

**Contractor: Institutul National de Cercetare-Dezvoltare
pentru Fizica si Inginerie Nucleara "Horia Hulubei"**

Cod fiscal : RO3321234 (anexa la procesul verbal de avizare interna nr.)

**De acord,
DIRECTOR GENERAL
Dr. Nicolae Marius MARGINEAN**

**Avizat,
DIRECTOR DE PROGRAM
Dr. Mihai RADU**

RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI

Contractul nr.: 10N/2019

Proiectul: PN 19 06 01 03

Activitati de cercetare si dezvoltare legate de studiul materiei in conditii extreme de temperatura si presiune si structura nucleara exotica

Faza: nr. 9

Simulari realiste in cadrul CbmRoot ale prototipului TRD in setup-ul experimental mCBM la rate de interactie de 10MHz

Termen de încheiere a fazei: 14.09.2022

1. Obiectivul proiectului:

Cercetari teoretice si experimentale in descrierea materiei subatomice.

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:

Obtinerea unui cod C++ compatibil cu framework-ul CbmRoot care sa produca rezultate comparabile cu masuratorile obtinute in cadrul experimentului mCBM la rate de mari de interactie.

3. Obiectivul fazei:

Simulari realiste in cadrul CbmRoot ale prototipului TRD in setup-ul experimental mCBM la rate de interactie de 10 MHz.

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

- Producerea semnalelor in detector pentru diferite conditii de operare a acestuia
- Digitizarea semnalelor tinand cont de caracteristicile ASIC-ului frontend FASP
- Constructia de clusteri de semnal in modul de operare free-running
- Determinarea parametrilor de pozitie si energie ale hit-urilor TRD și comparatia cu informatia din MC

5 Rezumatul fazei:

Introducere

Detectorul de radiații de tranziție Transition Radiation Detector (TRD) cu sensibilitate de poziție pe două dimensiuni (TRD-2D) a fost considerat pentru a face parte din ansamblul experimental mCBM. Experimentul este un precursor al CBM (Compressed Baryonic Matter) dezvoltat în cadrul FAIR al GSI în Darmstadt, Germania. Pentru evaluarea performanțelor detectorului TRD, măsurătorile sunt comparate cu rezultatele modelării parametrice a lanțului de detecție având ca input simulări Monte Carlo (MC) sau descrieri statistice. În cazul de față s-au avut în vedere următoarele procese fizice și electronice:

1. Determinarea spatio-temporală a caracteristicilor sarcinii electrice generate de ionizarea gazului de lucru
2. Modelarea caracteristicilor amplificare-timp a Electronicii Front-End (FEE) bazată pe chip-ul FASP (Fast Analog Signal Processor)
3. Modelarea fluxului de date fără condiție de trigger (Free-running) a Sistemului de Achiziție de Date (DAQ)
4. Estimarea efectelor sistematice induse de colectarea incompletă a sarcinii pe pad-uri pentru valoarea răspunsului detectorului în ceea ce privește poziția și energia hit-urilor din detector.

Generarea semnalelor pentru diferite condiții de operare ale detectorului

Producerea semnalelor în detectorul TRD-2D se referă la determinarea timpului de colectare a sarcinii produse prin ionizare și la valoarea avalanșelor produse de acestea, indusă pe pad-urile de citire și implicit distribuția acestora în spațiu.

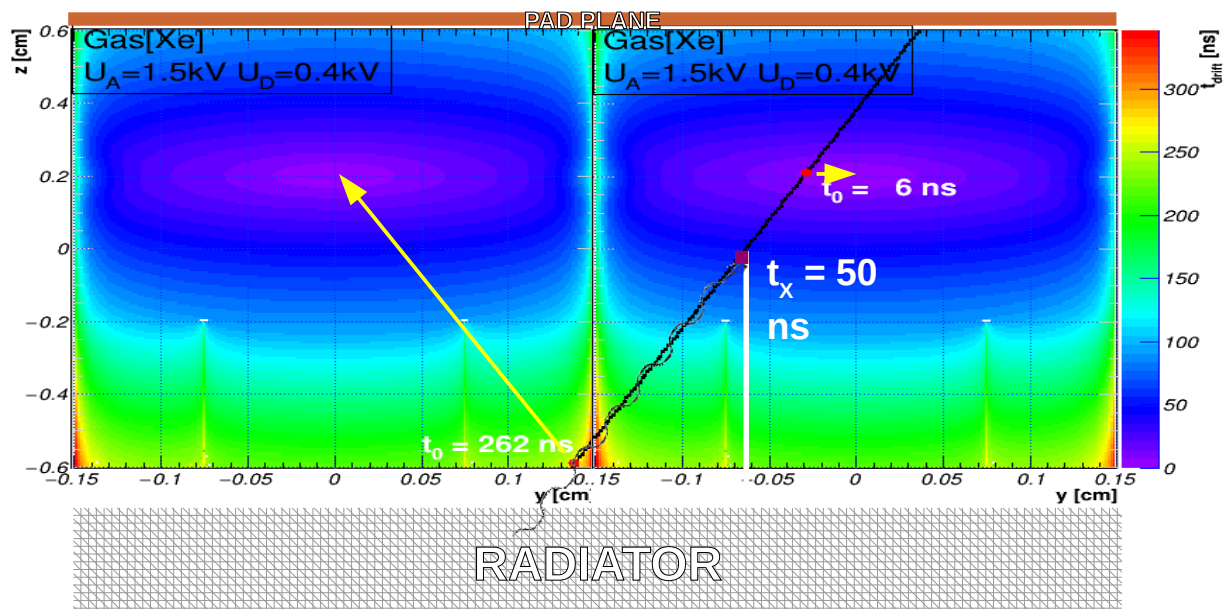


Figure 1: Descrierea schematică a modului de calcul al timpului de răspuns al detectorului TRD-2D pentru un electron incident (linia neagră) și a fotonului X produs prin mecanism TR (linia ondulată) în două celule de amplificare alăturate.

În Figura 1 este prezentat cazul practic al unui electron, care traversează volumul activ al detectorului descris de coordonata z cu valori în domeniul $-0.6 - 0.6$ cm. Acesta este marcat prin linia neagră, diagonală. Codul de culoare din figura reprezintă timpul de drift al unui electron produs în volumul de detecție pentru condițiile de operare ale detectorului cu amestecul $XeCO_2$ la tensiunea anodică 1500V și cea de drift 400V. În radiator este simulată producerea unui foton X (linia ondulată) prin mecanismul radiației de tranziție (Transition Radiation (TR)). Acesta este simulat paralel cu electronul, pentru simplitate. Ca urmare a acestor interacții și a geometriei de detecție sunt puse în evidență trei componente de timp :

1. componeta promptă la 6 ns de la apariția electronului (cadrant dreapta)
2. componenta intermediară la 50 ns generată de absorbția fotonului TR prin efect fotoelectric
3. componeta întârziată, generată la intrarea electronului în camera de ionizare, cu o valoare a frontului începând cu 262 ns după trecerea electronului.

Pentru fiecare particulă, algoritmul de transport (GEANT în acest caz) furnizează informația referitoare la energia depusă în mediul activ (Edep). Admitând o distribuție uniformă a acesteia de-a lungul traiectoriei, fiecare segment are alocată o energie proporțională cu lungimea acestuia. Pentru TR energia se disipă punctual.

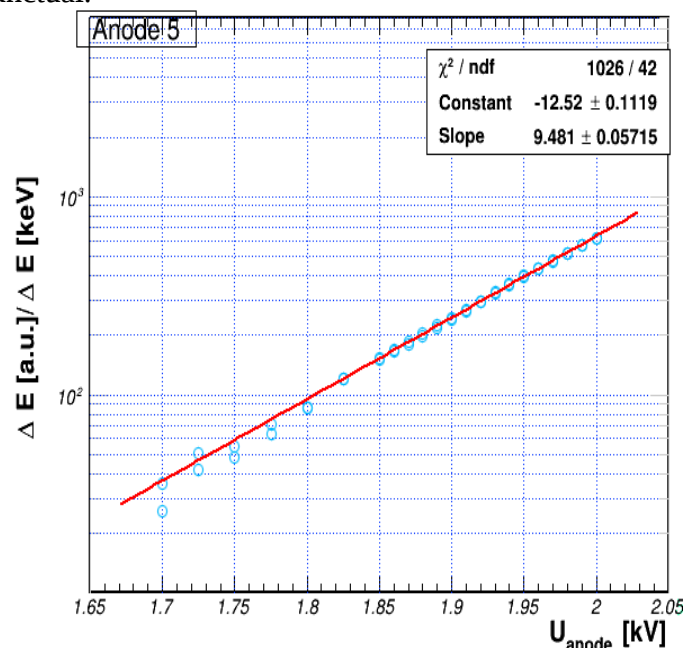


Figure 2: Caracteristica de gain a detectorului pentru firul anodic 5 estimată cu ajutorul spectrului de ^{55}Fe

Conversia energiei depuse (keV) în energie măsurabilă via potențial de ieșire amplificator FASP se face prin considerarea caracteristicii de gain a detectorului. În Figura 2 este prezentată această caracteristică așa cum a fost ea dedusă prin măsurarea cu foarte bună precizie în condiții reale a spectrului de ^{55}Fe . Pentru completitudine prezentăm aici și aceste rezultate care dovedesc bunul control al achiziției și reconstrucției energiei în detectorul TRD-2D. În Figura 3 este prezentată corelația dintre energia fizică depusă în detector în unități de keV conform datelor nucleare și energia reconstruită (a.u.) prin identificarea a patru componente spectrale în spectrul de Fe. Figura 3 este obținută prin varierea tensiunii anodice, și păstrarea tensiunii de drift. Pentru fiecare patru valori de tipul $E[keV] - E$ [unități arbitrare] un fit liniar condiționat în 0 este obținut. Pantele acestor fit-uri sunt apoi reprezentate în Figura 2 ca funcție de tensiunea anodică. Fit-ul exponențial al acestora este folosit în simulare pentru a calcula valoarea totală a semnalului la ieșirea FASP.

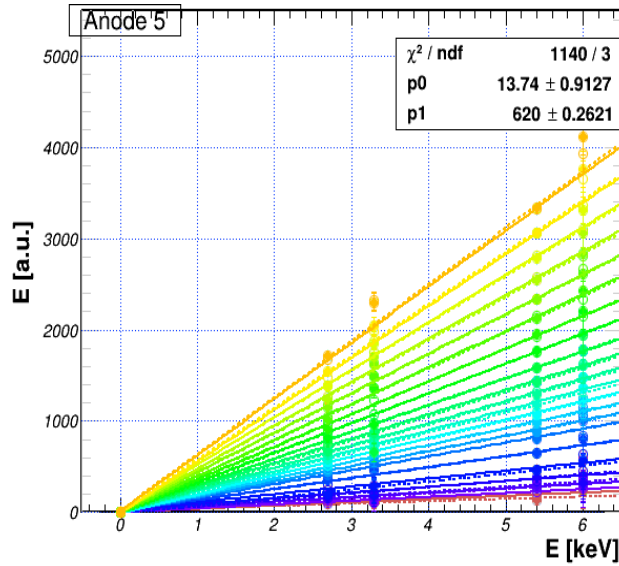


Figure 3: Determinarea caracteristicii de amplificare a TRD-2D prin reconstruirea spectrului de ^{55}Fe pentru diferite tensiuni anodice.

Din punct de vedere al mecanismului de detectie, energia colectata pe suprafața planului de pad-uri (Pad Plane (PP) în Figura 1) nu se obtine printr-o masuratoare unica ci ca suma a semnalelor obtinute pe fiecare dintre pad-urile care formeaza functia de răspuns (Pad Response Function (PRF)). Pentru geometria de pad-uri triunghiulare cu care este operat TRD-2D aceasta presupune distribuirea energiei pentru fiecare segment de track (conform exemplului din Figura 1), centrat pe poziția norilor de sarcina formati la anodul corespunzator.

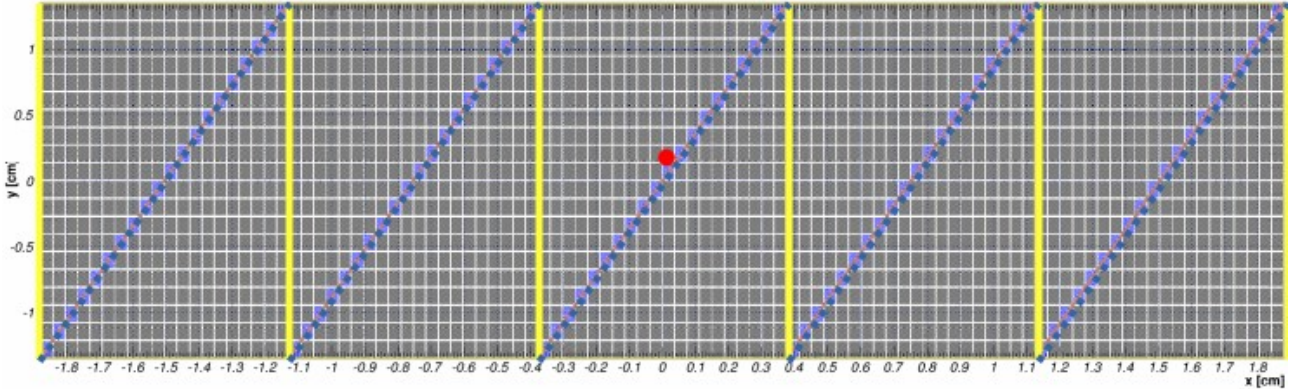


Figure 4: Discretizarea PRF-2D pentru cazul pad-urilor triunghiulare ale TRD-2D

$$\begin{aligned}
 w = q^{\nabla/\Delta} &= \int_{-pw/2}^{pw/2} dx \int_{-k_x}^{k_x} dy \mathcal{G}(x|x_p, \sigma_x) \mathcal{G}(y|y_p, \sigma_y) \\
 &\approx \sum_i \sum_j \mathcal{G}(x_i|x_p, \sigma_x) \mathcal{G}(y_j|y_p, \sigma_y) dA(i, j)
 \end{aligned}$$

În Figura 4 este prezentata distribuirea spatiala a sarcinii produse în detector pe pad-urile triunghiulare. Centrul norului de amplificare este marcat prin punctul roșu iar limititele pad-urilor sun marcate cu galben și albastru. Suprafața este împărțită în sectoare dreptunghiulare (gri) pe care PRF se considera constanta. În aceste condiții, pentru o alegere judicioasa a segmentarii PP se poate folosi aproximatia de mai sus pentru sarcina depusa pe fiecare triunghi.

Digitizarea semnalelor tinand cont de caracteristicile ASIC-ului frontend FASP

Pana la acest moment simularea se refera la generarea de semnale pentru fiecare pad, pentru un moment de timp (conform distributiei timpului de drift), semnal aflat în corelatie cu setarile de amplificare ale detectorului prin intermediul calibrarilor obtinute pe baza masuratorilor realiste ale spectrului de ^{55}Fe . Pentru a generaliza răspunsul FASP pentru orice semnal de intrare va trebui sa consideram în continuare răspunsul uni-canal al acestuia la o sarcina de intrare cunoscută.

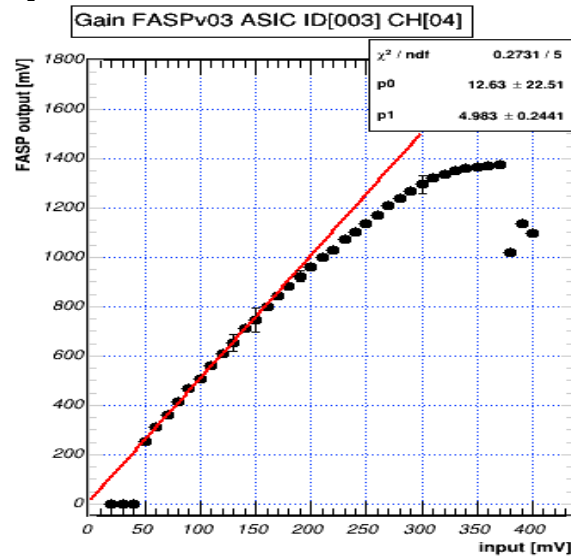


Figure 5: Masurarea caracteristici de raspuns a FASP prin injectarea unui semnal treapta cu o valoare cunoscuta.

În Figura 5 este prezentata caracteristica de răspuns în sarcina a FASP pe un canal. Aici este prezentata corelatia dintre un semnal de intrare de valoare cunoscută și răspunsul amplificatorului. Curba are mai multe zone:

1. zona sub prag pana la valori de 50 mV
2. zona de liniaritate pana la aproximativ 150 – 200 mV
3. zona de neliniaritate pana la 370 mV
4. zona de tăiere peste 370 mV

Pentru a produce simulari realiste a răspunsului detectorului, caracteristici FASP de tipul celei prezentate în Figura 5 sunt estimate pentru fiecare canal FASP în parte (peste 100k pentru CBM @ SIS100) în momentul realizării procedurilor de QA pentru electronica front-end (Front End Electronics (FEE)) și folosite în elaborarea răspunsului FEE.

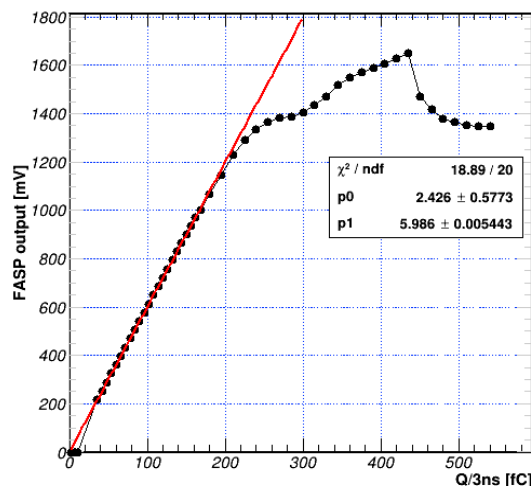


Figure 6: Caracteristica teoretica (CADENCE) a FASP $U = f(Q)$

Pentru a corela energia depusa, văzută ca sarcina colectată în unitatea de timp pe pad-urile de citire, cu semnalul la ieșirea FASP, este introdusă caracteristica teoretică $U = f(Q)$ a FASP așa cum este ea simulată în CADENCE (vezi Figura 6). Aceasta, împreună cu calibrarea canal cu canal din Figura 5, produc o estimare veridică a răspunsului întregului lanț FEE la un semnal de intrare.

În continuare vom introduce componenta temporală a FASP pentru cele două etaje importante de procesare: preamplificator și shaper (Figura 7).

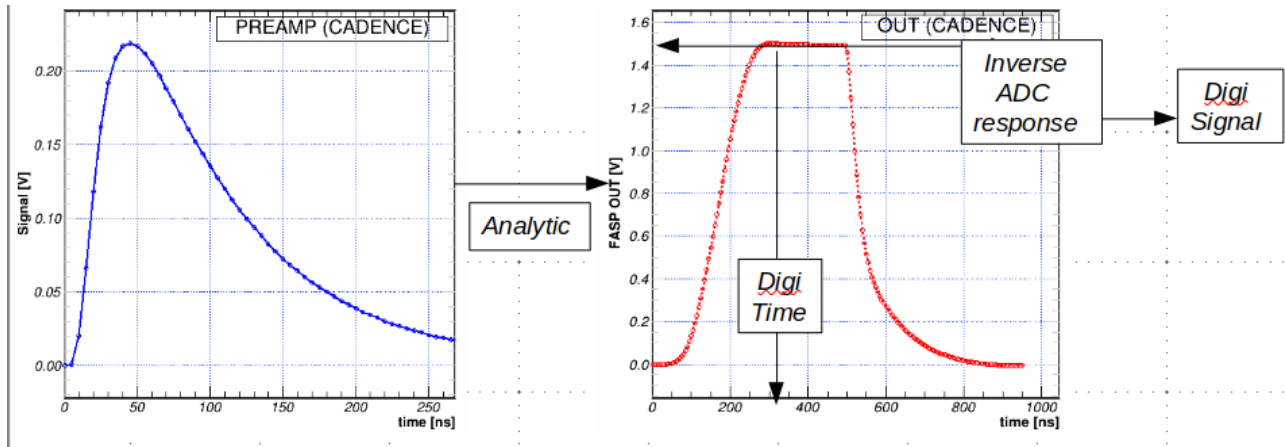


Figure 7: Răspunsul temporal al FASP în varianta simplificată pentru două etaje de procesare: preamplificator (stânga) și shaper (dreapta).

Dependența de timp a semnalului pentru primul etaj de amplificare (preamplificator) este redată în Figura 7 stânga așa cum este ea obținută din simulări CADENCE pentru un semnal de tip treaptă cu o durată de 3 ns și o sarcină integrată echivalentă cu sarcina indusă pe pad. O treaptă ulterioară de procesare a semnalului este cea de „shaper + flat-top” (Figura 7 dreapta) în care semnalul este amplificat și valoarea maximă a semnalului este păstrată pentru o perioadă de timp pentru a fi digitizată de ADC (Analog to Digital Converter). Prin simularea celor două trepte de funcționare ale FASP-ului se pot considera de asemenea evenimente suprapuse (Pile-up) de semnale (așa cum sunt cele din Figura e.g. 1) care apar în zone de detecție cu rată și/sau multiplicitate mare de particule. Un astfel de exemplu este prezentat în Figura 8.

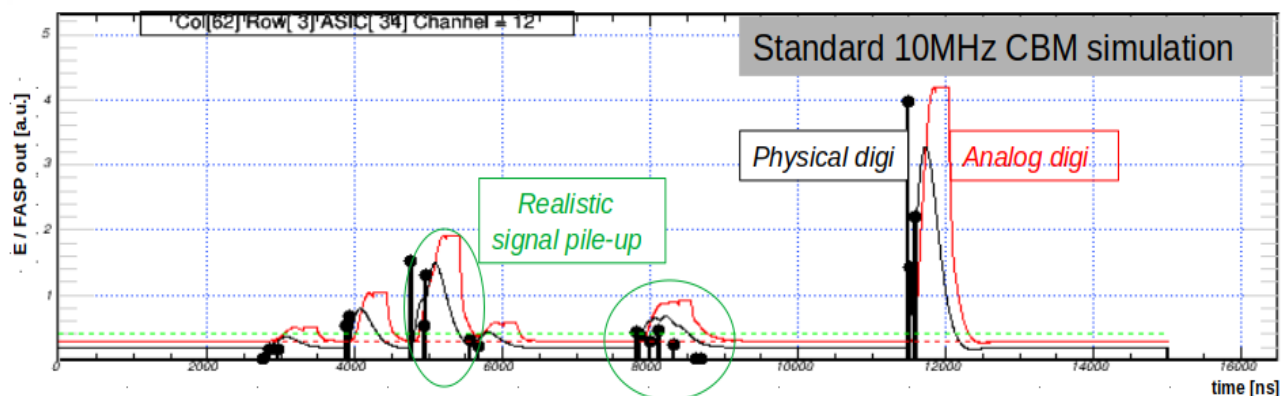


Figure 8: Simulări ale răspunsului TRD-2D + FASP per canal pentru ciocniri centrale Au-Au la rate de interacție de 10 MHz.

În Figura 8 toate elementele prezentate anterior sunt reprezentate ca funcție de timp pentru un interval „de achiziție” de 16 μ s. Semnalele care conțin informațiile despre detector sunt prezentate sub forma de bare verticale, cu o înălțime proporțională cu sarcina indusă. Semnalele care conțin și răspunsul FEE sunt prezentate cu linii continue pentru cele două trepte de simulare ale FASP, „preamp” (negru) și „shaper + flat-top” (roșu). Zonele marcate cu verde sunt momente de timp în care mai multe semnale de la detector apar în același timp dar FASP-ul le „integrează” datorită timpului de formare (Shaping Time). Răspunsul detectorului este estimat în condițiile cele mai grele, i.e. pentru interacții centrale Au-Au la o energie de 10 AGeV și o rată de 10 MHz.

O verificare a calitatii acestor modele s-a obtinut prin compararea corelatiilor temporale dintre detectorul TRD-2D și alți detectori în cadrul experimentului pilot mCBM instalat la SIS18 la GSI Darmstadt.

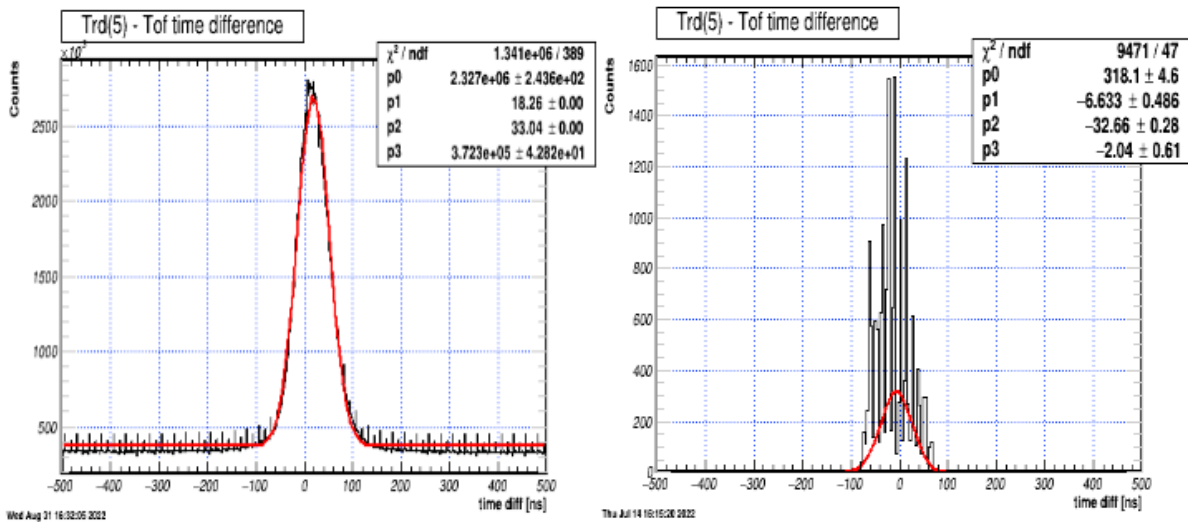


Figure 9: Compararea timpului relativ între TRD2D și ToF, folosind același set de algoritmi, pentru măsuratori în cadrul mCBM (stanga) și similari (dreapta)

```

67 // get the link to saved clusters
68 std::map<Int_t, std::list<CbmTrdCluster*>>::iterator it = fBuffer.find(row);
69 // check for saved
70 if (it != fBuffer.end()) {
71     Bool_t kINSERT(kFALSE);
72     std::list<CbmTrdCluster*>::iterator itc = fBuffer[row].begin();
73     for (; itc != fBuffer[row].end(); itc++) {
74         //if (CWRITE()) cout << (*itc)->ToString();
75
76         UShort_t tc = (*itc)->GetStartTime();
77         Int_t dt = tc - tm;
78
79         if (dt < -5) continue;
80         else if (dt < 5) {
81             if (CWRITE()) printf("match time dt=%d\n", dt);
82             if ((*itc)->IsChannelInRange(ch) == 0) {
83                 if (!(*itc)->AddDigi(id, ch, terminator, dt)) break;
84                 kINSERT = kTRUE;
85                 if (CWRITE()) cout << "          => Cl (Ad) " << (*itc)->ToString();
86                 break;
87             }
88         }
89         else {
90             if (CWRITE()) printf("break for time dt=%d\n", dt);
91             break;
92         }
93     }
94 }
95 if (!kINSERT) {
96     if (itc != fBuffer[row].end() && itc != fBuffer[row].begin()) {
97         itc--;
98         fBuffer[row].insert(itc, cl = new CbmTrdCluster(fModAddress, id, ch, row, tm));
99         if (CWRITE()) cout << "          => Cl (I) ";
100     }
101     else {
102         fBuffer[row].push_back(cl = new CbmTrdCluster(fModAddress, id, ch, row, tm));
103         if (CWRITE()) cout << "          => Cl (Pb) ";
104     }
105     cl->SetFaspDigi((d->GetType() == CbmTrdDigi::eCbmTrdAsicType::kFASP));
106     if (terminator < 0) cl->SetProfileStart();
107     else if (terminator > 0)
108         cl->SetProfileStop();
109     if (CWRITE()) cout << cl->ToString();
110 }
111 }
112 else {
113     fBuffer[row].push_back(cl = new CbmTrdCluster(fModAddress, id, ch, row, tm));
114     cl->SetFaspDigi((d->GetType() == CbmTrdDigi::eCbmTrdAsicType::kFASP));
115     if (terminator < 0) cl->SetProfileStart();
116     else if (terminator > 0)
117         cl->SetProfileStop();
118     if (CWRITE()) cout << "          => Cl (Nw) " << cl->ToString();
119 }

```

Figure 10: Algoritmul de construire al clusterilor prin înregistrarea tuturor digit-urilor distribuite alaturat spațial și temporal.

În Figura 9 este prezentat rezultatul acestei comparații pentru detectorul de referință Timp de Zbor (engl. Time of Flight (ToF)). În ambele situații este folosit același set de algoritmi pentru corelarea celor doi detectori în cadrul achiziției/simulării ne-trigger-ate (engl. Free-running). Se observă că atât pentru măsuratori cât și pentru similari parametrul **p2** de fit care descrie mărimea distribuției este similar, cu o valoare de aproximativ 33 ns (rezoluția temporală de eveniment pentru cei doi detectori). Diferențele apar datorită diferenței mari de statistică cât și a descrierii diferite a surselor de zgomot. Toate acestea însă reprezintă la acest moment detalii ce pot fi neglijate.

Constructia de clusteri de semnal in modul de operare free-running

Cum a fost specificat anterior, pentru fiecare particula, se obțin semnale în câteva pad-uri alaturate spatial, aflate într-un interval temporal de câteva zeci de ns. Setul acesta de pad-uri se numește **cluster** și reprezintă o etapa intermediara între datele masurate și estimarea parametrilor de impact a particulelor în detector. Algoritmul de construcție al clusterilor este identic pentru masuratori și date.

În Figura 10 este prezentat nucleul de selecție al algoritmului așa cum apare el în codul sursa. Se observa ca aceasta clasificare are doua tipuri de rezultate pentru fiecare digit de intrare:

- adaugarea unui digit la un cluster existent - functia *AddDigi*
- creerea unui cluster nou pornind de la digit-ul de input – functia constructor *CbmTrdCluster*

Se observa deasemenea ca particularitatile ASIC-ului FASP sunt exportate cluster-ului prin folosirea meta-informatiei *eCbmTrdAsicType::kFASP*.

Determinarea parametrilor de pozitie si energie ale hit-urilor TRD și comparatia cu informatia din MC

Hit-urile sunt reprezentate de setul de informații care aproximeaza cel mai bine parametrii de impact al particulei incidente initiale; poziție x, y, z, timp și energie depusa. Aceste informații se numesc (re)construite pentru ca se bazează pe estimarea/construirea acestor valori având ca input datele furnizate de detector, respectiv perechile semnal-timp pentru fiecare digit din cluster. Faptul ca ele sunt relateate identic cu particula incidenta este sugerat prin sufixul „re”.

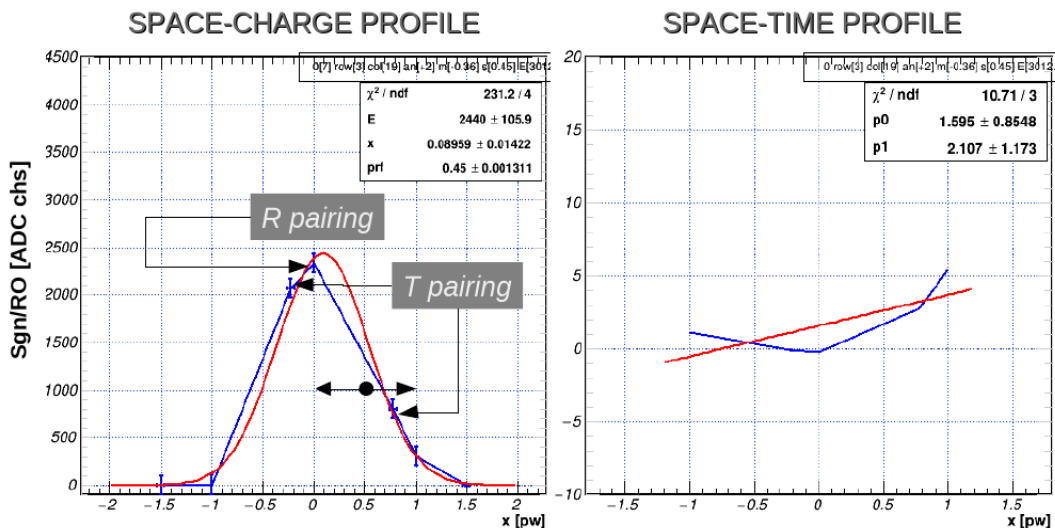


Figure 11: Re-constructia informatiei de pozitie x-y (stanga) si a timpului particulei incidente prin analiza topologiei si a valorilor digitilor din cluster (dreapta).

În Figura 11 este descrisa schematic procedura prin care se determina poziția x-y (stânga) și timpul (dreapta). PRF este aproximat în cazul determinării de pozitie cu o curba Gauss pentru care se cauta valoarea optima a positionarii semnalelor de tip „T pairing” astfel încât valoarea χ^2 normalata la numar de grade libertate (Number of degrees of freedom (NDF)) să fie minima. Acest fit optim determina deplasarea pe x fata de poziția pad-ului cu semnal maxim (valoarea parametrului **x** în figura) dar și identitatea firului anodic (valoarea parametrului **an** în titlu). Integrala acestei curbe este un estimator al energiei depuse (parametrul **E**). Pentru timp se folosește valoarea media a timpilor digit-ilor din cluster deși alți estimatori pot fi construiti pentru creșterea performantelor. Este de subliniat faptul ca metoda de identificare a firelor anodice este realizata pentru prima data pentru aceasta geometrie de citire a semnalelor. Verificare metodei prezentate aici a fost realizata în repetate rânduri prin folosirea algoritmilor descrisi aici, în mod identic, pentru simulari și masuratori, și compararea pozitiva a rezultatelor și predictiilor obtinute pe cele doua tipuri de date.

Un capitol important când vorbim de precizia informației reconstruite la nivel de hit este cel al efectelor sistematice. Aceste efecte apar ca urmare a reprezentării sarcinii depuse prin valori discrete ale semnalelor pe pad-uri (în CM al acestora) precum și a faptului ca FEE are o valoare minimă (Threshold) față de care se neglijează semnalul incident pentru digitizare și transport.

În Figura 12 sunt prezentate câteva exemple de acest tip pentru reconstrucția informației de poziție x , informației de timp și a energiei. Cunoașterea acestor efecte sistematice, corelate cu o simulare realistă a răspunsului detectorului, face ca aplicarea lor în cazul măsurătorilor să crească semnificativ rezoluția detectorului.

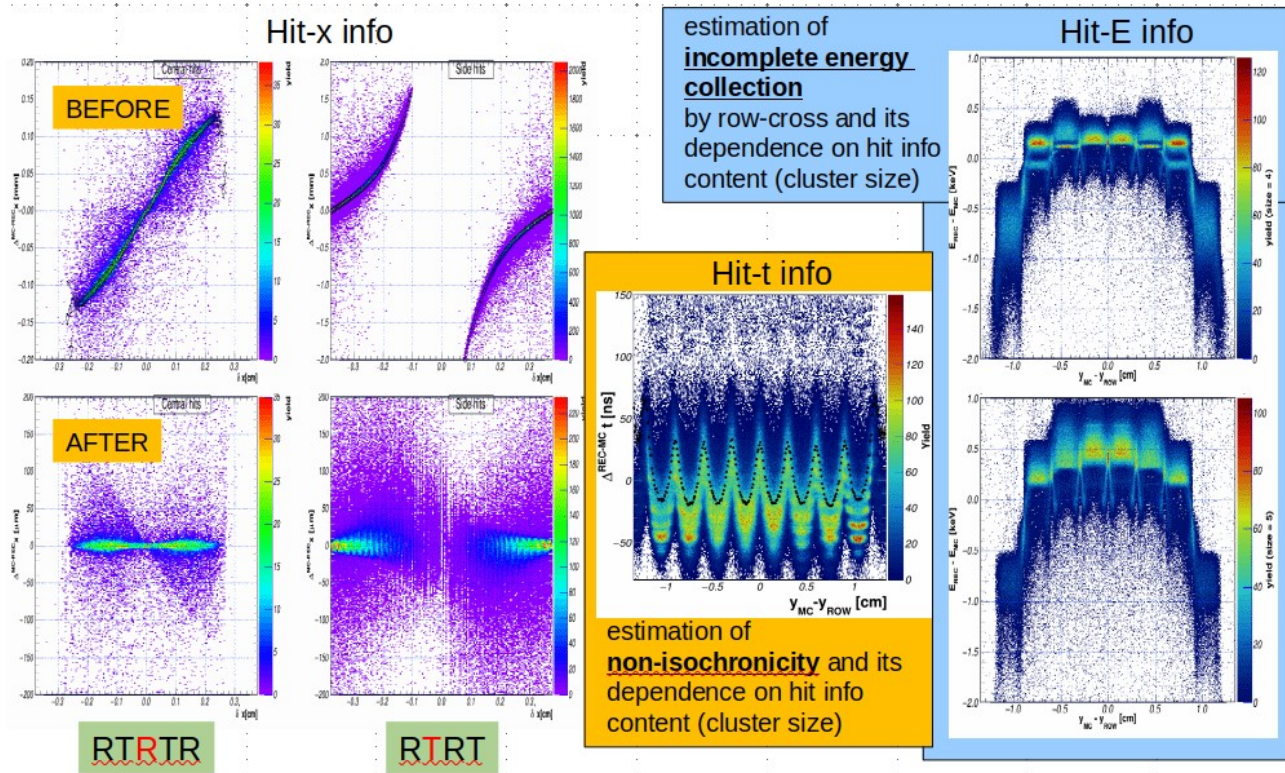


Figure 12: Exemple de efecte sistematice în detector analizate prin compararea informației reconstruite la nivel de hit cu cea din MC pentru poziție (staga), timp (centru) și energie (dreapta)

Pentru cazurile particulare prezentate în Figura 12 se observă următoarele efecte:

1. Pentru poziție x – abaterea estimată în cazul clusterelor centrale (cu pierdere de informație comparabilă pe ambele margini) este minimă pentru hit-uri centrate pe pad (simetrie perfectă) și poate ajunge la valori de 120 μm pentru particule incidente la 2.5 mm de centrul pad-ului (largime totală 7.2 mm). Pentru clusterii marginali (care apar la limita a doua coloane de pad-uri) abaterile sunt maxime în centrul pad-ului ca urmare a puternicei asimetrie generate de „pierderea” unei componente importante de sarcină pe una din marginile clusterului. Se observă că aceste efecte pot fi corectate așa cum se vede în graficele marcate ca „AFTER” în care se observă că nu mai există această dependență de poziția relativă pe pad și că rezoluția este la nivel de zeci de microni.
2. Pentru timp t – se observă corelația interesantă cu poziția y_{MC} din simulări. Fenomenul de neizocronicitate apare ca urmare a faptului că o particulă apare ca fiind mai promptă cu cât trece mai aproape de un fir anodic (maximele distribuție), diferențele fiind de 100 ns doar datorită incidentei în detector. Acest efect se poate corecta printr-o cunoaștere sub-anodica a poziției y_{REC} ceea ce este posibil în unele cazuri.
3. Pentru energie E – sunt prezentate cazuri pentru numărul de digit în cluster de 4 (dreapta sus) și 5 (dreapta jos) respectiv ca funcție de valoarea y_{MC} din simulări. Și aici se observă o degradare a energiei reconstruite pe măsura ce ne apropiem de marginile randului de pad-uri ca urmare a sharing-ului de sarcină pe alt rând. În aceste cazuri, confirmat de măsurători, vom identifica un

cluster pe rândul adiacent care sa completeze informația lipsa aici, încă o frumoasa confirmare a caracterisiticii de identificare de anozii.

6 Rezultate, stadiul realizării obiectivului fazei, concluzii și propuneri pentru continuarea proiectului (se vor preciza stadiul de implementare a proiectului, gradul de indeplinire a obiectivului cu referire la tintele stabilite si indicatorii asociati pentru monitorizare si evaluare).

Au fost dezvoltate modele parametrice pentru descrierea componentelor fizice și electronice ale sistemului de detectie TRD-2D pentru a fi comparate cu datele care vor fi achizitionate în cadrul experimentului mCBM.

Modelele de simulare urmăresc interacțiile din detector și funcționarea FEE de citire, în stransa legătura cu masuratori fizice de calibrare. Simularile sunt baza dezvoltarii algoritmilor de reconstrucție, cu valoare în determinarea performantelor de detectie al TRD în cadrul mCBM și în perspectiva a CBM.

Compararea dintre simulari și masuratori va trebui extinsa la mai multe observabile pentru a se completă cantitativ baza algoritmica cu o baza de date de calibrare care sa asigure performanța optima a TRD2D în cadrul CBM la rate mari de interacție.

Obiectivul fazei a fost realizat integral.

Responsabil proiect

Prof. Dr. Mihai Petrovici