

Testarea performanței prototipurilor de detectori cu electrozi rezistivi pentru măsuratori de timp de zbor MGMSRPC, dezvoltați pentru CBM-TOF, folosind un sistem de achiziție cu electronică auto-trigerată similar cu cel ce va fi utilizat în experimentul CBM (partea II)

1 Introducere

Experimentul Compressed Baryonic Matter (CBM) [1] de la viitorul complex de accelerare Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) [2] din Darmstadt, Germania este proiectat pentru măsurători de precizie ale corelațiilor multidimensionale dintre diferite observabile, incluzând particule cu secțiuni de producere foarte mici cum ar fi hiperonii, nucleele hiperonice, hadronii constituiți din cuarci grei sau obiecte încă necunoscute formate din combinații de cuarci și gluoni, folosind fascicule intense de ioni grei (de până la 10^9 ioni/s), furnizate de FAIR.

CBM este un experiment cu țintă fixă care își propune să investigheze materia cu densități barionice nete mari produsă în ciocniri nucleu-nucleu într-un domeniu de energii cuprins între 2 - 14 GeV/nucleon. Rezultatele obținute cu codurile de transport pentru cazul ciocnirilor centrale Au+Au prezic posibilitatea atingerii de densități de până la aproximativ 7 ori mai mari decât densitatea de saturație ($\rho_0=0.16 \text{ fm}^{-3}$), la energii ale fascicului de ~ 10 GeV/nucleon.

Programul de cercetare dedicat explorării materiei barionice puternic comprimate [3] va folosi fasciculele primare livrate de acceleratorul SIS100 (protoni până la 29 GeV, Au până la 11 GeV/nucleon, nuclee cu $Z/A = 0.5$ până la 14 GeV/nucleon). Componentele aranjamentului experimental CBM sunt prezentate în Fig. 1. Fasciculus livrat către ținta

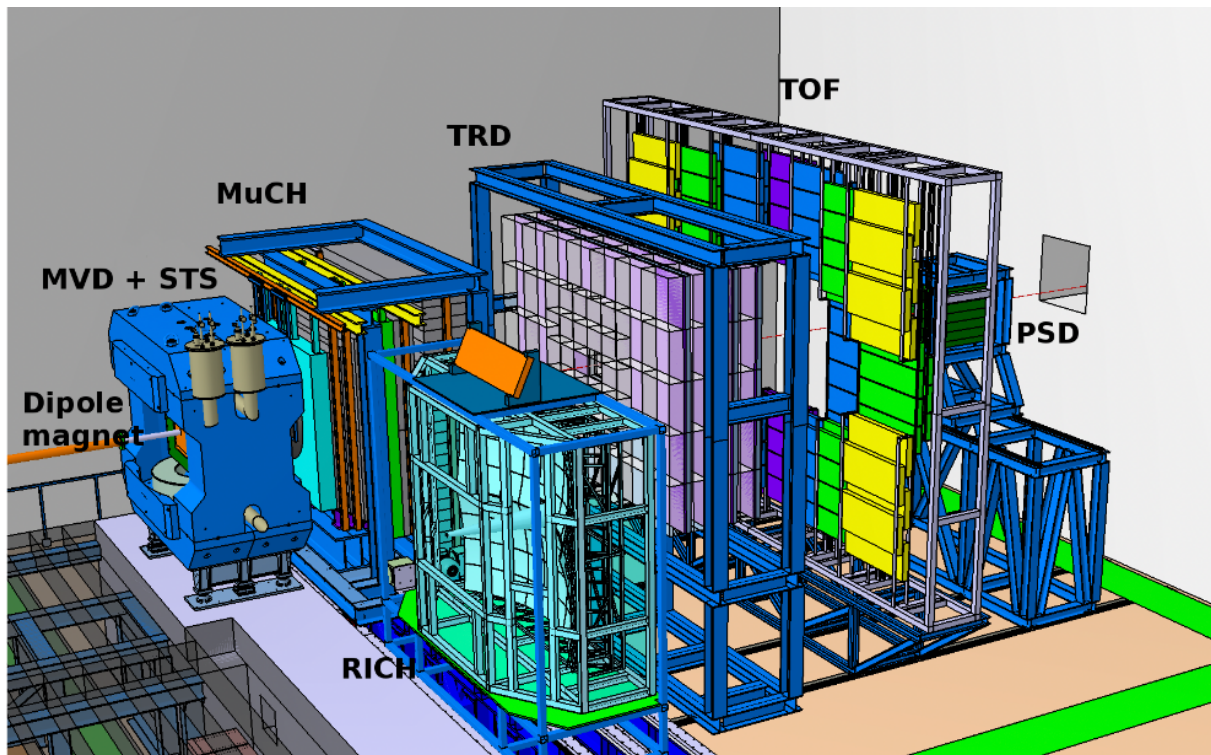


Figure 1: Aranjamentul experimental CBM de la viitoarea facilitate experimentală FAIR.

experimentului CBM va atinge intensități de până la 10^9 ioni de Au pe secundă. Rata maximă de interacție anticipată este de 10^7 reacții pe secundă cu o multiplicitate de până la 1000 de particule cu sarcină electrică pe eveniment. Pentru a atinge obiectivul de fizică dificil de a studia evenimente rare la aceste rate mari de interacție și multiplicități ridicate, aranjamentul experimental trebuie să identifice leptoni și hadroni într-un mediu cu rate mari de numărare. Acest lucru cere detectori rapizi și rezistenți la radiații, o electronică auto-trigerată și o selecție în timp real a evenimentelor ce urmează a fi stocate.

Subsistemul de timp de zbor (CBM-TOF) va fi unul din subsistemele importante ale aranjamentului experimental CBM. Cu o suprafață de 120 m^2 acest detector acoperă unghiuri polare între 2.5° și 25° cu o acoperire azimutală completă. Cerințele impuse acestui subsistem sunt să aibă o rezoluție temporală mai bună de 80 ps, și o eficiență de detecție mai bună de 95% [4]. Rezoluția temporală a sistemului cerută în experiment include atât contribuția detectorului cât și a referinței de moment zero și a electronicii asociate.

Provocarea pentru subdetectorul de timp de zbor este de a menține această performanță până la cea mai înaltă rată de numărare anticipată prin simulări Monte-Carlo, de până la 30 kHz/cm^2 în zona unghiurilor polare mici, în apropierea axei de fascicul. Pentru a satisface cerințele impuse, subsistemul de timp de zbor al experimentului CBM este bazat pe detectori cu electrozi rezistivi plan paraleli ce definesc o structură cu spații multiple [5] și citire a semnalelor pe electrozi multi-strip [6]. Granularitatea detectorilor este definită de cerința de a avea o ocupare a detectorului de $\sim 5\%$. Deoarece densitatea de traiectorii mare din zona unghiurilor polare mici scade rapid cu creșterea distanței față de axa fasciculului, dimensiunea celulei de citire crește cu creșterea unghiului polar. Pentru o valoare dată a pasului stripurilor de citire a semnalelor, aceasta creștere este satisfăcută prin creșterea lungimii stripului.

Datorită ratelor mari de interacție la care experimentul CBM este proiectat să opereze, sistemele de detecție ce compun aranjamentul experimental vor fi operate de sisteme de procesare și achiziție a semnalelor netriggerate, ceea ce înseamnă că toate semnalele furnizate de detectori și care depășesc pragul electronicii front-end vor fi procesate. În scopul minimizării procesării unui număr mare de semnale parazite ce pot rezulta din posibile reflexii, se impune o adaptare foarte bună a liniei de transmisie a semnalului corespunzătoare unui singur strip de semnal cu impedanța de intrare a electronicii front-end.

Grupul nostru din DFH/IFIN-HH a dezvoltat prototipuri de detectori cu electrozi rezistivi cu spații multiple și citire pe electrozi multistrip (MSMGRPC - Multi-Strip, Multi-Gap Resistive Plate Counter) destinate zonei centrale a subdetectorului TOF, zona care trebuie să facă față celor mai critice cerințe, așa cum a fost detaliat anterior. În acest scop, pentru construcția prototipurilor de MSMGRPC dezvoltate, s-au adoptat soluții tehnologice care să mențină performanțele la fluxuri mari de particule incidente pe suprafața detectorului. Pentru a realiza acest lucru s-au utilizat electrozi rezistivi cu rezistivitate mică, electrozi de grosime mai mică, spațiere mai mică între electrozi, la care s-a adăugat și o nouă arhitectură a electrodului de citire a semnalelor.

Prototipurile dezvoltate de-a lungul timpului, având parametrii geometrici diferiți în termeni de pas al stripului de citire, lungime a stripului și număr de spații între electrozii rezistivi, au demonstrat că cerințele de rezoluție temporală și eficiență sunt îndeplinite [7]. Testele în fascicul realizate la facilități de accelerare internaționale au arătat că detectorii performează în condiții de expunere la fluxuri mari de particule incidente [7, 8].

Asa cum am specificat mai sus, operarea în mod continuu, fără selecție de evenimente realizată hardware, impune detectorilor MSMGRPC o adaptare cât mai bună a impedanței caracteristice a liniei de transmisie a semnalului cu impedanța de intrare a electronicii front-end. Impedanța liniei de transmisie a semnalului este un parametru care depinde de proprietățile dielectrice ale materialelor electrozilor utilizați la construcția detectorilor, de grosimea electrozilor plan paraleli folosiți și de grosimea și numărul spațiilor de separare dintre electrozi, precum și de lățimea stripului.

Din acest motiv, în funcție de valorile acestor parametrii, prototipurile MSMGRPC realizate în grupul nostru au avut impedanța liniei de transmisie de 100Ω pentru un detector cu 2×5 spații de detecție și 1.4 mm lățime a stripurilor (2.54 mm pas al stripurilor), sau de 50Ω pentru același număr de spații, dar o lățime a stripurilor de 5.6 mm (7.4 mm pas

al stripurilor). Pasul stripului este, așa cum se cunoaște, suma dintre lățimea stripului și spațiul de separare dintre două stripuri.

Deoarece electronica front-end utilizată pentru procesarea semnalelor furnizate de detector are tipic o impedanță de intrare de 100Ω , în cel de al doilea caz s-a făcut o adaptare specială pentru fiecare canal de intrare al cartelelor de elektronikă front-end utilizate în testele efectuate. Ceea ce se observă din cele prezentate mai sus este că nu este simplu să fie îndeplinite simultan cerințele de granularitate și adaptare de impedanță. Pentru un număr fixat de spații de separare și aceleași materiale utilizate la realizarea detectorului, parametrul care determină valoarea impedanței liniei de transmisie este lățimea stripului de citire a semnalului, în timp ce lățimea stripurilor de înaltă tensiune determină granularitatea detectorului (pentru o lungime dată a stripului).

De aceea, două noi prototipuri MSMGRPC care satisfac cerința de granularitate a zonei centrale a CBM-TOF, având impedanța liniei de transmisie de 100Ω adaptată la impedanța de intrare a canalului de elektronikă front-end au fost proiectate și construite în grupul nostru. Estimarea impedanței liniei de transmisie s-a făcut cu ajutorul simulărilor realizate utilizând pachetul software APLAC [11] pentru circuite integrate de înaltă frecvență.

În acest raport se prezintă rezultatele obținute în testele în fascicul realizate cu acești doi detectori în termeni de dimensiune a clusterului de semnal, respectiv numărul de stripuri cu semnal într-un singur hit, parametru ce determina împreună cu lungimea stripului, granularitatea detectorului.

2 Detalii Constructive

Arhitecturile interne ale celor două prototipuri ce au fost asamblate și testate sunt prezentate în detaliu în raportul de etapă al proiectului NUCLEU PN19060103 din data de 30.07.2019.

Sunt reamintite în continuare principalele caracteristici constructive care intervin în estimarea valorii cluster-ului de stripuri cu semnal.

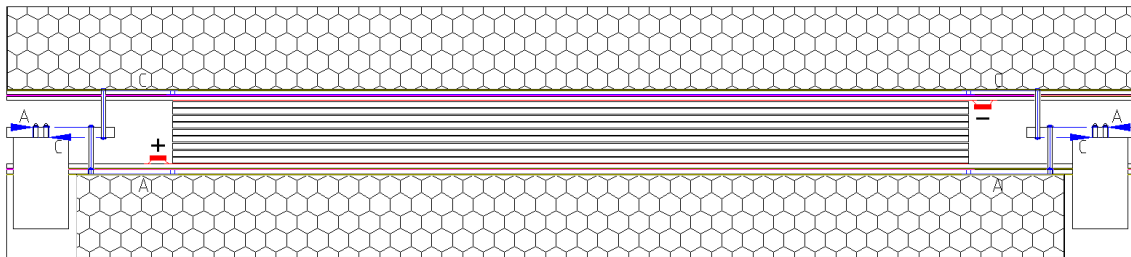


Figure 2: Secțiune transversală prin MSMGRPC cu structură "single-stack" (RPC2015SS).

Primul din cele două prototipuri are o arhitectură clasică de tip "single-stack" (RPC2015SS) în care un număr de nouă electrozi rezistivi sunt separați de opt spații de detecție, fiecare având o grosime de $140 \mu\text{m}$ (Fig. 2). Pasul stripurilor atât pentru electrozii de înaltă tensiune cât și pentru cei de citire a semnalelor este de 10.02 mm , având o lățime a stripurilor de 8.6 mm care corespunde impedanței liniei de transmisie de 100Ω (pentru un stack cu 8 spații de detecție).

Cel de-al doilea prototip are o structură de tip "double-stack" (RPC2015DS), structură simetrică în raport cu electrodul central de preluare a semnalelor (anodul) (Fig. 3). Acest prototip a fost proiectat pe baza unei metode complet noi dezvoltate în grupul nostru, care permite să fie îndeplinită atât cerința de granularitate cât și cea de adaptare de impedanță, pentru un număr fix de spații de separare. Metoda inovativă de ajustare a impedanței liniei

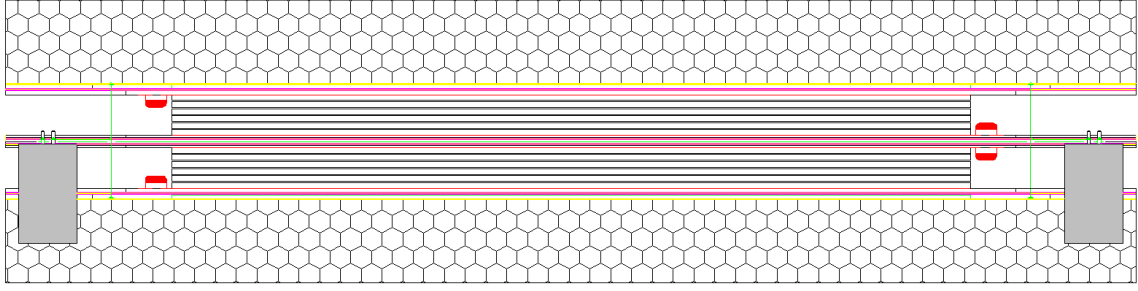


Figure 3: Secțiune transversală prin MSMRPC cu structură "double-stack" (RPC2015DS).

de transmisie a MSMRPC este descrisă în referința [10]. Prototipul a fost proiectat cu un pas al stripurilor de 7.2 mm atât pentru electrozii de citire a semnalelor cât și pentru electrozii de înaltă tensiune, dar cu lățimi diferite ale stripurilor celor doi electrozi: 1.3 mm lățimea stripului de citire a semnalului care face ca linia de transmisie să aibă impedanța de 100Ω (pentru un stack cu 5 spații de detecție) și 5.6 mm lățimea stripului de înaltă tensiune, care definește granularitatea detectorului.

Cele două prototipuri au aceeași arie activă definită de o lățime de 96 mm (de-a lungul stripurilor) și o lungime de 300 mm. Această lungime este acoperită de un număr de 28 de stripuri în cazul primului prototip (RPC2015SS) și de 40 de stripuri în cazul celui de al doilea (RPC2015DS).

Pentru ambii detectori citirea semnalelor se face în mod diferențial, ceea ce înseamnă că sunt conectate la intrarea amplificatorului diferențial atât semnalul anodic cât și cel catodic pentru a fi procesate împreună.

3 Aranjamentul experimental

Cei doi detectori au fost testați în fascicul de ioni grei la acceleratorul SPS de la CERN, Geneva. Scopul a fost de a testa prototipurile dezvoltate pentru zona internă a subsistemului CBM-TOF în condiții cât mai apropiate de operarea reală atât din punct de vedere al procesării semnalelor cât și din punct de vedere al condițiilor experimentale.

Schița detaliată a poziției detectorilor MSMRPC dezvoltați în DFH/IFIN-HH, în aranjamentul experimental al CBM-TOF la SPS-CERN, este prezentată în figura 4. Electronica front-end (FEE) cu care au fost operate prototipurile a fost noua versiune de ASIC amplificator/discriminator diferențial cu 8 canale per chip, denumit PADIX[12], dezvoltat în cadrul colaborării CBM-TOF. Semnalele logice LVDS furnizate de FEE, codifică în cele două fronturi ale fiecărui semnal logic LVDS, atât informația de timp cât și durata corespunzătoare lățimii semnalului logic (TOT = time over threshold), aceasta din urmă fiind proporțională cu mărimea semnalului analogic de intrare în amplificator.

Pentru prima dată în testele în fascicul efectuate de către colaborarea CBM-TOF a fost folosit un sistem de procesare și achiziție a semnalelor cu operare în mod continuu, fără selecție de evenimente, deci un sistem fără trigger hardware. Acest sistem a fost operat cu convertori TDC denumiți GET4 [13], o placă de bază pentru procesarea datelor (DPB- data processing board) denumită AFCK [14] implementată cu gDPB firmware. Amestecul de gaz folosit în aceste teste a fost $85\%C_2H_2F_4 + 5\%iso-C_4H_{10} + 10\%SF_6$ și a fost circulat la presiunea atmosferică, la un flow de 5l/h.

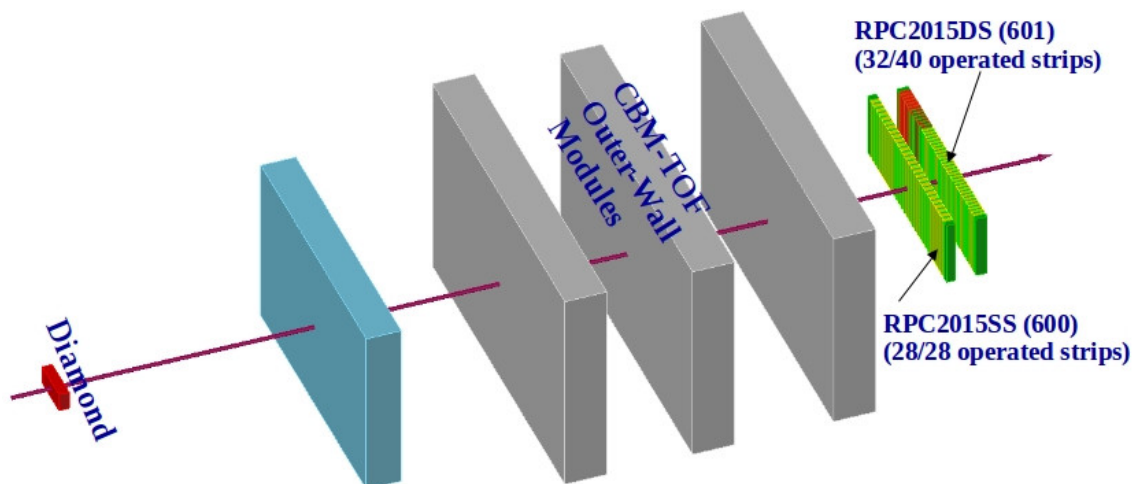


Figure 4: Schiță a poziției detectorilor MSMGRPC dezvoltati în DFH/IFIN-HH în aranjamentul experimental CBM-TOF.

4 Analiza datelor experimentale

Analiza datelor experimentale cuprinde mai multe etape realizate în mod iterativ [9] și care sunt prezentate în detaliu în raportul de etapa al proiectului NUCLEU PN19060103 din data de 30.07.2019. Mai jos sunt menționați pașii care sunt implicați în reconstrucția clusterilor de semnal:

- Generarea fișierului de calibrare a TDC-urilor și calibrarea datelor experimentale pentru neliniaritățile convertorilor TDC.
- Calibrarea off-set-urilor în timp și poziție și construirea clusterilor. Un cluster este definit ca fiind numărul de stripuri consecutive cu semnal la ambele capete, corelate într-o anumită fereastră de timp (i.e. 500 ps) și spațiu (2 cm) în cele două coordonate (x,y) care definesc planul electrodului de citire a semnalelor. Un eveniment cu un singur hit corespunde unui singur cluster reconstruit iar un eveniment multi-hit este definit de reconstrucția în detector a mai mult decât un cluster. Timpul mediu al clusterului este calculat ca fiind media timpilor ponderați cu raporturile dintre sarcina semnalelor stripurilor din cluster și sarcina totală a acestora, obținută folosind informația de TOT. Pentru evenimentele cu hituri multiple, s-au corelat combinatorial toate hiturile din cei doi detectori, selectând pentru distribuția de timp de zbor hiturile cu un chisquare (χ^2) minim. Valoarea chisquare (χ^2) între doi clusteri a fost calculat ca suma pătratelor a trei termeni reprezentați de diferențele în timp și respectiv poziție (x,y), fiecare termen fiind raportat la varianța respectivei distribuții. Acestea vor fi denumite în continuare cele mai bine corelate hituri între detectorul testat și cel de referință și vor fi folosite în analiză pentru determinarea distribuției de diferență de timp între cei doi detectori, respectiv spectrul de timp de zbor.

5 Rezultate experimentale

În analiza efectuată detectorul investigat (DUT) a fost considerat RPC2015SS, iar RPC2015DS detector de referință (REF). În timpul testelor în fasciculul detectorul RPC2015DS a fost operat cu o tensiune aplicată de ± 5.5 kV (157 kV/cm în spațiul de detecție), iar RPC2015SS cu ± 8.8 kV (157 kV/cm) și ± 8.9 kV (159 kV/cm).

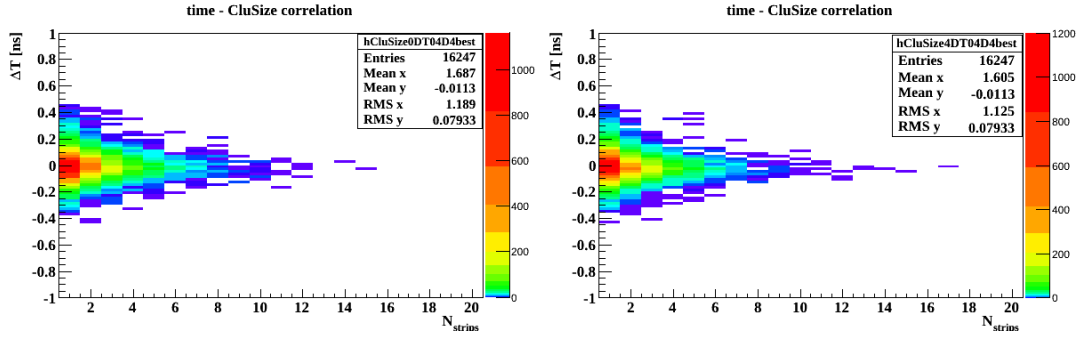


Figure 5: Corelația bidimensională dintre distribuția de diferență de timp între RPC2015SS RPC2015DS și numărul de stripuri cu semnal într-un hit în DUT (stânga) și REF (dreapta) pentru un câmp electric de 157 kV/cm și un prag de 300 mV parametrii de operare ai ambilor detectori.

Pragul electronicii front-end pentru RPC2015DS a fost menținut constant la 300 mV pentru toate măsurătorile, iar pentru RPC2015SS a fost variat de la 200 mV la 300 mV.

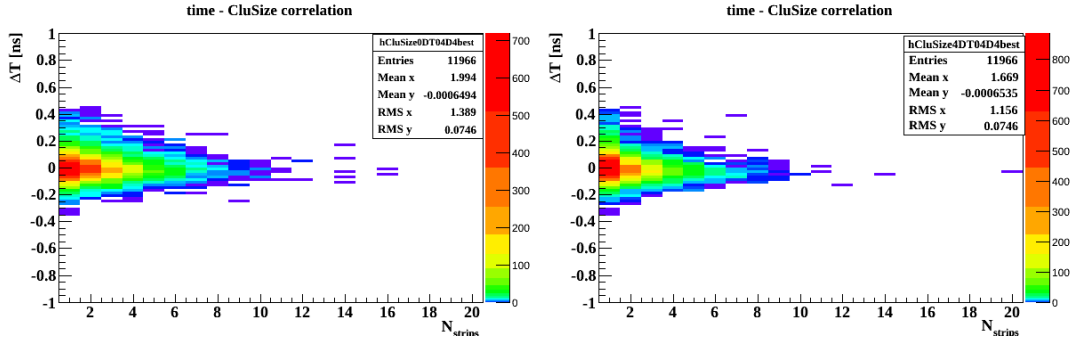


Figure 6: Corelația bidimensională dintre distribuția de diferență de timp între RPC2015SS RPC2015DS și numărul de stripuri cu semnal într-un hit în DUT (stânga) și REF (dreapta) pentru un câmp electric de 157 kV/cm și un prag de 200 mV pentru DUT și 157 kV/cm și un prag de 300 mV pentru REF.

Corelațiile bidimensionale dintre diferența de timp între cei doi detectori (după corecțiile de "walk" și de poziție) și dimensiunea clusterului de semnal pentru diferiți parametrii de operare sunt prezentate în figurile Fig. 5 și Fig. 6. Pentru un câmp electric în spațiul de detecție de 157 kV/cm și un prag de 300 mV, parametri de operare ai ambilor detectori, se obține o valoare medie de 1.6 stripuri pentru DUT și 1.5 stripuri pentru REF ca dimensiune a clusterului de stripuri cu semnal. Menținând aceași valoare de prag și crescând câmpul electric în spațiul de detecție la 159 kV/cm pentru DUT, valoarea medie a clusterului de stripuri cu semnal crește la 1.9 stripuri pentru DUT și 1.8 stripuri pentru REF. Pentru un prag mai mic al electronicii front-end de numai 200 mV și un câmp electric de 157 kV/cm pentru DUT, valoarea medie a clusterului de stripuri cu semnal este de 2.0 stripuri. Distribuția unidimensională din Fig. 8 - stânga arată că mai mult de 3/4 din hiturile măsurate au o dimensiune a clusterului de unu sau două stripuri, valorile mai mari putând fi datorate faptului că fără un sistem de tracking performant, care să contribuie de la decelarea hiturilor suprapuse, acestea nu pot fi deconvolute. Această valoare medie a clusterului de 2 stripuri, corespunde eficienței de 93.4%, eficiența maximă măsurată în acest in-beam test. Așa cum s-a menționat și în raportul de etapa al proiectului din data de 30.07.2019, motivul pentru care valoarea eficienței de detecție obținută în aceste teste în fascicul este ceva mai mică

decât cea obținută în testele în fascicul folosind un sistem de procesare cu trigger hardware [7, 9], când au fost obținute valori de peste 95%, este în investigație.

Așa cum se observă în corelația hiturilor dintre cei doi detectori prezentată în Fig. 8-dreapta, aceste rezultate sunt obținute în condiții de multihit, cu multiplicități medii ale hiturilor (numarul de hituri independente reconstruite pe suprafața activă a detectorului per event) de 4.5 pentru DUT și 4 pentru REF, dar care au valori maxime de până la 8 hituri incidente pe suprafața operată a detectorului într-un eveniment, ceea ce conduce la un grad de ocupare a detectorului ce depășește cu mult valorile maxime impuse de experimentul CBM.

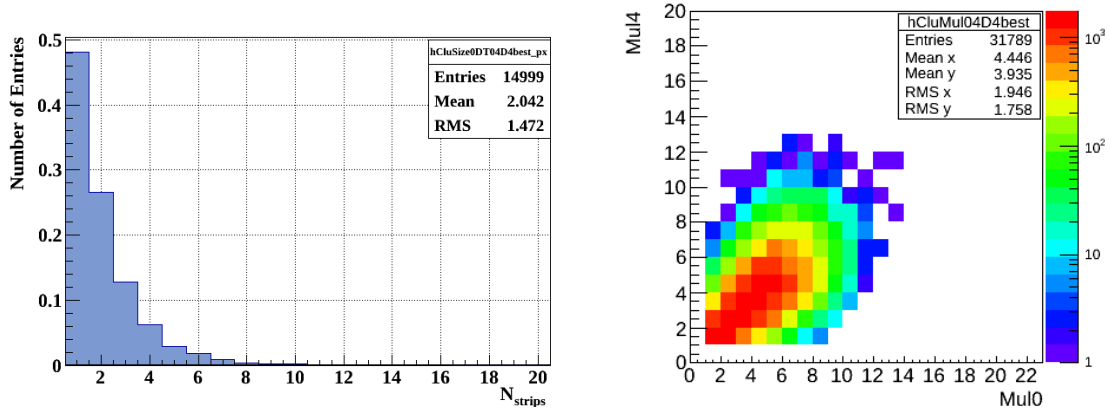


Figure 7: Distribuția unidimensională a numărului de stripuri cu semnal într-un hit (stânga). Corelația bidimensională dintre multiplicitățile hiturilor în cei doi detectori (dreapta).

Considerând că probabilitatea de ocupare a ariei active a detectorului trebuie păstrată mai mică de 5%, pentru densitatea maximă de hit-uri de $0.6 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-2}$ estimată la unghiurile polare mici de $\sim 2.5^{\circ}$ [4], dimensiunea celulei de citire a semnalului trebuie să fie de $\sim 8 \text{ cm}^2$.

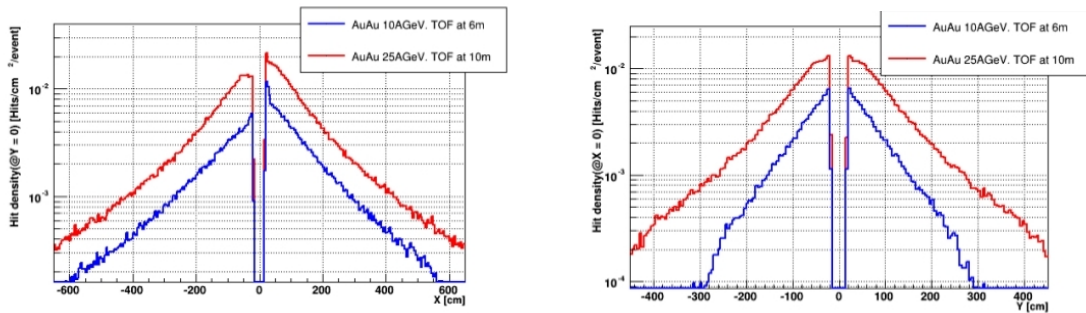


Figure 8: Densitatea de hituri a particulelor încărcate secundare și primare în ciocniri Au+Au la energia incidentă de 25A GeV cu CBM-TOF la distanța de 10 m de țintă (roșu) și pentru energia incidentă de 10A GeV la distanța de 6 m (albastru), stânga - în funcție de X, dreapta - în funcție de Y.

Pentru valoarea pitch-ului de 7.2 mm a detectorului RPC2015DS și dimensiunea medie de cluster între 1.7 - 2 stripuri, rezultă o lungime a stripului de $\sim 6 \text{ cm}$ pentru zona cu granularitatea cea mai ridicată. Un prototip având această granularitate urmează a fi proiectat, construit și testat în condiții reale de fascicul, specifice zonei CBM-TOF cu granularitatea cea mai mare.

6 Concluzii

- Rezultatele obținute demonstrează că MSMGRPC cu impedanța liniei de transmisie de 100Ω (care reduce la minim semnalele parazite produse de reflexii), satisface cerințele de granularitate ale zonei interne a subdetectorului de timp de zbor al experimentului CBM de la viitoarea facilitate FAIR.
- Activitatea raportată stă la baza comunicărilor la conferințe internaționale, enumerate mai jos:
 - M. Petriș et al., "Toward the construction of the inner zone for the CBM-TOF wall" XXIII International School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Applications, September 22 - 28, 2019 Varna, Bulgaria, invited talk.
<http://www.inrne.bas.bg/international-school-varna>
 - M. Petriș et al., "Status of the activities for the inner zone of the CBM-TOF wall" 34th CBM Collaboration Meeting, 29 September - 3 October 2019, Bose Institute, Kolkata, India

References

- [1] <https://fair-center.eu/for-users/experiments/cbm.html>
- [2] <https://www.gsi.de/en/researchaccelerators/fair/research.htm>
- [3] CBM Collaboration. Eur. Phys. J. A, 53 (2017), 60.
- [4] CBM-TOF Collaboration, CBM-TOF TDR, October 2014
<https://repository.gsi.de/record/109024>.
- [5] E. Cerron Zeballos et al., Nucl. Instrum. Meth. A, 374 (1996), 132
- [6] M. Petrovici et al., Nucl. Instrum. Meth. A, 487 (2002), 337.
- [7] M. Petrovici et al., JINST 7 (2012) P11003
- [8] M. Petriș et al., J. Phys. Conf. Ser. 724 (2016), 012037.
- [9] M. Petriș et al. , JINST 11 (2016) C09009.
- [10] D. Bartoș et al., Rom. J. Phys. 63 (2018), 901
- [11] <http://www.rfglobalnet.com/doc/aplac-800-student-version-0001>.
- [12] M. Ciobanu et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 61 (2014), 1015.
- [13] <https://wiki.gsi.de/pub/EE/GeT4/get4.pdf>
- [14] <https://www.ohwr.org/projects/afck/wiki>

Responsabil Proiect,

Prof. Dr. Mihai Petrovici