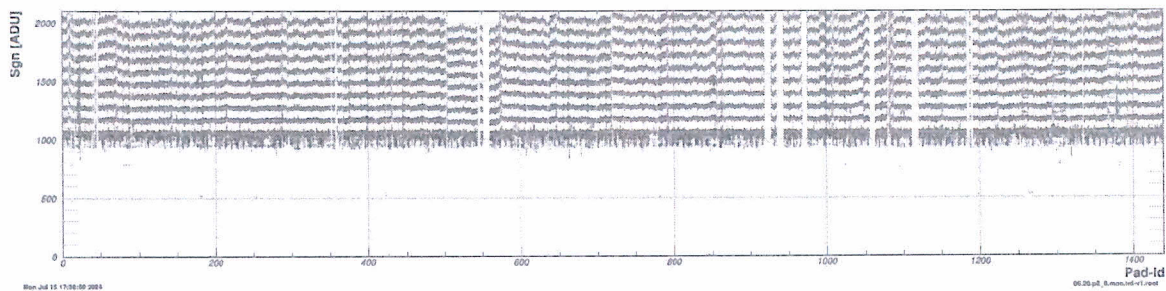


Fig. 2: Masuratori ale amplitudinii de semnal pe canal FASP, cu pulserul, ca functie de numarul canalului

In Fig. este prezentata o statistica a semnalelor de pulser pe toate cele 2880 canale FASP atasate unei camere TRD, pentru cateva valori (10) diferite ale semnalului de intrare, pentru fiecare canal FASP. Se observa o variatie de la canal la canal pentru acelasi semnal de intrare, care trebuie scazuta sub limita rezolutiei medii a masuratorilor individuale.

In Fig.3 este prezentata o sectiune prin graficul din Fig. 2 pentru canalul 3 al FASP-ul 144. In panelul de

sus sunt prezentate masuratorile pentru cele 10 valori ale semnalului pulserului. Se observa o variatie intrinseca a raspunsului pentru valori identice ale semnalului de intrare care definesc precizia de masurare a sarcinii per canal FASP. Aceasta se calculeaza pe baza unui fit cu o curba gaussiana (curbele rosii in panelul de sus). In panelul de jos este prezentata corelatia dintre valoare medie a semnalului masurat

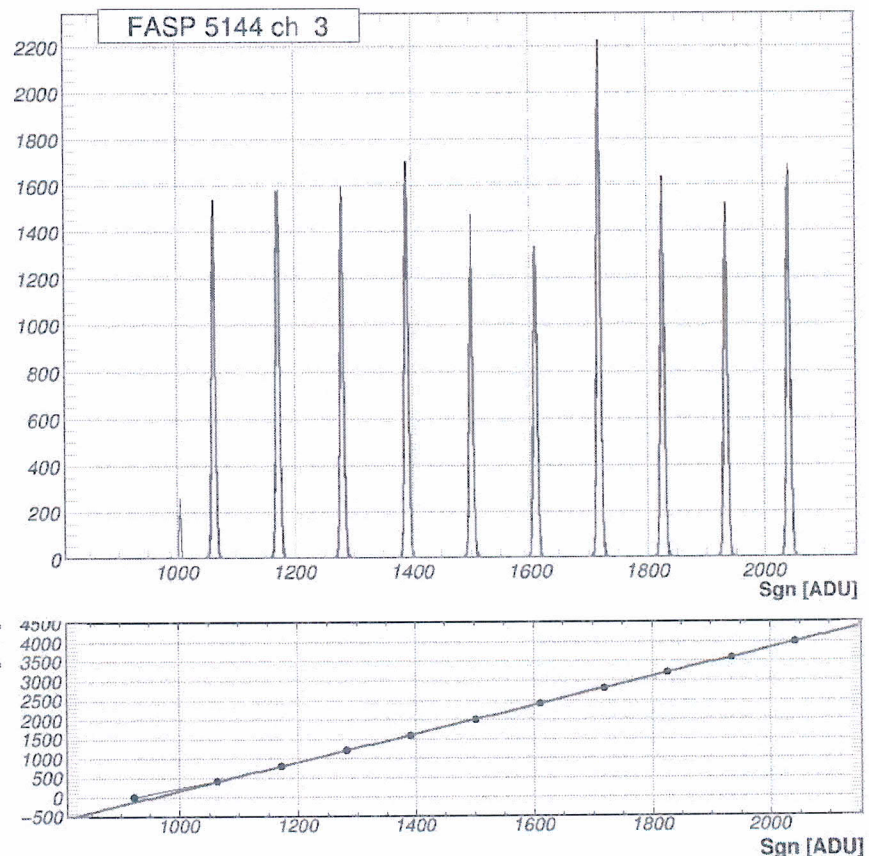


Fig. 3: Procedura de calibrare a semnalelor pentru fiecare canal in ADC units (ADU) -FASP (sus) si liniaritatea raspunsului FASP (jos).

axa orizontala - si valoarea de intrare a semnalului pulserului setata din exterior. Corelatia masurata este fitata cu o dreapta pentru a se evidentia liniaritatea raspunsului FASP si a se defini parametrii de calibrare ai fiecarui canal, respectiv ordonata la origine (baseline estimat) si panta graficului (amplificare efectiva) .

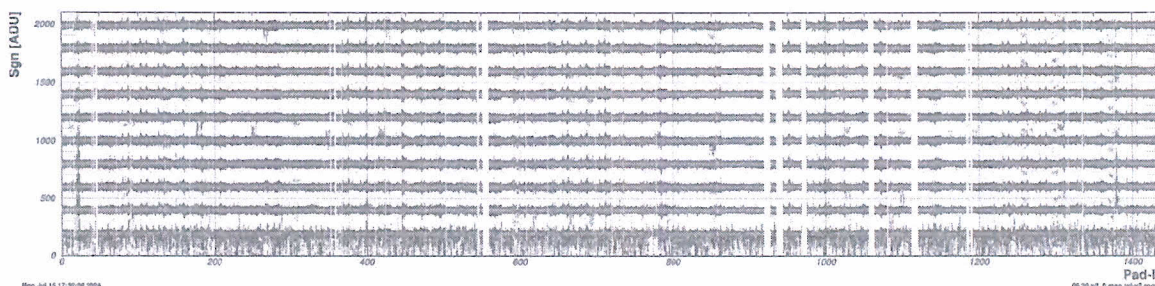


Fig. 4: Raspunsul **calibrat** al FEE la 10 valori diferite ale semnalului incident de la pulser, ca functie de canalul FASP pentru un modul TRD2D.

In Fig. este recalculat raspunsul FEE la acelasi set de impulsuri de pulser, cu considerarea calibrarii fiecarui canal FASP prin procedura descrisa in Fig. . Se observa ca variatia de la canal la canal (approx. 2 canale ADU) este atenuata (identitatea raspunsului pentru acelasi semnal de-a lungul setului de canale FASP implicate in achizitia de date) sub valoarea rezolutiei efective a unui canal (approx. 5 canale ADU). O procedura similara este aplicata etichetei temporale atasate fiecarui semnal FASP (vezi Fig. , panel 2 sus) astfel incat variatia etichetei temporale pe toata suprafata detectorului sa fie mai mica decat variatia medie intrinseca pe canal.

Alinierea detectorilor mCBM pentru estimarea performantelor TRD2D

Pentru a evalua performantele detectorului TRD2D - in raport cu rezolutia de pozitie 2D - in conditii realiste este nevoie, pe langa calibrarea unor aspecte care tin de detectorul insusi (descise in paragraful anterior) de pregatirea unor masuratori de referinta, independente si impartiale (engl. unbiased). Experimentul mCBM descris anterior, ofera aceasta posibilitate prin definirea de **track-uri reconstruite**. Aceste track-uri sunt functii (6D) interpolate printr-un set de **hit-uri** judicios selectate. Hit-urile sunt vectori de pozitie atasati unor zone de detectie pentru care densitatea, distributia si corelatia temporala de semnale este sugestiva pentru interactia unei particule in volumul activ. Hit-urile sunt identificate de fiecare sistem de detectie in parte pe baza specificitatilor de inregistrare ale acestora. Este de presupus ca fiecare astfel de hit este calculat astfel incat efecte care tin de neuniformitati in detector (e.g. vezi paragraf anterior pentru componenta FEE a TRD2D) sunt anulate in raport cu performantele intrinseci de detectie. Pentru analiza noastra sistemele de detectie considerate pentru referentiere sunt STS (engl. Silicon Tracking System), TRD1D (TRD cu pad-uri dreptunghiulare) si ToF (engl. Time of Flight). Hit-urile sunt atasate unor sisteme de referinta (geometrie software) care incearca sa imite in limite de precizie si detaliu rezonabile, experimentul real. *Abaterea experimentului real fata de aranjamentul propus (ideal, proiectat) dar si a sistemului de referinta propus fata de acesta stau la baza conceptului de **ne-aliniere**.* Solutia acestei probleme se refera la gasirea unui set de translatii-rotatii atasate fiecarui element de detectie in parte, care sa produca track-uri

corecte din punct de vedere matematic, adica pentru care parametrul χ_k^2 (k numar de grade de libertate) sa fie distribuit conform distributiei gamma $W_1(1, k)$. Pentru calcularea **corecta** a parametrului χ_k^2 trebuiesc indeplinite **simultan** urmatoarele conditii:

1. setul de hituri folosit pentru regresia track-ului trebuie sa nu contine hit-uri care sunt produse de alte particule decat cea modelata de track (engl. fake hits).
2. hiturile - ca vectori de pozitie - trebuiesc sa fie estimati independent de efectele specifice de detectie (e.g. calibrari incomplete)
3. hiturile trebuiesc sa fie complementate printr-o matrice de covarianta care modeleaza **corect** incertitudinea (e.g. in pozitie) atasata conversiei de la distributia de semnale masurate la estimarea vectorului de pozitie atasat hit-ului.

Se observa ca lista de criterii care stau la baza estimarii parametrului χ_k^2 este ia insasi dependenta de definita track-ului insusi. Astfel aceasta problema se rezolva numeric, iterativ, prin folosirea unor conditii simple de imparialitate si a unor referinte geometrice externe. In continuare vor fi detaliate aceste conditii pentru datele masurate in interactii Ni-Ni la 1.93 AGeV in aranjamentul mCBM.

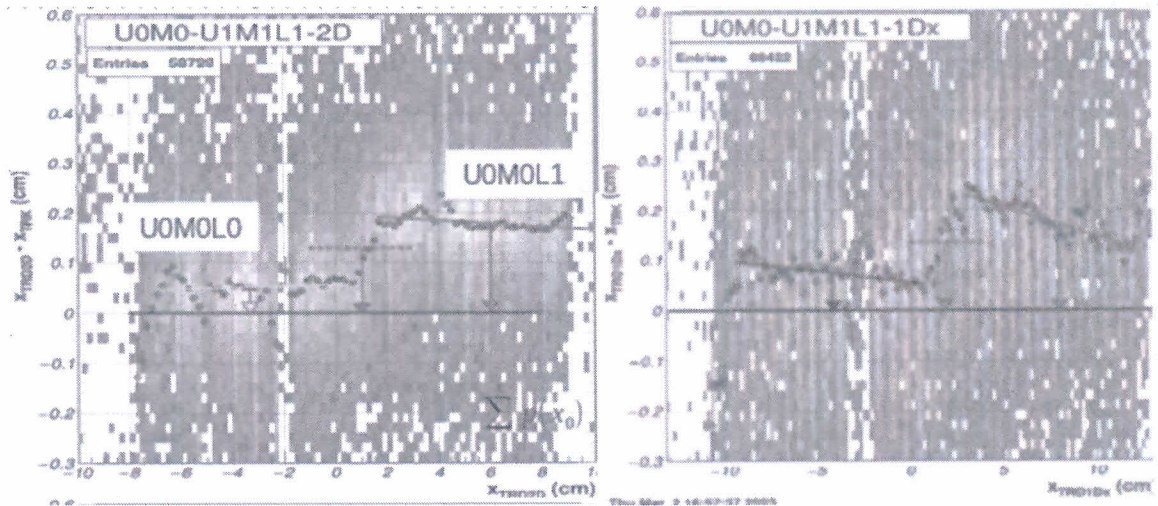


Fig. 5: Principiul de aliniere al detectorilor pentru mCBM. Proiectia track-urilor generate in STS pe "ecranul" format de detectorii TRD2D (stanga) si TRD1Dx (dreapta).

Aflat in afara oricarui camp magnetic, experimentul mCBM, foloseste o varianta simplificata de functii track, pentru care, singurele abateri de la liniaritate sunt produse de efecte de imprastiere (engl. scattering) in materialul pasiv al experimentului. In plus, componenta temporala a hit-urilor este ignorata, prin folosirea unei proceduri de tip fereastră de timp. Prin aceasta metoda se defineste un super set de hit-uri, construite in toate sistemele de detectie, interpretate ca fiind produse de particule produse sau corelate cu o unica interactie a proiectilului in tinta. Pentru aceste ipoteze simplificatoare conditiile de imparialitate se definesc pe baza distributiilor diferentelor reziduale, simultan pe directiile x-y, pentru toate sistemele incluse in definirea track-urilor. In Fig. 5 este prezentat principiul acestei metode prin reprezentarea distributiei diferentei, pe directia x, dintre pozitia hit-urilor in detectorii TRD2D si TRD1Dx si interpolarea track-urilor generate prin selectarea unor senzori *de aliniati* ai STS (U0M0LO

si UOM0L1 in figura). Punctele reprezinta valori medii ale acestor distributii pentru valori date ale masuratorilor TRD. Distributia acestor valori medii este subliniata prin fit-uri lineare pe sectoare de valori x TRD. Aceste fit-uri sunt interpretate dupa cum urmeaza:

a. liniile albastre pline reprezinta deviatii ale senzorului UOM0L0. Abaterea fata de linia neagra reprezinta deviatia senzorului pe directia considerata (x in figura) iar panta acestora este proportionala cu abaterea pe directia z dintre senzor si ecran.

b. liniile rosii pline sunt interpretate in mod similar pentru senzorul UOM0L1.

c. liniile rosii punctate reprezinta deviatii pe directia considerata (x in figura) a detectorilor TRD.

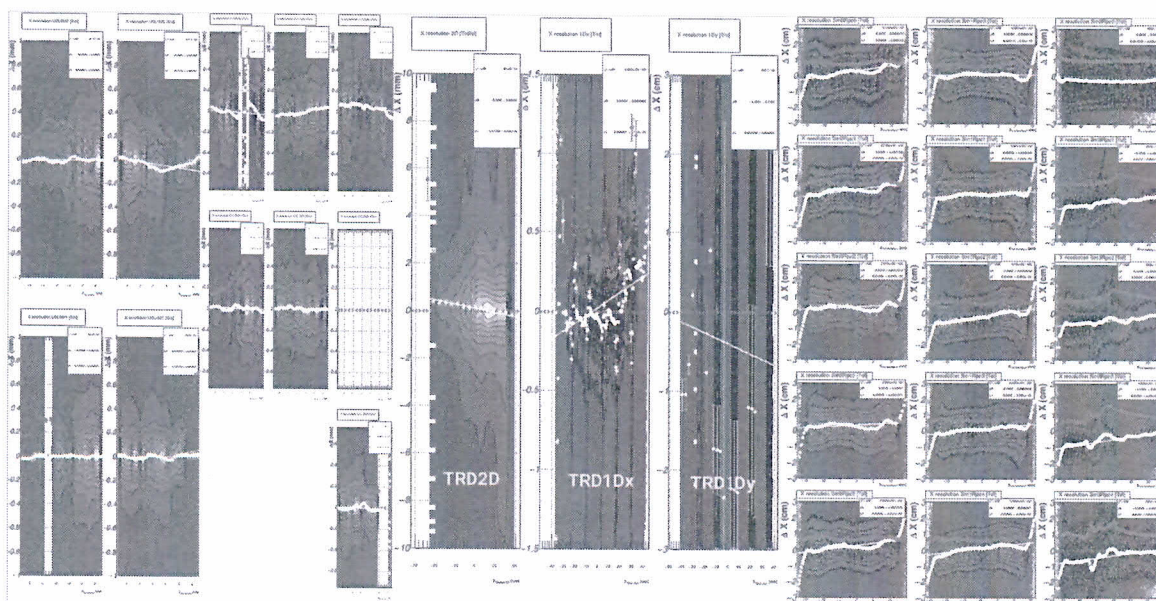


Fig. 6: Rezultatul alinierii detectorilor STS, TRD si ToF prezenti in aranjamentul experimental mCBM pe **directia x**; Distributia punctele albe fata de linia rosie punctata reprezinta precizia de aliniere.

Dupa cuantificarea acestor tipuri de deviatii si corectarea lor prin definirea de matrici de translatie (componenta de rotatie este neglijata) generarea de track-uri este reluata iar distributiile sunt recalulate. Procedura converge in momentul in care toate valorile medii se distribuie in apropierea liniei orizontale negre (Fig.), simultan, pentru toate sistemele incluse in experiment.

In Fig. 6 este prezentat rezultatul procedurii de aliniere pentru toti cei 28 de detectori ai mCBM (detectorul TRD2D marcat cu galben in mijloc) pentru directia x (orizontala fata de pozitia experimentului). Aceiasi detectori, dar din punctul de vedere al rezolutiei pe directia y (verticala fata de pozitia experimentului) sunt prezentati in Fig. 7. Precizia procedurii de aliniere poate fi urmarita prin compararea abaterii punctelor albe fata de linia punctata rosie situata la $\Delta x / \Delta y = 0$ simultan pentru toate cele 28 x 2 proiectii. Cateva observatii:

a. functia descriind abaterile reziduale poate fi descompusa intr-o serie Taylor pentru care termenul de ordinul 0 reprezinta abaterea pe directia masurata a detectorului in cauza iar termenul de ordin 1 abaterea pe directia z. Termenii de ordin mai inalt care apar (e.g. oscilatia pentru TRD1Dx pe directia x Fig. 6 respectiv pentru

TRD1Dy pe directia y Fig. 7) fiind provocati de efecte sistematice in detector, efecte de margine (vezi cazul ToF) sau limitari ale calibrarii.

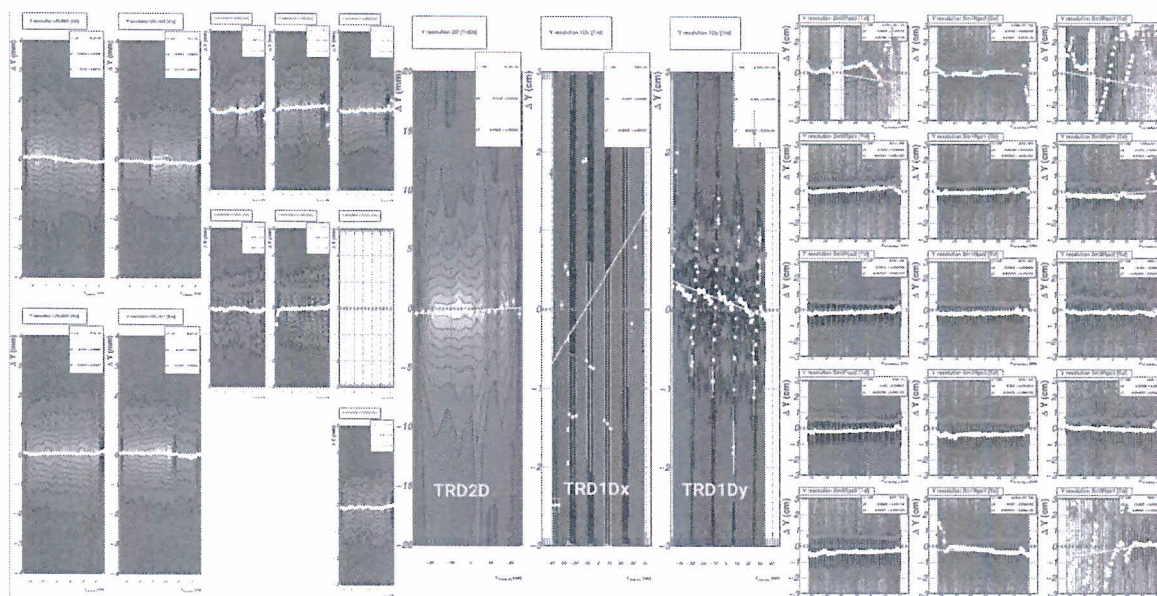


Fig. 7: Rezultatul alinierii detectorilor STS, TRD si ToF prezenti in aranjamentul experimental mCBM pe **directia y**; Distributia punctele albe fata de linia rosie punctata reprezinta precizia de aliniere.

b. tinand seama ca sistemul de aliniat prezentat aici este un sistem de 28×2 ecuatii cuplate in care insasi termenii in functie de care se calculeaza (hit-uri, geometrie, calibrari) sunt variabile, precizia solutiei este pentru moment modesta.

c. vectorii de pozitie a hiturilor se definesc in planul x-y pentru pozitii z determinate geometric. Aceasta limitare duce la un efect de "armonica" in care detectorii se pot pozitiona la distante relative pe directia z **proportionale** cu cele reale. Acest efect este anulat prin compararea cu elemente fizice care se pot identifica in setul de track-uri si care nu sunt folosite in procesul de aliniere (termeni redundanti); rezultate prezentate in intalniri de specialitate [2].

Estimarea incertitudinilor masuratorilor de pozitie a detectorilor mCBM pentru estimarea performantelor TRD2D

Am mentionat anterior importanta matricilor de covarianta atasate hiturilor pentru corecta estimare a parametrului χ_k^2 pentru fiecare track. Desi exista estimari pentru fiecare detector in parte, o masura experimentală pentru verificarea acestora folosita in aceste cazuri este determinarea distributiei valorilor **pull-urilor** si compararea acestora cu distributia normala $G(0,1)$. Pull-urile se definesc ca diferente reziduale normate la suma patratica a incertitudinilor componentelor, in cazul nostru interpolarea track-urilor si a hiturilor. In ambele cazuri exista aproximatii care fac ca pull-urile sa se abata de la definitie. O procedura similara celei pentru aliniere, de data aceasta aplicata parametrului sigma al distributiilor din Fig. 6 si 7 (punctele rosii in figuri) duce la rezultatul prezentat in Fig. 8. Se observa ca distributia Gauss descrie bine masuratorile pentru majoritatea detectorilor din figura iar parametrii sunt apropiati de valorile 0

pentru medie si 1 pentru sigma. Totusi pentru TRD1Dx (al 5-lea plot pe randul de sus) si respectiv TRD1Dy (al 5-lea plot pe randul de jos) distributiile masurate sunt mai bine reprezentate de distributii de tip **box** datorita lipsei de snzitivitate de pozitie a acestor detectori pe directiile specificate.

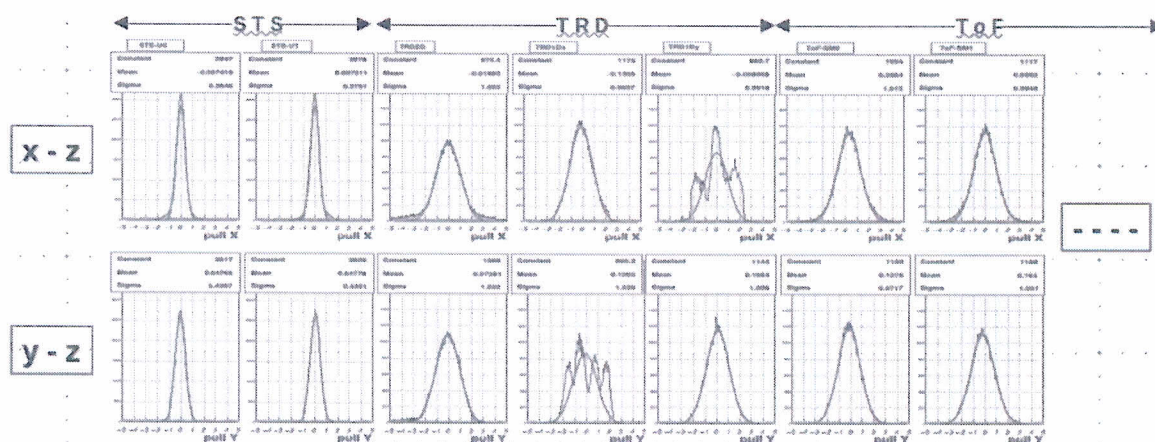


Fig. 8: Valori ale pull-urilor pentru diferite grupuri de detectori apartinand sistemelor STS, TRD si ToF de la mCBM si compararea acestora cu distributia Gauss (rosu).

Rezultatele prezentate in Fig. , dupa calibrarea incertitudinilor hit-urilor generate de fiecare detector reprezinta o solutie acceptabila pentru sistemul de 28×2 ecuatii de incertitudine care definesc set-ul de track-uri identificate prin aceasta analiza specifica. Este evident ca setul de ecuatii de aliniere este slab corelat cu setul de incertitudini facand convergenta sistemului mult mai complicata.

Folosind toate calibrarile mentionate anterior si repetand aceste procedee pentru fiecare noua imbunatatire a unuia dintre ei (atat calibrari individuale ale detectorilor cat si imbunatatiri ale parametrilor de aliniere sau incertitudine) se pot obtine track-uri de referinta cu incertitudini cat mai corect estimate. Acesta **incertitudini corecta** ale elementului martor va fi folosita apoi pentru a deriva gradul de precizie cu care se pot face estimari ale incertitudinilor diferentiale de pozitie a detectorului nostru TRD2D.

6. Rezultate, stadiul realizării obiectivului fazei, concluzii și propuneri pentru continuarea proiectului.

In cadrul acestui raport au fost descrise cateva dintre metodele puse la punct pentru a operationaliza detectorul nostru TRD2D in cadrul experimentului mCBM. Datele masurate cu TRD2D au fost incluse in lantul de achizitie, analiza si calibrare al experimentului pentru intercompararea tuturor sistemelor prezente. Rezultatele obtinute pana acum arata o buna integrare la toate nivele de procesare de date ale viitorului experiment CBM si deschid calea obtinerii de informatii revelatoare in ceea ce priveste performantele reale ale TRD2D. Acestea sunt foarte importante pentru a promova producerea camerelor TRD2D ce urmeaza a fi contractate pentru CBM.

Obiectivul fazei a fost realizat integral.

Bibliografie

[1] Testarea integrata a subsistemelor realizate in DFH (TRD, RPC si FEE asociata) prevazute a intra in componenta aranjamentului experimental CBM (Partea II); Proiect PN 19 06 01 03 / 14.09.2022 Faza 10.

[2] A QA framework for a uniform view on CBM measurements and MC. Application to mCBM22/24 data taking campaigns; A. Bercuci, CBM Collaboration meeting 15-20.09.2024 Prague.

Responsabil proiect


Prof. Dr. Mihai PETROVICI