



UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI  
Facultatea de Fizică  
Școala Doctorală de Fizică



***Horea Florin BRÂNZAȘ***

---

**STUDIUL DETECȚIEI MONOPOLILOR MAGNETICI ȘI DYONILOR ÎN EXPERIMENTUL  
MoEDAL DE LA LHC**

---

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Coordonator,  
*Prof. univ. dr. Alexandru JIPA*

București  
2023



## Mulțumiri

Aș dori să-mi exprim recunoștința sinceră față de mai multe persoane care au avut un rol semnificativ în formarea și îndrumarea călătoriei mele academice de-a lungul studiilor de licență și până la finalizarea tezei mele de doctorat. În primul rând, îmi exprim aprecierea față de profesorul dr. Alexandru JIPA pentru îndrumarea și mentoratul său inestimabil. Expertiza sa și sprijinul constant au fost instrumente în dezvoltarea mea academică și personală. De asemenea, aș dori să recunosc contribuția doctorului Vlad POPA, liderul echipei Grupului MoEDAL din România și supervisorul meu în cadrul Colaborării MoEDAL și al Institutul de Științe Spațiale (ISS). Mentoratul și încurajarea sa au fost cruciale în formarea cercetării mele și în furnizarea unor oportunități valoroase. Mulțumiri speciale se îndreaptă către doctorul Daniel FELEA pentru îndrumarea și sprijinul său continuu pe parcursul progresului tezei mele. Expertiza și ideile sale au contribuit în mare măsură la succesul cercetării mele. Sunt recunoscător tuturor membrilor colaborării MoEDAL (*Monopole and Exotics Detector At the LHC*) pentru acordarea oportunității de a efectua analize de date și simulări în cadrul acestei comunități prestigioase de cercetare. În plus, îmi exprim aprecierea față de colegii mei de la Departamentul de Astroparticule și Cosmologie de la ISS (Laboratorul 1020) pentru colaborarea și sprijinul lor pe parcursul călătoriei mele academice. La final, dar nu în ultimul rând, aș dori să-mi exprim cea mai profundă recunoștință față de familia mea și prietenii mei pentru sprijinul lor neclintit, înțelegerea și încurajarea acordate în anii dificili care au condus la finalizarea acestei teze.



# Cuprins

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Introducere</b> .....                                                                              | 3  |
| <b>Principii fundamentale în fizica particulelor.</b> .....                                           | 5  |
| 1.1 Modelul Standard.....                                                                             | 5  |
| 1.2. Forțele fundamentale în Modelul Standard al Fizicii Particulelor.....                            | 5  |
| 1.3 Particule Exotice.....                                                                            | 5  |
| <b>Marele Accelerator de Hadroni (LHC).</b> .....                                                     | 7  |
| 2.1 Istoricul LHC si Procesul de Accelerare.....                                                      | 7  |
| 2.2 Detectorul MoEDAL.....                                                                            | 8  |
| <b>Monopoli Magnetici: Tipuri, Interacțiuni și Mecanisme de Producere</b> .....                       | 11 |
| 3.1 Soluția simetrică a ecuațiilor lui Maxwell.....                                                   | 11 |
| 3.2 Istoria Monopolilor Magnetici. Monopolul de tip Dirac.....                                        | 12 |
| 3.3 Tipuri de Monopoli Magnetici.....                                                                 | 13 |
| 3.4 Interacția Monopolilor Magnetici cu Materia.....                                                  | 14 |
| 3.5. Canalul de fuziune a fotonilor. Producția de monopoli magnetici în coliziunile ionilor grei..... | 16 |
| 3.6 Alte particule exotice studiate la MoEDAL.....                                                    | 18 |
| <b>Simularea Monopolilor Magnetici</b> .....                                                          | 19 |
| <b>Rezultate</b> .....                                                                                | 21 |
| 5.1 Secțiuni eficace de Producție de Monopoli Magnetici in MadGraph5.....                             | 21 |
| 5.4 Simularea Monopolilor Magnetici Cu Spin 0 În Geometria MoEDAL.....                                | 24 |
| <b>Simularea Conducției De Interacție CMS</b> .....                                                   | 29 |
| 6.1 Simularea Geometriei Conducției de Fascicul CMS în Geant4.....                                    | 29 |
| 6.2 Eficiența Geometriei Conducției de fascicul CMS. Rata Așteptată.....                              | 30 |
| 6.3 Simulări „TOY Monte Carlo”. Nivel de Încredere Pentru Excluderea Monopolilor Magnetici.....       | 31 |
| 6.4 Concluzii.....                                                                                    | 33 |
| <b>Prototipul de Scanare Termică</b> .....                                                            | 35 |
| <b>Concluzii Generale</b> .....                                                                       | 37 |
| <b>Bibliografie</b> .....                                                                             | 39 |
| <b>Contribuții</b> .....                                                                              | 43 |



## Introducere

Această lucrare se concentrează asupra studiului particulelor cunoscute sub denumirea de "monopolii magnetici," particule ipotetice în fizica particulelor. Monopolii magnetici sunt teoretizați ca fiind particule care posedă un singur pol magnetic, în opoziție cu magnetii obișnuiți, care au atât un pol nord, cât și unul sud. Această caracteristică le conferă un nivel ridicat de interes în domeniul fizicii și au fost teoretizați pentru prima dată în 1931 de celebrul fizician Paul Dirac. Studiul se concentrează pe analiza modului în care aceste particule teoretice interacționează cu două geometrii specifice implementate în software-ul Geant4. Aceste geometrii au fost dezvoltate pentru a reproduce mediul experimental la punctul de interacție numărul 8 (IP8) și în conducta de interacție a detectorului CMS. Aceste puncte de interacție reprezintă locații esențiale în fizica particulelor, unde au loc coliziuni între particule subatomice cu energii foarte mari. Aceste cercetări sunt efectuate în cadrul colaborării MoEDAL (*Monopole and Exotics Detector At the LHC*). Scopul final al acestui studiu este de a înțelege mai bine modalitățile în care aceste particule teoretice ar putea fi detectate. Această investigație își propune să aducă date și rezultate care pot contribui la dezvoltarea ulterioară a experimentelor și la înțelegerea mai profundă a fenomenelor care au loc la nivel subatomic. Această cercetare implică o complexitate semnificativă și necesită o analiză amănunțită a datelor obținute din simulări, precum și a interacțiunilor acestor particule teoretice în contextul specific al geometriilor sistemelor de detectare studiate.



# **I. Principii Fundamentale în Fizica Particulelor**

## **1.1 Modelul Standard**

Modelul Standard este o teorie în fizica particulelor care explică comportamentul particulelor subatomice și interacțiunile lor. Acesta implică particule fundamentale numite fermioni și bosoni de forță. Fermionii constituie materia, cum ar fi quark-urile și leptonii, în timp ce bosonii transmit forțele fundamentale, precum bosonii W și Z [1] pentru interacțiunile slabe și gluonii pentru interacțiunile tari. Modelul Standard unifică forțele electrice și slabe sub numele de "interacțiuni electroweak" și descrie, de asemenea, interacțiunea tare responsabilă pentru menținerea quark-urilor împreună în nucleu. . Cu toate acestea, Modelul Standard are limitele sale, inclusiv incapacitatea de a explica gravitația și de a fi unificat cu teoria relativității generale a lui Einstein. Cercetătorii continuă să lucreze la dezvoltarea unor teorii care să completeze Modelul Standard și să ofere o înțelegere mai cuprinzătoare a Universului [2].

## **1.2 Forțele fundamentale în Modelul Standard al Fizicii Particulelor.**

În Modelul Standard al Fizicii Particulelor, există patru forțe fundamentale care guvernează comportamentul și interacțiunile particulelor subatomice. Prima dintre aceste forțe este forța gravitațională, care acționează între obiecte cu masă și este descrisă de teoria relativității generale a lui Einstein [3]. Cu toate acestea, gravitația nu a fost încă integrată cu celelalte forțe din Modelul Standard. Forța electromagnetică este a doua forță și este responsabilă pentru interacțiunile particulelor cu sarcină electrică. Această forță este guvernată de ecuațiile lui Maxwell și este transmisă prin intermediul fotonilor. A treia forță este forța slabă, care este responsabilă pentru dezintegrarea unor particule subatomice. În Modelul Standard, această forță este descrisă ca interacțiuni electro-slabe și este mediată de bosonii W și Z [1]. Forța tare, a patra forță fundamentală, menține quark-urile împreună în nucleu și este descrisă de teoria cromodinamicii cuantice (QCD) [4]. Gluonii sunt bosonii de forță responsabili pentru transmiterea acestei interacțiuni. Aceste patru forțe fundamentale reprezintă cadrul fundamental pentru înțelegerea lumii subatomice și pentru descrierea interacțiunilor particulelor în Univers.

## **1.3 Particule Exotice**

Particulele exotice se referă la particule subatomice ipotetice sau rareori întâlnite care nu se încadrează în modelul standard al fizicii particulelor. Aceste particule exotice sunt de interes pentru cercetători și fizicieni, deoarece ar putea oferi indicii noi sau schimba înțelegerea noastră asupra structurii fundamentale a materiei și a forțelor care

le guvernează. Monopolii Magnetici, reprezintă o astfel de particule exotice care au numai un singur pol magnetic, spre deosebire de magneții obișnuiți care au un pol nord și un pol sud. În modelul standard, magnetismul este descris prin intermediul câmpurilor magnetice care au întotdeauna atât pol nord, cât și pol sud, și acestea nu pot fi separat observate ca particule independente. Dacă aceste particule ar fi descoperite, existența monopolilor magnetici ar schimba fundamentul fizicii particulelor și ar ridica întrebări semnificative cu privire la legile actuale ale electromagnetismului. Cu toate acestea, până în prezent, nu au fost găsite dovezi concrete ale existenței monopolilor magnetici, iar această idee rămâne una dintre cele mai interesante și ipotetice particule exotice din fizica particulelor elementare [5].

## II. Marele Accelerator de Hadroni (LHC)

### 2.1 Istoricul LHC si Procesul de Accelerare

LHC (Large Hadron Collider) reprezintă cel mai mare accelerator de particule din lume și este situat la CERN (Organizația Europeană pentru Cercetare Nucleară) în Elveția și Franța. Ideea construirii unui accelerator de particule de mari dimensiuni a apărut în anii '80 ca o inițiativă pentru a investiga particulele subatomice și a testa teoria Modelului Standard a fizicii particulelor. Construcția LHC a început la începutul anilor 2000 și a implicat colaborarea unui număr mare de cercetători și ingineri din întreaga lume. Tunelul circular în care LHC se află are o circumferință de aproximativ 27 de kilometri. LHC a fost pus în funcțiune pentru prima dată în 2008, deși la scări de energie relativ reduse. Procesul de accelerare implică utilizarea electromagneților puternici pentru a accelera protonii la viteze apropiate de cea a luminii [6].

Acceleratorul este echipat cu mai multe sisteme de detecție, cele mai importante fiind **ATLAS**, **CMS**, **ALICE** și **LHCb** acestea fiind utilizate pentru a observa interacțiunile particulelor rezultate din coliziuni. Scopul principal al LHC este să producă coliziuni de protoni la energii extrem de mari, ceea ce permite cercetătorilor să studieze proprietățile particulelor subatomice și să testeze teoria Modelului Standard la energii extreme. Prin urmare, LHC a avut un impact semnificativ asupra fizicii particulelor, contribuind la descoperirea și studiul mai multor particule noi și la o înțelegere mai profundă a lumii subatomice. Aceasta a inclus confirmarea existenței particulei Higgs, care a reprezentat o realizare remarcabilă pentru fizica modernă [6].

Procesul de accelerare a protonilor la LHC se desfășoară în mai multe etape :

1. Protonii sunt obținuți prin ionizarea atomilor de hidrogen folosind un câmp electric.
2. Sistemul de accelerare liniar Linac 2 accelerează protonii până la o energie de 50 MeV.
3. Protonii sunt injectați în Proton Synchrotron Booster (PSB), care îi accelerează ulterior la 1.4 GeV.
4. Proton Synchrotron (PS) îi accelerează la 25 GeV.
5. Super Proton Synchrotron (SPS) îi accelerează la 450 GeV, după care sunt injectați în LHC.
6. LHC accelerează protonii până la o energie maximă de 6.5 TeV pe fiecare fascicul.

Mișcarea circulară a protonilor în inelul de accelerare este menținută prin intermediul unor magneți dipolari care acționează în planul orizontal. Focalizarea fasciculelor este asigurată prin intermediul unui set alternant de magneți cuadropolari

pentru focalizare și pentru defocalizare [7]. Protonii sunt accelerați folosind cavități rezonante de radiofrecvență cu o frecvență de 400 MHz și un câmp maxim de 5 MV/m (unde V reprezintă tensiunea de 2 MV), cu creșterea sincronizată a câmpului magnetic dipolar, într-un proces numit "magnet ramping" [7].

## 2.2 Detectorul MoEDAL

Sistemul de detecție MoEDAL (Monopole and Exotics Detector at the LHC) se află la Punctul de Interacțiune 8 (IP8 în vecinătatea sistemului de detecție LHCb) al "Large Hadron Collider (LHC)" de la CERN. Scopul său principal este de a căuta particule cu ionizare foarte mare [8], inclusiv monopoli magnetici și alte particule exotice care depășesc previziunile Modelului Standard al fizicii particulelor. Detectorul MoEDAL constă din mai multe componente cheie, fiecare având un rol specific în căutarea particulelor exotice. Capcana pentru Monopoli Magnetici (**Magnetic Monopole Trapper - MMT**) este construită utilizând straturi de aluminiu și servește la capturarea și detectarea monopolilor magnetici. Aluminiul este folosit deoarece furnizează un mediu adecvat pentru detectarea particulelor cu ionizare foarte mare (material paramagnetic) [93]. Detectorul de urme "**Nuclear Track (NTD)**" [94], combinat cu "**High Charge Catcher (HCC)**" [9], este o altă componentă importantă. NTD utilizează materiale polimerice specializate sensibile la trecerea particulelor cu ionizare foarte mare. Acesta înregistrează urmele lăsate de aceste particule, permițându-le identificarea și analizarea lor. HCC, de asemenea, fabricat din material polimeric, îmbunătățește detectarea particulelor cu sarcină electrică mare, furnizând informații suplimentare alături de NTD. În plus, detectorul MoEDAL integrează detectorul **TimePix**, care este un detector cu pixeli din siliciu. Detectorul TimePix [10] oferă măsurători precise ale poziției și energiei particulelor încărcate care trec prin el, ajutând la identificarea și caracterizarea acestor particule.

Aparatul pentru Particule Penetrante MoEDAL (**MAPP**) [11,12,13] este o componentă separată aprobată în 2021. Detectorul MAPP avansat este un detector de ultimă generație bazat pe scintilatori, conceput în mod specific pentru căutarea Particulelor cu Interacțiune Slabă (FIPs), inclusiv particulele cu sarcina sub-unitara (mCPs) [14], care au o sarcină la fel de mică ca o fracțiune a sarcinii electronului. În plus, MAPP are sensibilitate atât la particulele cu sarcină electrică, cât și la particulele cu viață lungă cu sarcină sau neutre (LLPs). Acesta reprezintă o extindere a programului MoEDAL pentru Run-3 [15]. Detectoarele MAPP sunt poziționate strategic în tunelul UA83, la aproximativ 110 metri sub pământ și la 15 de metri distanță de IP8, sub un unghi de 7 grade în raport cu direcția fasciculului.

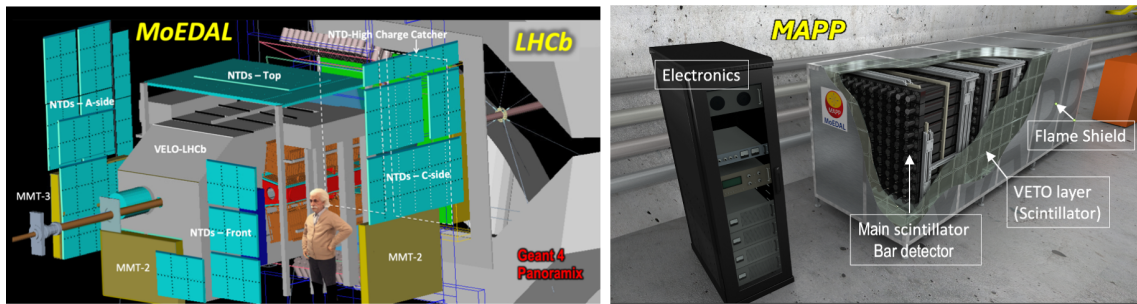


Fig. 2.6. Reprezentare sistemului de detecție MoEDAL & MAPP, care evidențiază configurația și componentele implicate. (Această imagine este proprietatea experimentului MoEDAL & CERN) [Imagine preluată de pe <https://moedal.web.cern.ch/>] © CERN [16]



### III. Monopoli Magnetici: Tipuri, Interacții și Mecanisme de Producere

#### 3.1 Soluția simetrică a ecuațiilor lui Maxwell

Ecuțiile lui Maxwell ale electromagnetismului leagă câmpurile electrice și magnetice între ele și de distribuția sarcinii electrice și a curentului electric. Ecuțiile standard prevăd existența sarcinii electrice, dar presupun că nu există sarcină magnetică și curent magnetic. Cu excepția acestei restricții, ecuațiile sunt simetrice în ceea ce privește schimbul între câmpurile electrice și magnetice. Ecuțiile lui Maxwell sunt simetrice atunci când densitatea de sarcină electrică și curentul electric sunt zero în toate punctele, cum ar fi în vid. Ecuțiile lui Maxwell pot fi, de asemenea, scrise într-o formă complet simetrică dacă se permite existența "sarcinii magnetice", analoge sarcinii electrice. Cu includerea unei variabile pentru densitatea sarcinii magnetice, să zicem  $\rho_m$ , există, de asemenea, o variabilă pentru "densitatea curentului magnetic" în ecuații,  $j_m$ . Dacă sarcina magnetică nu există - sau dacă există, dar este absentă într-o regiune a spațiului - atunci noile termeni din ecuațiile lui Maxwell sunt toți zero, și ecuațiile extinse se reduc la ecuațiile convenționale ale electromagnetismului, cum ar fi  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  (unde  $\nabla \cdot$  este operatorul de divergență și  $\mathbf{B}$  reprezintă densitatea fluxului magnetic) [17, 18, 19].

| Laws                      | Without Monopoles                                                                | With Monopoles                                                                    |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Gauss's law               | $\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho_e$                                           | $\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho_e$                                                |
| Gauss's law for magnetism | $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$                                                    | $\nabla \cdot \mathbf{B} = \rho_m$                                                |
| Faraday's law             | $-\nabla \times \mathbf{E} = \partial \mathbf{B} / \partial t$                   | $-\nabla \times \mathbf{E} = \partial \mathbf{B} / \partial t$<br>$-\mathbf{j}_m$ |
| Ampere's law              | $\nabla \times \mathbf{B} = \partial \mathbf{E} / \partial t$<br>$+\mathbf{j}_e$ | $\nabla \times \mathbf{B} = \partial \mathbf{E} / \partial t$<br>$+\mathbf{j}_e$  |

**Fig 3.1** Simetria ecuațiilor lui Maxwell prin introducerea densității de sarcină magnetică și a densității de curent magnetic [19].

## 3.2 Istoria Monopolilor Magnetici. Monopolul de tip Dirac

Primul savant care a prezentat ideea unei particule cu sarcină magnetică a fost Paul Dirac în 1931. În teoria sa, el a propus că dacă există un singur monopol magnetic, atunci toate sarcinile electrice trebuie să fie cuantificate. Cu toate acestea, cuantificarea sarcinii electrice se observă în natură și, la acea vreme, nu exista o altă explicație pentru acest tip de fenomene. Polyakov și 't Hooft (1974) au venit cu ideea că existența unei particule cu sarcină magnetică ar reprezenta cheia pentru unificarea tuturor interacțiunilor fundamentale. Polyakov și 't Hooft au arătat că monopolii magnetici reprezintă o soluție pentru teoriile gauge non-abeliene și că orice teorie "grand unificată" a Fizicii Particulelor va conține monopoli magnetici. Această descoperire are consecințe teoretice foarte surprinzătoare și este încă cercetată până în ziua de azi. Mulți oameni de știință în fizica particulelor cred că interacțiunile puternice și interacțiunea gauge electro-slabă au constante de cuplare gauge diferite, dar la scurtă distanță, toate acestea se vor uni într-o singură interacțiune gauge cu o singură constantă de cuplare [19].

Monopolul magnetic tipic este considerat ca fiind "Monopolul lui Dirac". Paul Dirac a teoretizat că monopoul magnetic poate fi introdus în mecanica cuantică. Soluția acestei teorii constă în cuantificarea sarcinii magnetice și electrice. Dacă luăm în considerare un sistem format dintr-un singur electron staționar și un monopol magnetic, câmpul electromagnetic este descris de vectorul Poynting, și acest sistem va avea un moment cinetic total. Acesta este proporțional cu curentul electric și magnetic. Cu toate acestea, mecanica cuantică indică faptul că momentul cinetic total este cuantificat în unități ale constantei lui Planck ( $\hbar$ ), astfel că sistemul format dintr-un monopol electric staționar și un monopol magnetic staționar va fi, de asemenea, cuantificat. Cu alte cuvinte, dacă există doar un singur monopol magnetic în univers, toate sarcinile electrice ar fi cuantificate. În lucrarea sa din 1931, Paul Dirac a sugerat pentru prima dată că toate sarcinile electrice ar putea fi cuantificate în unități de bază ale sarcinii electrice [19]:

$$e = \frac{\hbar c}{2g} \quad (3.1)$$

unde  $e$  este sarcina electrică și  $g$  sarcina magnetică. După aceea, Paul Dirac a explicat cuantificarea sarcinii electrice prin:

$$g_D = \frac{\hbar c}{2e} = \frac{e}{2\alpha} = 68.5 e \quad (3.2)$$

unde  $e$  reprezintă sarcina electrică, iar  $\alpha$  este constanta structurii fine. Acest lucru arată că sarcina magnetică de bază este mult mai mare decât sarcina electrică.

### 3.3 Tipuri de Monopoli Magnetici

Există mai multe tipuri de monopoli magnetici teoretizați în diferite teorii fizice. Cele mai notabile dintre aceste teorii includ:

1. Monopoli Dirac: Teoria lui Paul Dirac din 1931 a introdus ideea monopoliilor magnetice. Această teorie presupune existența unui tip specific de monopoli magnetici cunoscuți ca "Monopoli Dirac." Acești monopoli sunt singulare, ceea ce înseamnă că acestea au o sarcină magnetică elementară, care este mult mai mare decât sarcina electrică elementară. Conform teoriei lui Dirac, dacă un astfel de monopoli magnetic ar exista, ar implica cuantificarea sarcinii electrice [19].

2. Monopoli 'tHooft-Polyakov: În anii 1970, Gerard 't Hooft și Alexander Polyakov au dezvoltat teoria monopoliilor magnetice ca soluții ale teoriilor non-abeliene de câmp. Acești monopoli pot avea diverse valori ale sarcinilor magnetice și nu necesită cuantificarea sarcinii electrice. Acești monopoli magnetici sunt relevanți în teoriile de unificare ale interacțiunilor fundamentale (Grand Unified Theory – GUT) [19].

3. Monopoli de înaltă energie: Teoriile din domeniul fizicii de înaltă energie, cum ar fi teoria stringurilor și GUT, au propus existența monopoliilor magnetice cu energii foarte mari. Acești monopoli ar apărea la energii mult mai mari decât cele observate în experimente convenționale și ar avea un impact asupra evoluției timpurii a universului. [19]

4. Monopoli magnetici compoziți: În unele teorii, monopoliile magnetice pot fi compuse din alte particule subatomice sau pot exista sub diferite forme și configurații. [19]

5. Monopoli de tip Schwinger: În domeniul electrodinamicii cuantice (QED), există un fenomen cunoscut sub numele de mecanismul Schwinger [20], sau mecanismul de producere a perechii Schwinger. Acest efect descrie crearea spontană a perechilor electron-pozitron în prezența unui câmp electric intens. Acest proces determină descompunerea câmpului electric și poate fi văzut ca un tip de instabilitate a vidului. Deși Fritz Sauter, Werner Heisenberg și Hans Heinrich Euler au propus pentru prima dată această idee în anii 1930, Julian Schwinger a furnizat un cadru teoretic complet în 1951. Cu toate că particulele par a fi create din nimic, legile conservării ale fizicii sunt respectate, deoarece electronii și pozitronii au sarcini opuse, dar egale, și proprietăți identice. Dualitatea electromagnetică prezice că monopoliile magnetice pot fi creați în câmpuri magnetice puternice, similar cu modul în care materia este creată în câmpuri electrice puternice prin efectul Schwinger [20].

6. Dyoni: Monopoli magnetici cu sarcina electrică și magnetică. Aceste particule au fost prezise tot de către Paul Dirac prin condiția de cuantificare a sarcinii electrice și magnetice:

$$qg\epsilon 2\pi Z \quad (3.3)$$

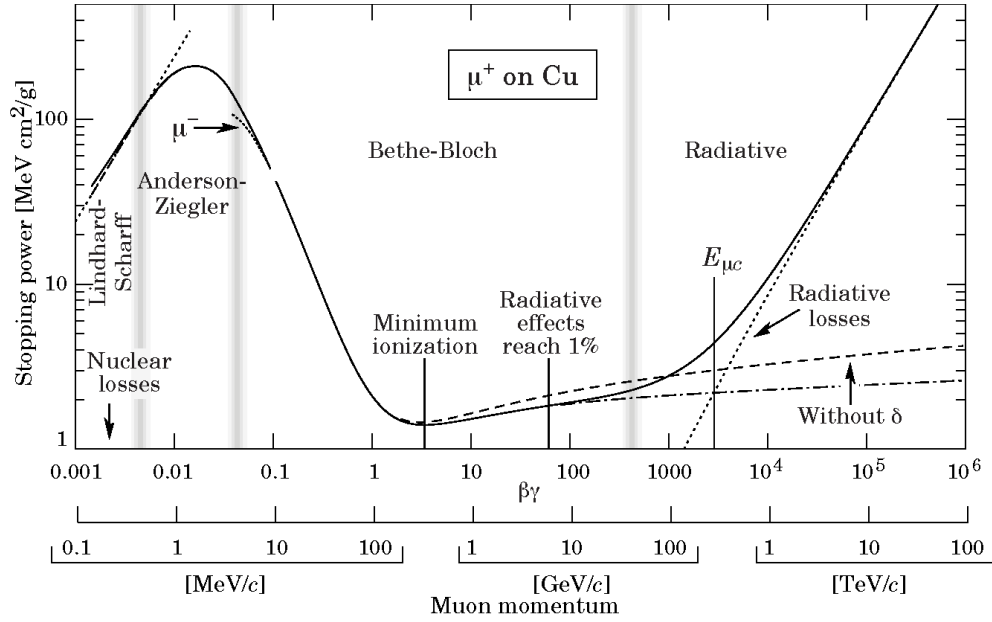
### 3.4 Interacția Monopolilor Magnetici cu Materia

În experimentul MoEDAL, una dintre metodele principale pentru detectarea particulelor cu sarcină mare este calculul pierderii continue de energie prin ionizare, reprezentată ca  $dE/dx$  [21]. Atunci când particulele încărcate electric și magnetic se propagă prin materie, ele își pierd în principal energie prin emiterea de radiații ionizante. Aceasta poate avea loc prin coliziuni cu electronii atomici sau prin interacțiuni între particulele încărcate și nucleele atomice din material. Primul mecanism implică eliberarea electronilor din atomii materialului, un proces cunoscut sub numele de ionizare. Cel de-al doilea mecanism duce la deplasarea atomilor în structura materialului. Pierderea de energie asociată acestui al doilea proces se numește Pierdere de Energie Non-Ionizantă (NIEL) [21]. Pentru particulele cu valori foarte mici ale lui  $\beta$  (viteza ca fracțiune a vitezei luminii), pierderea de energie datorată radiației de ionizare ( $dE/dx$ ) depășește în mod obișnuit Pierderea de Energie Non-Ionizantă. Formula Bethe-Bloch oferă un mod de a calcula rata medie de pierdere de energie pentru particulele încărcate moderat relativiste (cu excepția electronilor) în acest context:

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I_e^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (3.4)$$

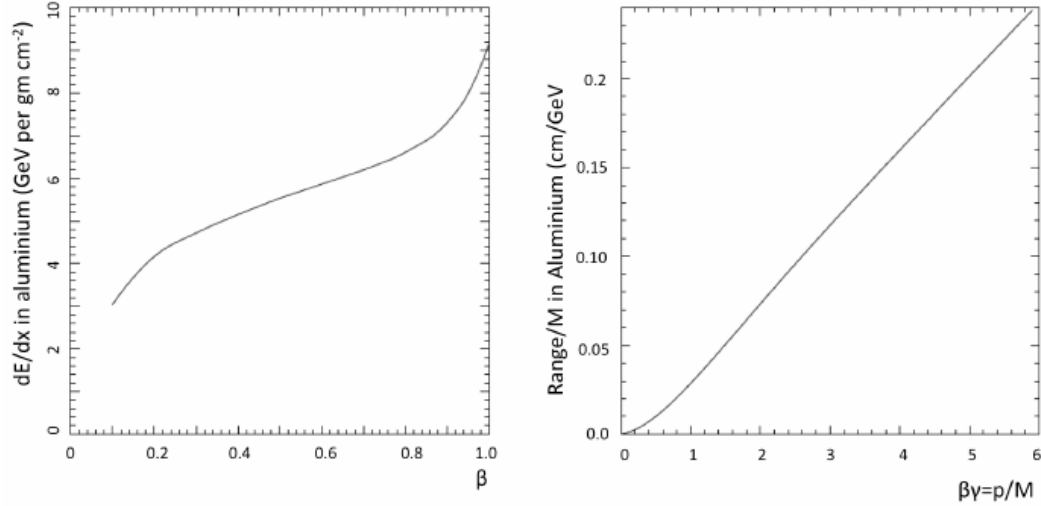
unde  $z$  este sarcina particulei incidente;  $Z(A)$  reprezintă numărul atomic al mediului;  $r_e$  raza electronului;  $m_e$  masa electronului;  $N_A$  numărul lui Avogadro;  $\beta$  viteza particulei incidente ca fracția a vitezei luminii iar  $I_e$  reprezintă potențialul mediu de ionizare a mediului.

Pe măsură ce energia particulei crește, câmpul electric se extinde și se aplatizează, ceea ce duce la o creștere a influenței coliziunilor îndepărtate [21]. Cu toate acestea, în medii reale, polarizarea materialului reduce extinderea câmpului, limitând creșterea relativistă la energii mari. În cazul particulelor masive, corecția pentru efectul densității devine deosebit de importantă atunci când energia particulei se apropie sau depășește energia sa de masă în repaus. Ecuația Bethe-Bloch (3.4) este formulată pe baza aproximării Born de prim ordin, dar corecții de ordin superior sunt necesare la energii mai mici [105]. Aceste corecții sunt în mod obișnuit incluse în Ecuația (3.4) folosind "corecția Bloch," indicată ca  $z^2 L_2(\beta)$  [21]. Includerea termenului de corecție Bloch duce la o pierdere de energie ușor mai mare pentru particulele pozitive în comparație cu cele negative. Această distincție este ilustrată de liniile punctate etichetate așa cum este indicat mai jos;



**Fig. 3.2** prezintă puterea de oprire ( $dE/dx$ ) a cuprului pentru muoni cu sarcină pozitivă, așa cum a fost obținută din cartea Grupului de Date despre Particule (PDG), reprezentată ca funcție de impulsul muonului. Linia solidă reprezintă puterea absolută de oprire. La energii mai mari, efectele radiative sunt puțin mai semnificative pentru particulele mai grele în comparație cu muonii. În cartea PDG, barele verticale indică diferite regiuni, iar diferența minoră între sarcinile pozitive și negative la valori mici ale vitezei este reprezentată de linii punctate scurte etichetate  $\mu^-$  [22].

Figura 3.3 ilustrează puterea de oprire a unui monopol magnetic în aluminiu ca funcție de viteza sa. Formalismul descris anterior permite calculări precise ale forței de oprire pentru monopoli magnetici cu valori specifice și Intervalul estimat al unui monopol magnetic tip Dirac este ilustrat în panoul din dreapta al Fig. 3.3, arătând cum variază în funcție de  $\beta$ , unde  $\beta$  și  $\gamma$  reprezintă impulsul și masa monopolului magnetic, respectiv. Pentru a simula traiectoriile monopolilor magnetici în detector, măsurarea pierderii lor de energie este încorporată într-un program GEANT4. Acest program este conceput pentru a simula comportamentul particulelor în interiorul detectorului. Prin analiza ecuațiilor Bethe-Bloch atât pentru particulele cu sarcină magnetică, cât și pentru cele cu sarcină electrică, în special pentru un monopol care poartă o singură sarcină Dirac și se deplasează cu o viteză  $\beta$ , se determină că raportul puterilor lor de oprire este egal cu 1. Această observație este în concordanță cu datele prezentate în Figura 3.3, unde ionizarea scade pe măsură ce monopolul magnetic încetinește, în contrast cu particulele cu sarcină electrică [21].



**Fig 3.2.** Stânga: Dependența  $dE/dx$  pentru un monopol magnetic ca funcție de viteză și densitatea electronică în aluminiu. Dreapta: Raportul dintre masa unui monopol magnetic în aluminiu și  $\beta\gamma$  calculat din  $dE/dx$  [22].

La viteze sub un anumit prag  $\beta \leq 10^{-4}$  [21], monopolii magnetici nu au suficientă energie pentru a excita atomii. Cu toate acestea, ei pot totuși să piardă energie prin coliziuni elastice cu atomi sau nuclee. În cazul dispersiei elastice dintre un monopol și un atom, interacțiunea dominantă provine din cuplarea dintre momentele magnetice ale electronilor atomici și câmpul magnetic al monopolului. Pentru a calcula pierderea de energie în această situație, se poate lua în considerare relația elastică dintre un monopol și un atom, concentrându-se doar asupra momentului magnetic. Prin luarea în considerare a acestei interacțiuni magnetice, pierderea de energie poate fi determinată [21]:

$$\frac{dE}{dx} \approx N_a E_{e.m.} \sigma \approx \frac{N_a \hbar^2}{m_e} \quad (3.5)$$

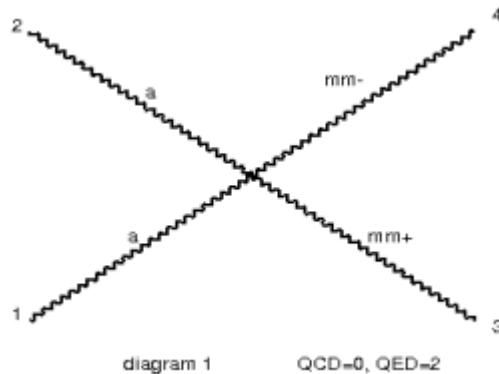
unde numărul de particule  $atoms/cm^2$  este reprezentat de  $N_a$ ,  $E_{e.m.}$  este energia în cadrul sistemului de referință al centrului de masă, iar  $\sigma$  este secțiunea eficace. Explicații mai detaliate pot fi găsite în [22].

### 3.5. Canalul de fuziune a fotonilor. Producția de monopoli magnetici în coliziunile ionilor grei.

Unul dintre canalele de producere de monopoli magnetici studiat în cadrul colaborării MoEDAL este cunoscut și sub numele de fuziune foton-foton sau fuziune gamma-gamma [23]. Acesta este un proces în care doi fotoni de înaltă energie

interacționează și produc particule. Acest canal este de mare interes în fizica particulelor, deoarece oferă o modalitate unică de a crea particule și de a studia proprietățile acestora. În canalul de fuziune a fotonilor, cei doi fotoni implicați în interacțiune poartă o energie semnificativă. Acești fotoni de înaltă energie pot fi generați prin diverse mijloace, cum ar fi coliziunea protonilor în acceleratoare de particule precum Marele Accelerator de Hadroni (LHC) sau în interacțiunea razelor cosmice de înaltă energie cu particulele din atmosfera Pământului [24]. Atunci când acești fotoni energetici interacționează, pot da naștere la crearea de noi particule prin interacțiunea lor. Energiile fotonilor se transformă în masă, urmând celebra ecuație  $E=mc^2$ , unde  $E$  reprezintă energia,  $m$  reprezintă masa, iar  $c$  reprezintă viteza luminii. Energia combinată a fotonilor trebuie să fie suficientă pentru a crea particule cu o anumită masă. Canalul de fuziune a fotonilor este deosebit de interesant deoarece permite producerea de particule care nu pot fi accesate direct prin alte procese de coliziune. Oferă o oportunitate unică de a studia proprietățile acestor particule, precum și interacțiunile lor cu alte particule. De asemenea, crearea de particule prin intermediul canalului de fuziune a fotonilor depinde de energia și polarizarea fotonilor care intră în interacție[25].

În cadrul experimentului MoEDAL, canalul de fuziune a fotonilor este studiat pentru a investiga producția de monopoli magnetici (Figura 3.3). Acest experiment se concentrează asupra utilizării acestui canal pentru a crea și detecta monopoli magnetici în cadrul studiului particulelor exotice.



**Fig 3.3** Diagramă Feynman care ilustrează producția de monopoli magnetici prin intermediul canalului de fuziune a fotonilor (rezultate obținute în MadGraph5)

Coliziunile ionilor grei oferă un mediu unic pentru investigarea diferitelor interacțiuni, inclusiv producția de monopoli magnetici. Interacțiunea dintre ionii care colizionează este caracterizată de parametrul de impact. Coliziunile centrale, în care parametrul de impact este mai mic sau egal cu de două ori raza nucleară, sunt dominate de forța nucleară tare și pot produce o plasma de tip quark-gluon cu temperaturi extrem de ridicate. Pe de altă parte, atunci când parametrul de impact este mult mai mare decât

dubla rază nucleară, nucleonii nu mai interacționează puternic. Cu toate acestea, chiar și în aceste coliziuni cu parametri de impact mari, pot avea loc procese electromagnetice între ioni. Aceste coliziuni ultraperiferice (UPC) implica interacțiuni de fuziune a fotonilor în timp ce ionii rămân neatinși [26]. Pentru a obține informații despre producerea de monopoli magnetici în ciocniri ultra-periferice de ioni grei trebuie utilizată metoda **Weizsacker-Williams** [27, 28] pentru a calcula fluxul de fotoni echivalent produs de către campurile magnetice ale ionilor:

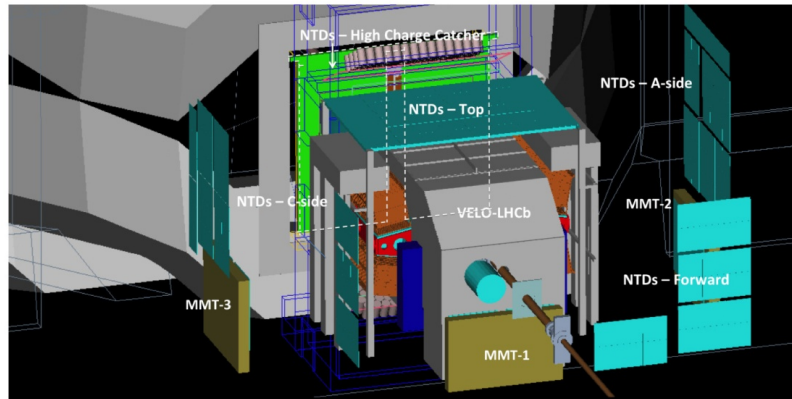
$$f_Y(x) = \frac{Z^2 \alpha}{\pi} \frac{1}{x} \left[ 2x_i K_0(x_i) K_1(x_i) - x_i^2 (K_1^2(x_i) - K_0^2(x_i)) \right] \quad (3.6)$$

### 3.6 Alte particule exotice studiate la MoEDAL

MoEDAL își propune să înregistreze și să studieze diverse particule teoretice care ar putea exista dincolo de Modelul Standard al fizicii particulelor. Pe lângă obiectivul său principal de detectare a monopolilor magnetici, experimentul MoEDAL este conceput pentru a identifica particule cu ionizare înaltă (HIPs) care prezintă un model dens de ionizare de-a lungul traiectoriei lor. Aceste particule cuprind o serie de caracteristici, inclusiv faptul că sunt grele, stabile sau cu o durată de viață lungă și au sarcini electrice sau proprietăți unice. MoEDAL se străduiește să detecteze particule cu sarcină sub-unitară (mCPs), care sunt particule ipotetice cu sarcini electrice minuscule, potențial chiar mai mici decât o fracțiune din sarcina electronului. Aceste particule au implicații pentru înțelegerea cosmologiei și astrofizicii. În plus, MoEDAL se concentrează pe detectarea particulelor exotice cu o durată de viață lungă (LLPs), care au durate de viață semnificativ mai mari decât particulele din Modelul Standard. Aceste LLPs pot să apară din diverse cadre teoretice, cum ar fi supersimetria. Sensibilitatea experimentului se extinde și la particulele masive stabile cu sarcină electrică (HSCPs), particule masive care își păstrează sarcinile electrice fără a suferi dezintegrări sau interacțiuni puternice cu materia. Aceste HSCPs pot avea originea în coliziuni cu energie înaltă sau fenomene astrofizice. În plus, MoEDAL se implică în investigarea particulelor asemănătoare axionului (ALPs), care sunt entități teoretice provenite din extinderi ale Modelului Standard. Aceste ALPs pot oferi soluții pentru problema CP puternică și pot oferi insight-uri în misterele legate de materia întunecată [21, 29].

## IV. Simularea Monopolilor Magnetici

Pentru a simula coliziunile de ioni grei în MadGraph5 [30], au fost necesare modificări deoarece setările implicite ale software-ului nu includ coliziuni de ioni grei. Pentru a permite simularea coliziunilor de ioni grei în MadGraph5, fluxul echivalent de fotoni prezentat în Capitolul 3 (eq. 3.6) a fost implementat, permițând utilizarea parametrului de impact în producția de monopoli magnetici, ceea ce era anterior imposibil. Secțiunea eficientă pentru fuziunea de fotoni în coliziunile de ioni grei este îmbunătățită față de coliziunile proton-proton datorită dependenței de sarcină nucleară a spectrului de fotoni, care se scalază cu  $Z^4$  [31]. Datorită constrângerilor cinematice asupra fotonilor emiși de fasciculele de ioni de plumb, fotonii sunt limitați la o energie maximă de 82 GeV la o energie de coliziune de  $\sqrt{s_{NN}} = 5,5$  TeV pentru ciocniri de Pb-Pb. Prin urmare intervalul de mase accesibil pentru producția de monopoli magnetici și dyoni în coliziunile ultraperiferice este semnificativ mai mic decât în coliziunile proton-proton. Ca rezultat, ne-am concentrat pe studiul monopoloilor cu sarcină 1gD (68.5e) cu mase sub 82 GeV. Pentru a permite producția de monopoli magnetici în ciocniri ultraperiferice de Pb-Pb, am folosit spectrul de fotoni implementat (Eq 3.6) ca funcție de distribuție a partonilor (PDF). Datele cinematice obținute din MadGraph5 au fost apoi utilizate în software-ul Geant4 [32] pentru a observa comportamentul monopolilor magnetici în cadrul experimentului MoEDAL, precum și pentru geometria conductei CMS [ref], folosind diferite scenarii de coliziuni de PbPb.



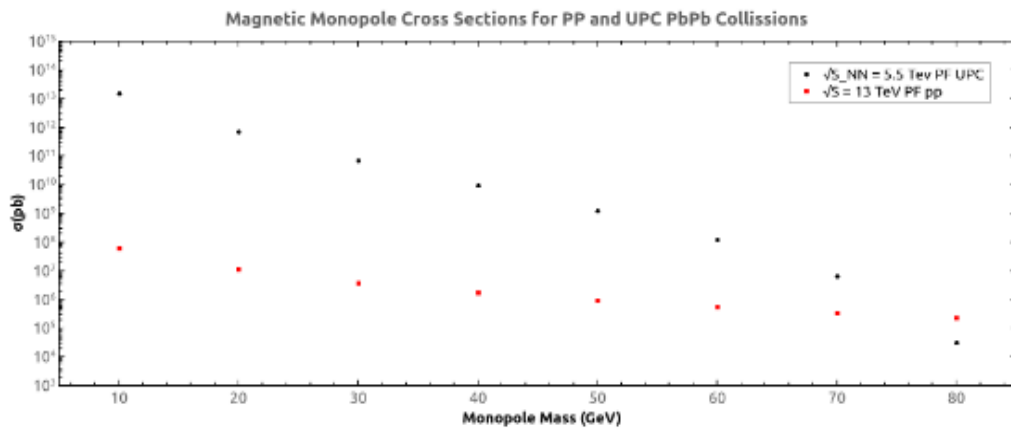
**Fig 4.1** Geometria MoEDAL implementată în Geant4. Pozițiile sistemelor de detectare MMTs sunt ilustrate, precum și pentru sistemul de detectare NTDs și HCC, care este poziționat în partea din față a sistemului de detectare în acceptanța LHCb. Imagine preluată de la [33].



## V. Rezultate

### 5.1 Secțiuni eficace de Productie de Monopoli Magnetici in MadGraph5

Secțiunile eficace pentru producția de monopoli magnetici în coliziunile de ioni grei depind puternic de parametrul de impact. Au fost luate în considerare diferite valori ale parametrului de impact pentru coliziuni centrale, semicentrale, periferice și ultraperiferice. În cazul coliziunilor centrale ale fasciculelor de ioni de plumb, a fost luat în considerare un parametru de impact de 0,7 fm (raza protonului). Pentru coliziunile semicentrale, parametrul de impact a fost crescut la 7,1 fm (raza plumbului), în timp ce pentru coliziunile periferice, a fost setat la 14,2 fm. În cazul coliziunilor ultraperiferice, parametrul de impact a fost crescut la 28,4 fm pentru a asigura că nu are loc nicio activitate hadronică. Dominanța producției de secțiuni eficace ultraperiferice față de mecanismele de producție proton-proton este observată în intervalul de mase mai mic. În Figura 5.1, secțiunea eficace pentru monopoli magnetici PbPb UPC este prezentată în comparație cu secțiunile eficace pentru monopoli magnetici produși în coliziunile pp. Secțiunile eficace au fost obținute în generatorul MadGraph5. De asemenea, incertitudinile în secțiunile eficace pot fi obținute în MadGraph5, ceea ce joacă un rol crucial în calcularea ratelor așteptate, așa cum va fi prezentat mai târziu. Tabelul 5.1 prezintă secțiunile eficace și incertitudinile acestora pentru coliziunile ultraperiferice Pb-Pb într-un interval de masă de la 10 la 80 GeV.



**Fig 5.1** Secțiunile eficace pentru coliziunile Pb-Pb la  $\sqrt{s} = 5,5$  TeV și secțiunea eficace pentru coliziunile pp la  $\sqrt{s} = 13$  TeV sunt prezentate [Date Originale].

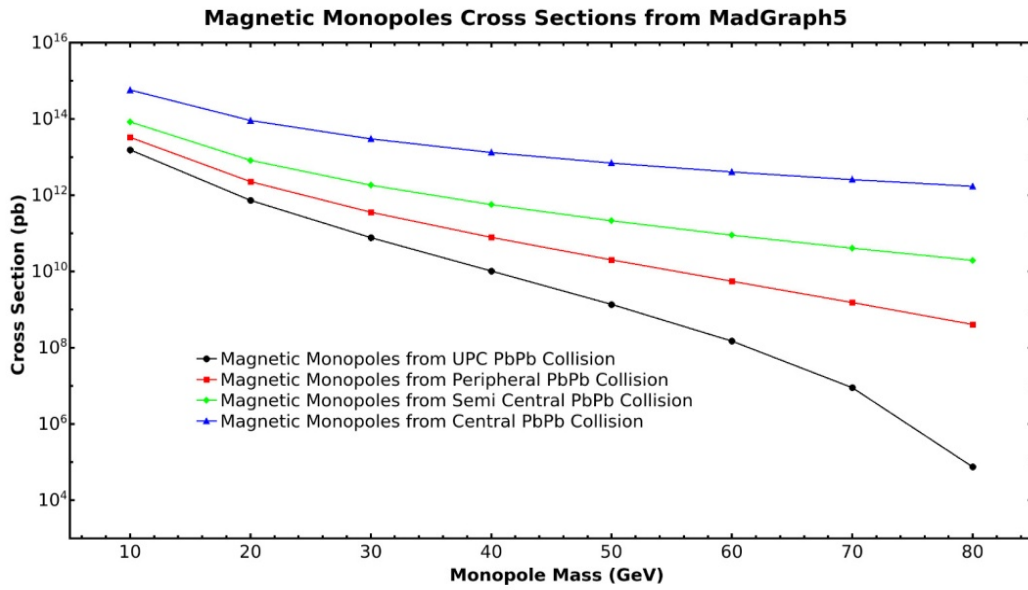
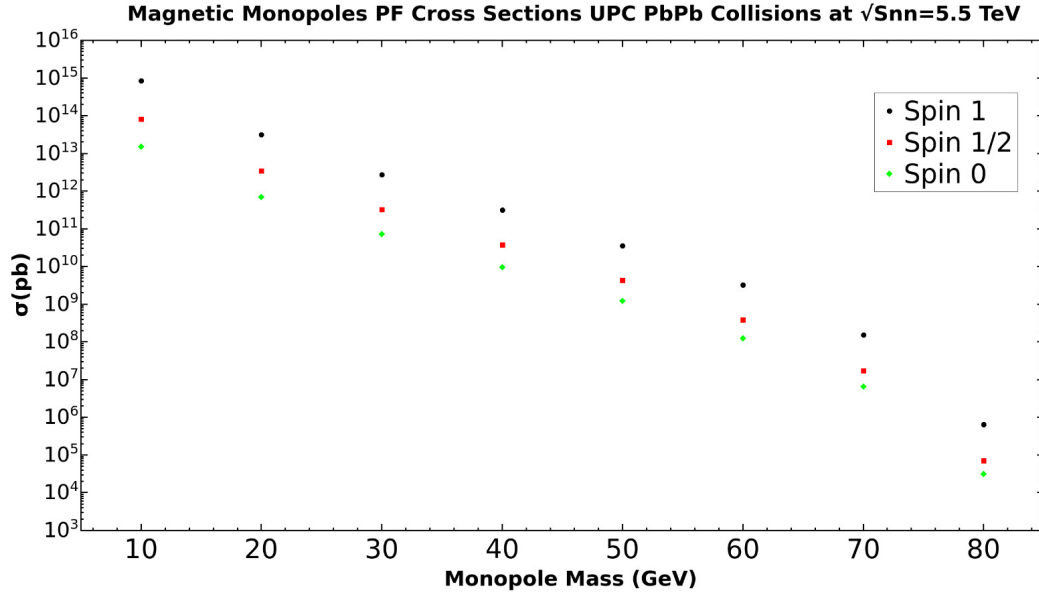
### Available Results

| Run    | Collider                       | Banner                | Cross section (pb)      | Events | Data                          | Output                                   | Action                                  |
|--------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------|-------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| run_01 | a a<br>572000.0 x 572000.0 GeV | <a href="#">tag_1</a> | $1.547e+13 \pm 2.8e+10$ | 10000  | parton madevent<br>hadron MA5 | <a href="#">LHE MA5_report_analysis1</a> | remove run   launch detector simulation |
| run_02 | a a<br>572000.0 x 572000.0 GeV | <a href="#">tag_1</a> | $7.332e+11 \pm 1.5e+09$ | 10000  | parton madevent<br>hadron MA5 | <a href="#">LHE MA5_report_analysis1</a> | remove run   launch detector simulation |
| run_03 | a a<br>572000.0 x 572000.0 GeV | <a href="#">tag_1</a> | $7.713e+10 \pm 1.8e+08$ | 10000  | parton madevent<br>hadron MA5 | <a href="#">LHE MA5_report_analysis1</a> | remove run   launch detector simulation |
| run_04 | a a<br>572000.0 x 572000.0 GeV | <a href="#">tag_1</a> | $1.028e+10 \pm 2.4e+07$ | 10000  | parton madevent<br>hadron MA5 | <a href="#">LHE MA5_report_analysis1</a> | remove run   launch detector simulation |
| run_05 | a a<br>572000.0 x 572000.0 GeV | <a href="#">tag_1</a> | $1.371e+09 \pm 3.7e+06$ | 10000  | parton madevent<br>hadron MA5 | <a href="#">LHE MA5_report_analysis1</a> | remove run   launch detector simulation |
| run_06 | a a<br>572000.0 x 572000.0 GeV | <a href="#">tag_1</a> | $1.49e+08 \pm 3.6e+05$  | 10000  | parton madevent<br>hadron MA5 | <a href="#">LHE MA5_report_analysis1</a> | remove run   launch detector simulation |
| run_07 | a a<br>572000.0 x 572000.0 GeV | <a href="#">tag_1</a> | $8.954e+06 \pm 1.3e+04$ | 10000  | parton madevent<br>hadron MA5 | <a href="#">LHE MA5_report_analysis1</a> | remove run   launch detector simulation |
| run_08 | a a<br>572000.0 x 572000.0 GeV | <a href="#">tag_1</a> | $7.481e+04 \pm 1.2e+02$ | 10000  | parton madevent               | <a href="#">LHE MA5_report_analysis1</a> | remove run   launch detector simulation |

**Tabelul 5.1.** Secțiunile eficace și erorile sunt prezentate pentru coliziuni ultraperiferice Pb-Pb într-un interval de masă de la 10 la 80 GeV. În toate cazurile, incertitudinea este mai mică de 1% [Date Originale].

Au fost efectuate diferite scenarii pentru obținerea secțiunilor eficace. Figura 5.2 (partea de sus) prezintă secțiunile eficace pentru monopoli magnetici produși în coliziuni ultraperiferice Pb-Pb pentru Spin 0, 1/2 și 1. Secțiunile eficace au fost, de asemenea, obținute pentru diferiți parametri de impact (bmin), acoperind intervalul de la coliziuni centrale la coliziuni ultraperiferice Pb-Pb (partea de jos). Variind parametrul de impact în coliziunile de ioni grei poate avea un impact asupra secțiunii eficace de producție a monopolilor magnetici, precum și asupra stării finale rezultate în urma coliziunii. În cazul producției de monopoli magnetici, parametrul de impact influențează interacțiunile electromagnetice dintre ionii care se ciocnesc și afectează probabilitatea de a produce un monopol magnetic în starea finală. Este important de menționat că secțiunea eficace de producție depinde și de energia coliziunii și de proprietățile specifice ale ionilor care interacționează.

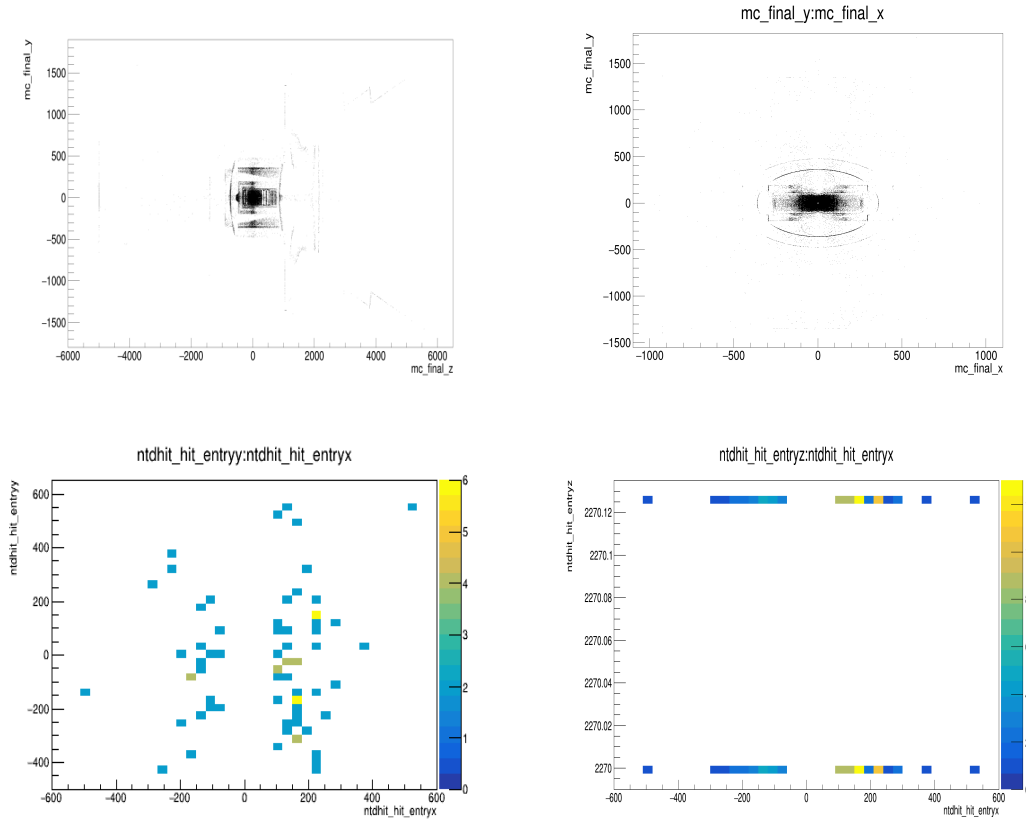
În ceea ce privește limita de masă de 82 GeV pentru producția de monopoli magnetic în starea finală, această valoare reprezintă energia maximă a fotonilor emiși în coliziunile de plumb-plumb (Pb-Pb). Prin urmare nu putem obține monopoli magnetici cu o masă mai mare de 82 GeV în ciocniri ultraperiferice de PbPb atunci când avem o energie de 2.76 GeV/nucleon.



**Fig 5.2.** (Partea de sus) Secțiunile eficace de producție pentru monopoli magnetici din coliziuni ultraperiferice Pb-Pb pentru Spin 0,  $\frac{1}{2}$  și 1. (Partea de jos) Secțiunile eficace de producție pentru monopoli magnetici din coliziuni Pb-Pb. Au fost utilizate diferiți parametri de impact: pentru coliziuni centrale,  $b_{min} = 0,7$  fm, pentru coliziuni semi-centrale,  $b_{min} = 7,1$  fm, pentru coliziuni periferice,  $b_{min} = 14,2$  fm și pentru coliziuni ultraperiferice,  $b_{min} = 28,4$  fm. Intervalul de masă de la 10 la 80 GeV a fost ales pentru monopoli magnetici în ambele cazuri (au fost efectuate 1.000.000 de evenimente/simulare în MadGraph5) [Date Originale].

## 5.2. Simularea Monopolilor Magnetici Cu Spin 0 În Geometria MoEDAL

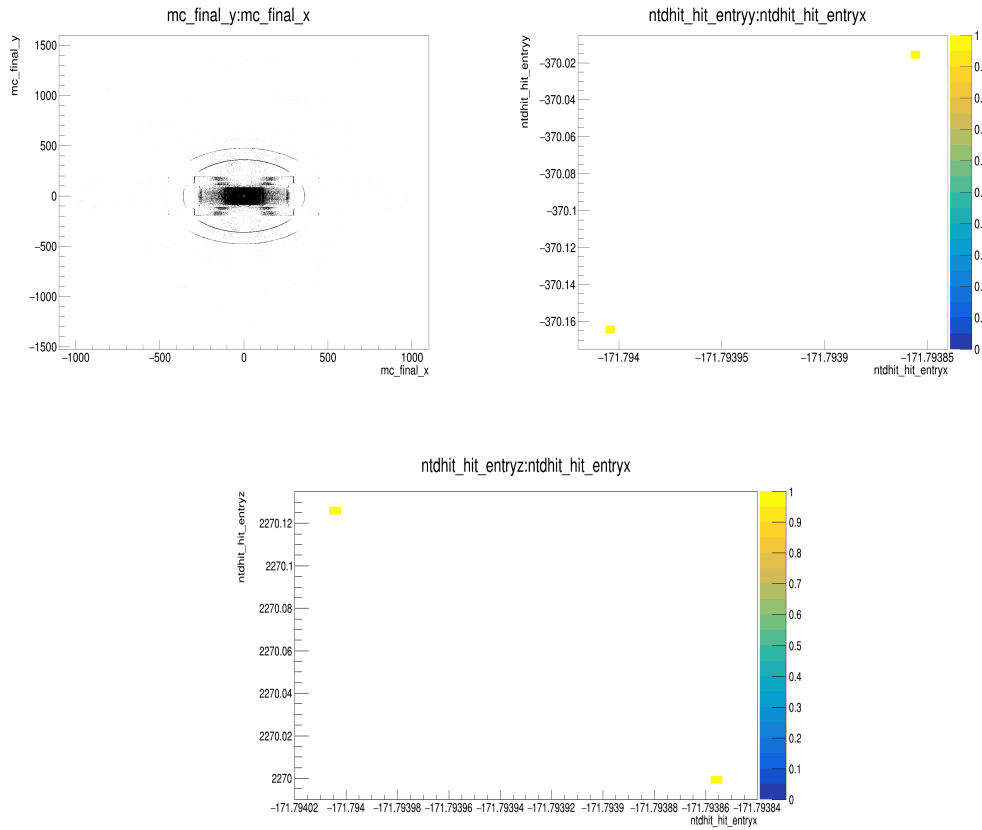
Utilizarea software-ului Geant4 pentru a studia interacția dintre monopoli magnetici și geometria MoEDAL are o importanță semnificativă în determinarea eficienței și a capacității geometriei. Examinarea detaliată a detectării monopolilor magnetici în geometria MoEDAL din diverse perspective poate furniza informații cruciale pentru plasarea optimă a componentelor MMT și NTD. Având în vedere că nu sunt mari diferențe între monopoli cu spin 0, 1/2 și 1 conform Fig.5.2, aceasta analiza s-a focusat în mare parte doar pentru monopoli cu spin 0 proveniți din ciocniri ultraperiferice de PbPb. Prin urmare, rezultatele sunt prezentate în continuare.



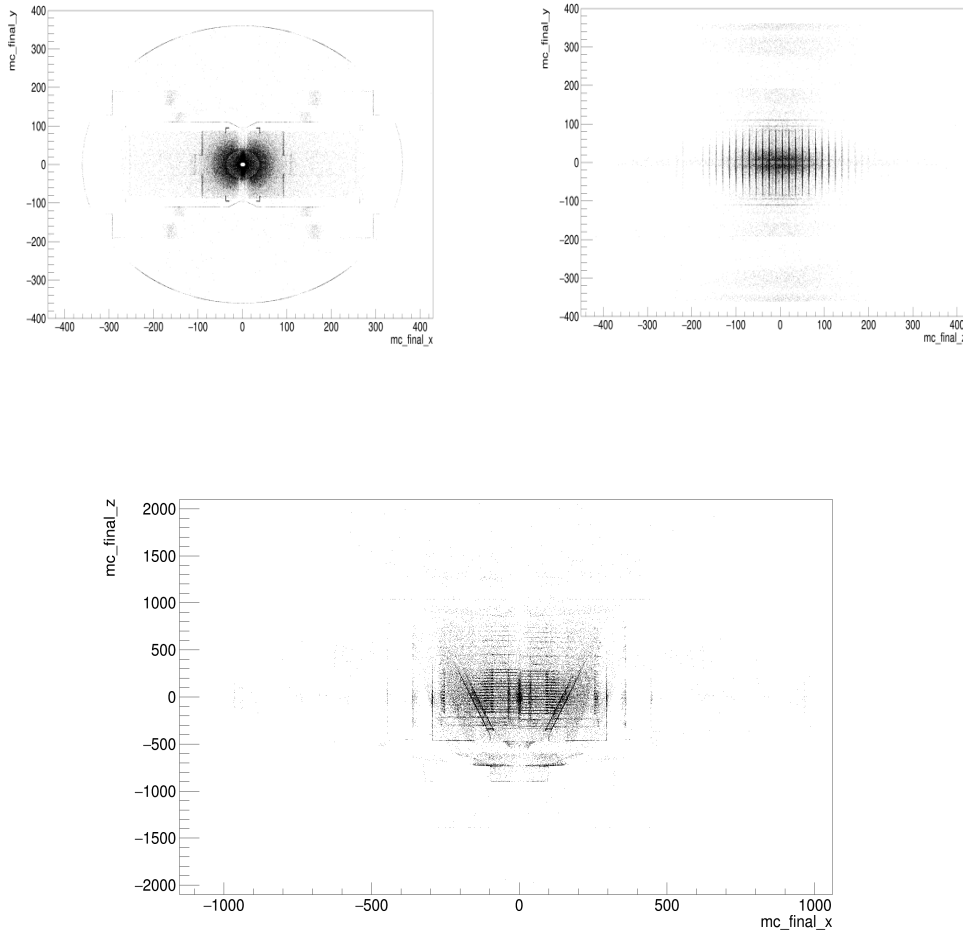
**Fig 5.3** este prezentată interacția monopolilor magnetici cu o masă de 10 GeV și o sarcină de 1gD, produs în coliziuni ultra-periferice Pb-Pb ( $b_{min} = 28.4$  fm), cu geometria MoEDAL + LHC-b [Date Originale].

În partea de sus, stânga, este evident că sensibilitatea geometriei MoEDAL către acest proces specific este redusă semnificativ. Un număr semnificativ de monopoli par a fi absorbiți de zona LHC-b VELO (partea de sus, dreapta), ceea ce duce la înregistrarea unor semnale de detecție zero de către sistemul de detectare MMTs. În ceea ce privește NTDs (partea de jos, stânga), HCC încă prezintă sensibilitate la monopoli cu energie

cinetică redusă. Reprezentarea numărului de detecții în NTDs evidențiază diferența între direcțiile axelor z și x (partea de jos, dreapta) [Date Originale].



**Figura 5.4.** Am examinat interacția monopolilor magnetici produși în coliziuni ultra-periferice de Pb-Pb (cu un parametru de impact de 28.4 fm) cu geometria MoEDAL + LHC-b. În mod specific, am luat în considerare un monopol magnetic cu spin 0, cu o masă de 40 GeV și o sarcină de 1gD (Partea de sus, stânga). Nu s-a găsit nicio interacțiune între monopoli magnetici și sistemul de detectare MMTs (Partea de sus, dreapta), arătând doar 2 evenimente inregistrate din  $10^6$  evenimente simulate în cazul NTDs (Partea de jos). [Date Originale].



**Fig 5.5** S-a investigat interacția monopolilor magnetici produși în coliziuni ultra-periferice de Pb-Pb ( $b_{min} = 28.4$  fm) cu geometria MoEDAL + LHC-b. S-a luat în considerare monopoli magnetici cu spin 0, cu o masă de 80 GeV și o sarcină de 1gD. Se pare că geometria MoEDAL nu mai este sensibilă (nici un eveniment înregistrat în MMTs + NTDs, iar fișierul ROOT generat de GEANT4 ca output este aproape gol, arătând doar LHC-b VELO). Imaginile ilustrează locul în care toți monopolii magnetici sunt absorbiți. [Date Originale]

Cinematica monopolilor magnetici cu o masă de 80 GeV produsă în coliziuni ultra-periferice de Pb-Pb este de așteptat să fie foarte scăzută, subliniind necesitatea unei investigații suplimentare asupra LHC-b VELO în acest tip de proces. Aceasta se datorează faptului că structura care susține senzorii detectorului primar al sistemului de detecție LHC-b este făcută din aluminiu, care este un material extrem de eficient în capturarea monopolilor magnetici (la fel ca MMTs).

Conform rezultatelor obținute, monopolii magnetici produși în ciocniri ultra-periferice de PbPb (prin canalul de fuziune fotonica) au energii cinetice foarte scăzute și nu se intersectează eficient cu geometria MoEDAL. Este important de menționat că,

acest canal face parte din paleta de canale utilizate în cercetarea monopolilor magnetici de către colaborarea MoEDAL.

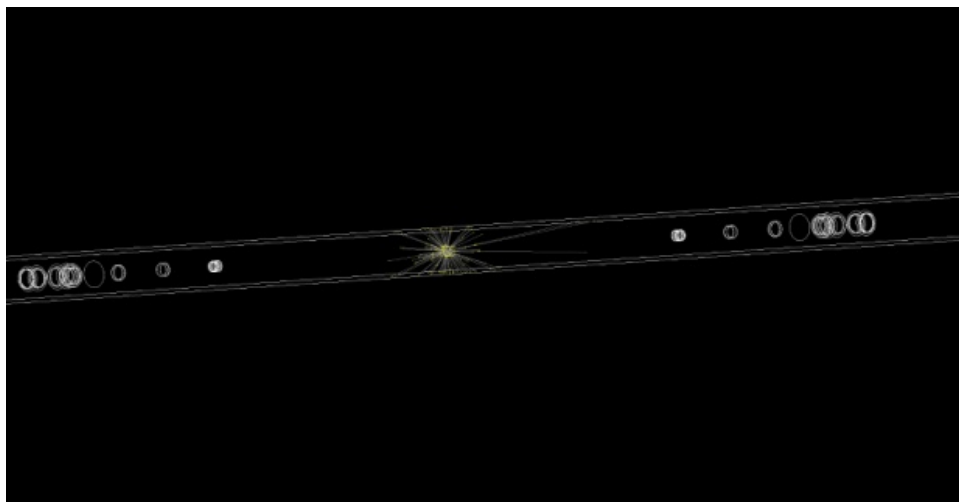
Pentru a completa imaginea acestui studiu, s-au efectuat simulări privind interacția monopolilor magnetici cu conducta fascicului CMS (Compact Muon Solenoid) de la CERN. Acest aspect este esențial pentru a înțelege cum monopolii magnetici ar putea interacționa cu alte componente ale sistemului de detecție MoEDAL. Aceste simulări au implicat utilizarea programelor informatice speciale, cum ar fi GEANT4, care permit cercetătorilor să creeze modele virtuale ale monopolilor magnetici și să observe cum acestea se comportă în interiorul conductei CMS. Acest lucru furnizează date importante privind posibilele semnale pe care monopolii magnetici cu energie cinetică scăzută, le-ar putea genera în această geometrie și ar putea oferi indicii despre cum aceste particule ar putea fi detectate experimental. Astfel, simulările conductei de fascicul CMS completează cunoștințele legate de detectarea monopolilor magnetici în cadrul experimentului MoEDAL și contribuie la obținerea unei înțelegeri mai profunde a interacțiunii acestor particule cu componentele experimentale.



## VI. Simularea Conducei De Interacție CMS

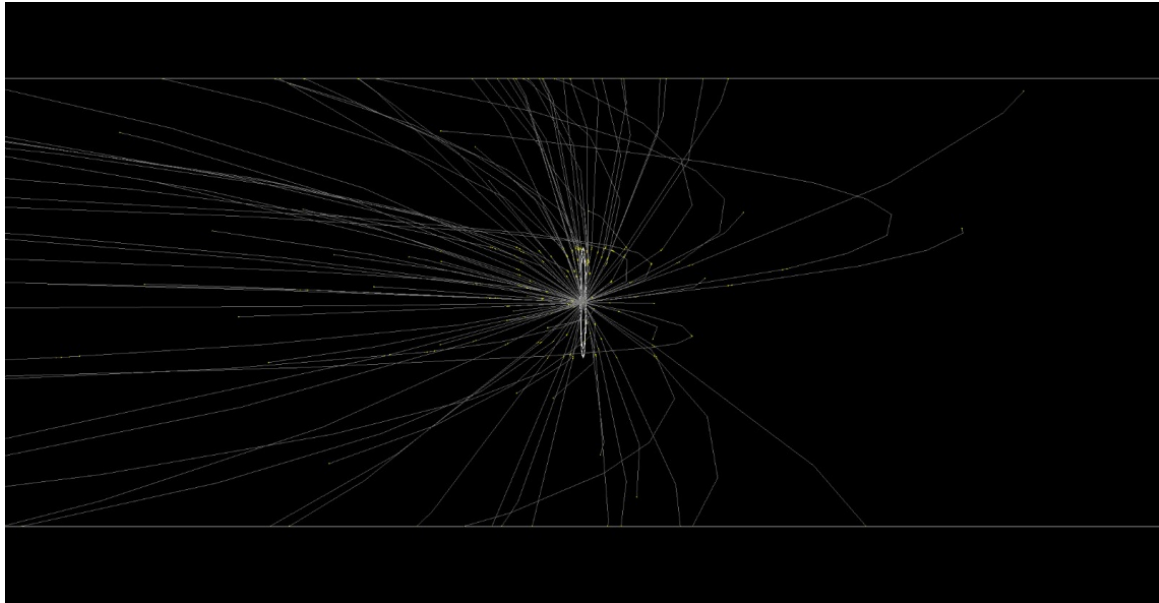
### 6.1 Simularea Geometriei Conducei de Fascicul CMS în Geant4

Pentru a propaga monopoli magnetici prin geometria conducei de fascicul CMS implementată în Geant4, a fost dezvoltat un program Python pentru a calcula distribuțiile unghiului polar ( $\theta$ ), azimutului ( $\phi$ ), impulsului și energiei cinetice din datele de ieșire (în format LHE) obținute din MadGraph5. Ulterior, aceste date au fost introduse într-un fișier GPS pentru a propaga monopoli magnetici prin geometria conducei de fascicul CMS. Prin folosirea GPS în Geant4, cercetătorii pot modela cu precizie comportamentul particulelor primare și pot studia interacțiunile acestora cu materialele detectorului sau cu țintele. Prin urmare au fost efectuate simulări pentru monopoli magnetici produșii în ciocniri Pb-Pb, concentrându-se în mod specific pe monopoli cu Spin 0. Simulările au acoperit o gamă de mase de la 10 la 80 GeV și au utilizat o sarcină Dirac de 1gD. Fiecare simulare a inclus 500.000 de evenimente. De asemenea, în Geant4, a fost implementat un câmp magnetic cu o intensitate de 3.8 Tesla orientat în direcția axei  $z$  (direcția fasciculului).



**Fig 6.1** Geometria conducei de fascicul CMS simulată este ilustrată. Monopoli magnetici sunt "injectați" în mediul virtual construit în Geant4 prin intermediul GPS atunci când câmpul magnetic global are valoarea de 0 Tesla (monopoli magnetici nu sunt deflecți) [Date originale]

Pentru a studia interacția monopolilor magnetici produși în coliziunile ultra-periferice de PbPb, cu geometria conductei de fascicul CMS (cu un câmp magnetic global de 3.8 Tesla), s-a implementat o strategie de capturare a monopolilor care se deplasează inițial în direcția opusă. Aceștia sunt întorși de câmpul magnetic și sunt absorbiți de geometrie. Pentru a izola acești monopoli c, s-a impus condiția  $\text{PreStepMomentumDirection.z()} * \text{PostStepMomentumDirection.z()} < 0$  în Geant4 (PreStep & PostStep reprezintă momentele initiale și finale ale monopolilor după ce aceștia au fost introdusi în geometria CMS). În **Fig 6.2** se observa cu monopolii magnetici sunt afectați de câmpul magnetic introdus de 3.8 Tesla.



**Fig 6.2** Monopoli Magnetici care se deplasează inițial în direcția opusă și sunt întorși pe direcția fasciculului (direcția axei z) de câmpul magnetic aplicat (3.8 Tesla). A fost aplicată condiția  $\text{PreStepMomentumDirection.z()} * \text{PostStepMomentumDirection.z()} < 0$  pentru a extrage informații despre poziție, moment cinetic, energie și alte proprietăți în momentul în care aceștia își schimbă direcția în câmpul magnetic CMS. [Date originale]

## 6.2 Eficiența Geometriei Conduței de fascicul CMS. Rata Așteptată

Pentru a calcula rata așteptată, mai întâi trebuie să estimăm acceptanța și eficiența pentru geometria conductei de fascicul. Acceptanța pentru monopoli magnetici poate fi determinată prin calcularea raportului dintre numărul total de monopoli observați în simularea Geant4 și numărul total de evenimente simulate. În cazul nostru specific, acest raport se obține prin împărțirea la 500.000 de evenimente. Pe de altă parte,

eficiența este definită ca raportul dintre numărul total de monopoli magnetici sub un anumit prag de energie cinetică și numărul total de evenimente simulate. Pentru geometria MoEDAL, pragul de energie cinetică pentru capturarea de monopoli magnetici în materialul de aluminiu este de obicei setat între 0.5 și 2.5 MeV, conform referinței [34]. Cu toate acestea, în cazul monopolilor magnetici produși în ciocniri ultraperiferice de Pb-Pb, impulsul lor scăzut duce la absorbția lor prin ionizare în LHC-b Velo, așa cum se observă în simulări. Având în vedere conducta de fascicul CMS, care este construită din beriliu, pragul specific de energie cinetică nu a fost determinat încă cu precizie. Prin urmare, în acest scenariu, vom considera pragul mai mic decât valoarea aplicabilă aluminiului. Pentru a calcula nivelul de încredere al excluderii, vom presupune diferite valori ale pragului de energie cinetică.

Rata așteptată a monopolilor magnetici capturați în geometria conductei de fascicul în timpul rulărilor de date Pb-Pb este determinată prin înmulțirea secțiunilor eficace pentru monopoli, a luminozității, a acceptanței și a eficienței de capturare. Această calcul oferă o estimare a numărului de monopoli magnetici anticipați să fie capturați în conducta de fascicul pe parcursul perioadei de achiziție a datelor. Prin înmulțirea acestor factori împreună, putem estima numărul de monopoli magnetici așteptați să fie prinși în conducta de fascicul în timpul rulărilor de date de Pb-Pb.

### 6.3 Simulări „Toy Monte Carlo”. Nivelul de Încredere Pentru Excluderea Monopolilor Magnetici

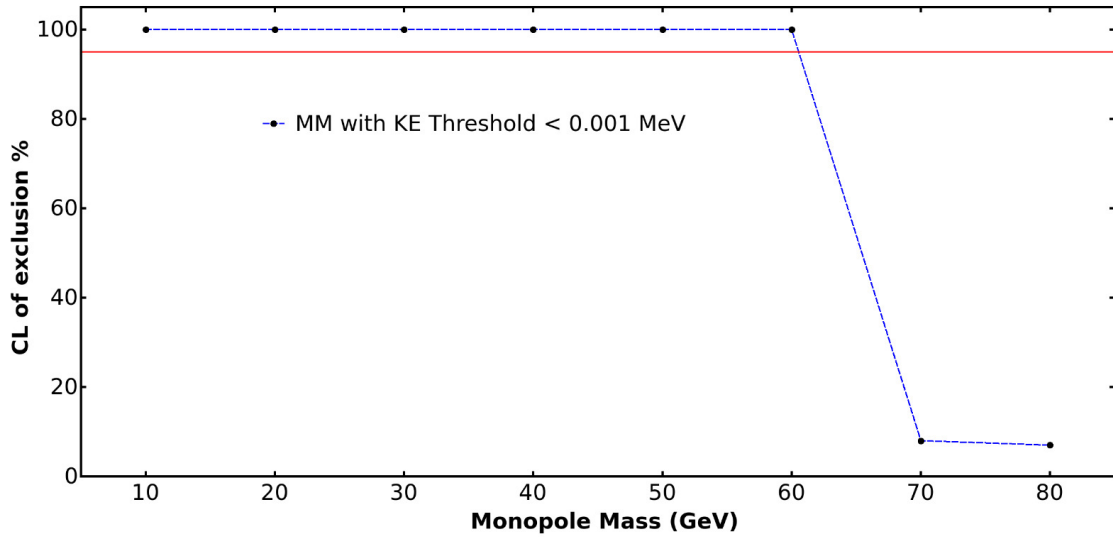
Simulările de tip „Toy Monte Carlo” este o tehnică computațională folosită pentru a estima probabilități și pentru a simula evenimente aleatoare. Aceasta implică generarea unui număr mare de eșantioane sau "jucării" aleatoare bazate pe anumite distribuții de probabilitate și parametri. Aceste evenimente sunt apoi utilizate pentru a simula procesul experimental și pentru a calcula cantitățile dorite. În contextul acestui studiu, simularea Monte Carlo este folosită pentru a determina probabilitatea de a observa zero monopoli magnetici în geometria conductei fasciculului CMS. Simularea implică extragerea aleatorie a valorilor pentru eficiență și secțiuni eficace din distribuțiile lor respective. Utilizând aceste valori generate aleator, se calculează  $R_{\text{exp}}$ , reprezentând numărul de monopoli magnetici așteptați să fie observați [145]. Apoi, se generează o rată observată  $R^i$ , extrăgând aleator dintr-o distribuție Poisson cu o medie de  $\mu = R_{\text{exp}}^i$ . Prin repetarea acestui proces de multe ori (1000000 de evenimente/simulare), se obține o distribuție a ratelor observate. Apoi, probabilitatea  $P(0 \vee R_{\text{exp}}^{\min}, R_{\text{exp}}^{\max})$  este determinată prin calcularea fracției intrărilor din distribuția ratei observate ale jucăriei în care  $R^i$  este egal cu zero. Această probabilitate reprezintă probabilitatea de a observa zero MM-uri în datele experimentale date intervalului de rate așteptate  $R_{\text{exp}}$ . Pentru a exclude masele monopolilor magnetici din analiză, folosim în final  $\left(1 - P(0 \vee (R_{\text{exp}}^{\min}, R_{\text{exp}}^{\max}))\right) \times 100\%$ , care reprezintă nivelul de încredere al excluderii. O ilustrație mai detaliată a utilizării acestei metode poate fi găsită în [35].

După cum am menționat anterior, utilizarea unei geometrii simple precum cea a conductei fasciculului CMS duce la incertitudini remarcabil de scăzute în ceea ce privește eficiența și acceptanța, cu erori de sub 1%. Acest lucru duce la un impact redus asupra determinării limitelor de masă. Motivul principal pentru acest lucru este relația exponențială dintre secțiunea eficace și masele monopolilor magnetici. Prin urmare, intervalul ratelor observate ( $R_{\text{exp}}^{\min}$ ,  $R_{\text{exp}}^{\max}$ ) este de așteptat să prezinte doar variații minore. Modificarea pragului de energie cinetică în simularea Geant4 este un alt factor care poate influența eficiența. Scăderea pragului sub 2,6 MeV (așa cum este utilizat pentru aluminiu în MMTs) va duce la o eficiență redusă, ducând la rezultate diferite în ceea ce privește excluderea masei monopolilor magnetici cu un nivel de încredere de 95% [35]. Cu toate acestea, ratele observate ( $R_{\text{exp}}^{\min}$ ,  $R_{\text{exp}}^{\max}$ ) vor prezenta în continuare variații minore, așa cum am menționat mai devreme.

| Mass (GeV) | Cross-Sections (pb) | Acceptan ce | Efficiency | $R_{\text{exp}}^{\min}$ | $R_{\text{exp}}^{\max}$ |
|------------|---------------------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|
| 10         | 1.547e+13           | 0.18514     | 0.02222    | 9.55e+05                | 1.142e+06               |
| 20         | 7.332e+11           | 0.12099     | 0.00082    | 1.01e+04                | 1.44e+04                |
| 30         | 7.713e+10           | 0.11164     | 0.00061    | 7.15e+02                | 1.10e+03                |
| 40         | 1.028e+10           | 0.15506     | 0.00082    | 190.142                 | 261.77                  |
| 50         | 1.371e+09           | 0.13168     | 0.00010    | 32.75                   | 43.30                   |
| 60         | 1.493e+08           | 0.16518     | 0.00177    | 6.92                    | 8.480                   |
| 70         | 8.95e+06            | 0.22243     | 0.00247    | 0.0792                  | 0.09427                 |
| 80         | 7.481e+04           | 0.40087     | 0.01402    | 0.071                   | 0.0757                  |

Tabelul 6.1. Acest tabel prezintă secțiunile eficace, acceptarea, eficiența și ratele observate ( $R_{\text{exp}}^{\min}$ ,  $R_{\text{exp}}^{\max}$ ) atunci când pragul de energie cinetică pentru monopoli este stabilit sub 0,001 MeV [Date originale].

În acest studiu s-au utilizat mai multe praguri de energie. Acest prag este cuprins între 2.6 MeV și 1 KeV, dar în acest rezumat s-au prezentat doar valorile obținute în cazul în care aplicăm un prag energetic de 1 KeV pentru monopoli magnetici. În Tabelul 6.1, pot fi observate variații minore ale valorilor  $R_{\text{exp}}^{\min}$  și  $R_{\text{exp}}^{\max}$ . Prin implementarea metodei de simulare „Toy Monte Carlo”, este posibil să excludem toți monopoli magnetici până la 70 GeV cu un nivel de încredere de 95%.



**Fig 6.3** Utilizând simularea GEANT4 cu geometria conductei de fascicul CMS și un prag de energie cinetică mai mic de 0.001 MeV, se obține un nivel de excludere de 95% pentru monopoli magnetici produși în ciocniri ultra-periferice Pb-Pb. Analiza arată că masele până la 70 GeV sunt excluse cu succes pe baza ratelor  $R_{\text{exp}}$  observate.

## 6.4 Concluzii

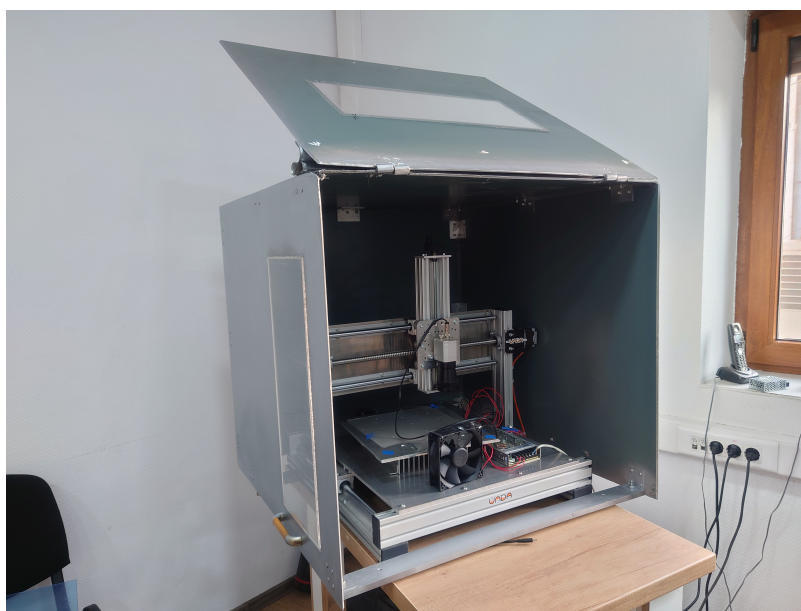
Analiza relevă faptul că principalul factor care influențează rata așteptată  $R_{\text{exp}}$  este reprezentat de secțiunile eficace obținute din MadGraph5. În mod interesant, chiar și cu o creștere a eficienței, impactul asupra rezultatelor este relativ minimal atunci când se studiază eficiența geometriei conductei de fascicul CMS. Prin urmare, limitele de excludere pentru masa depind în primul rând de secțiunile eficace. Utilizarea beriliului ca material principal în GEANT4 adaugă complexitate analizei în comparație cu aluminiul utilizat în MMT-urile MoEDAL. Prin urmare, explorarea diferitelor energii cinetice de prag pentru monopoli magnetici se dovedește valoroasă în astfel de analize. Vor fi efectuate investigații suplimentare pentru a obține o înțelegere mai precisă a modului în care monopoli magnetici de energie scăzută interacționează cu atomii de beriliu. Acest lucru va permite determinarea unei valori optime de prag pentru capturarea și studierea eficiență a acestor monopoli.



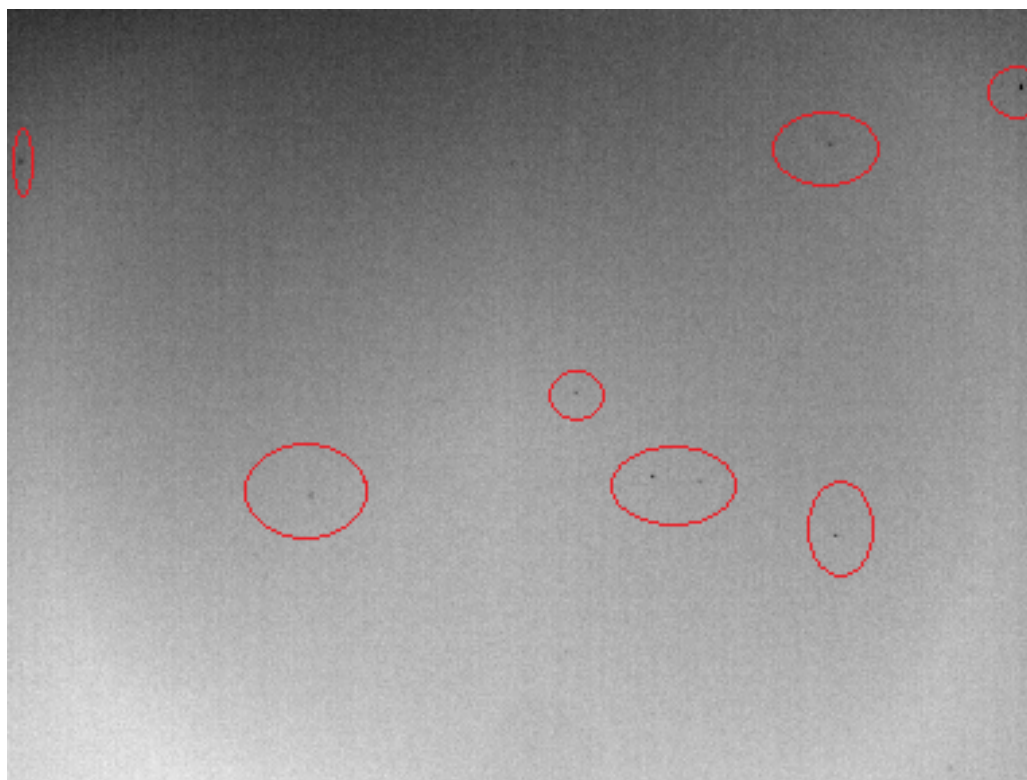
## VII. Prototipul De Scanare Termica

Grupul RoMOEDAL a dezvoltat un prototip specializat de scanare termică conceput în mod specific pentru a studia Detectorul Nuclear de Urme (NTD) în cadrul experimentului MoEDAL. Acest dispozitiv inovator ne permite să monitorizăm îndeaproape și să analizăm variațiile de temperatură ale polimerilor NTD în timpul observațiilor experimentale. Sistemul este compus din componente aranjate cu grijă pentru a asigura controlul precis al temperaturii și măsurători termice precise. Placa de plastic NTD este plasată pe partea superioară a unui stivuitor de plăci de aluminiu, creând un strat de izolație termică între elementele de încălzire și răcire. Direct sub eșantionul NTD, am incorporat un element de încălzire de 250W. Acesta permite încălzirea controlată și reglabilă a plăcii, simulând diverse condiții de mediu în scopuri experimentale. Oferă posibilitatea de a studia răspunsul plăcii la diferite scenarii de temperatură. În vecinătatea elementului de încălzire se află o placă de aluminiu, care servește ca barieră între elementele de încălzire și cele de răcire. Sub această placă am implementat patru elemente Peltier termoelectrice. Aceste elemente funcționează ca sisteme de răcire active și sunt capabile să absoarbă aproximativ 30W de căldură fiecare. Ele asigură o răcire eficientă a plăcii NTD atunci când este necesară în procesul experimental.

Prin analizarea atentă a modelelor termice captate de camera cu infraroșu, cercetătorii pot cartografia și studia distribuția acestor defecte pe suprafața probelor. Cu alte cuvinte, prin utilizarea modului cu infraroșu al camerei termice, cercetătorii pot reduce semnificativ timpul necesar pentru a identifica și localiza potențiale defecte pe suprafețele NTD.



**Fig 7.1** Prototip specializat de scanare termică realizat de echipa RoMoEDAL



**Fig 7.2** Pentru investigarea efectelor iradierii asupra diferitelor materiale plastice, mostrele obținute de la Bologna sunt supuse unor expuneri cu Pb208.

## VIII. Concluzii Generale

În concluzie, această teză a fost dedicată explorării fezabilității studierii particulelor cu energie de ionizare foarte mare, în special a monopolilor magnetici. Investigarea s-a concentrat pe avantajele teoretice asociate producerii monopolilor magnetici prin canalul de fuziune a fotonilor în ciocnirile ultra-periferice Pb-Pb. Pentru a facilita simulări precise și analize ale procesului de producție, s-au făcut modificări la setările implicite ale software-ului MadGraph5. Cu toate că secțiunile eficace pentru producția de monopoli magnetici în ciocnirile Pb-Pb prezintă avantaje semnificative în comparație cu cele din ciocnirile proton-proton (cu mențiunea că secțiunea eficace pentru fuziunea fotonilor în ciocnirile cu ioni grei este semnificativ mai mare decât în cazul ciocnirilor proton-proton [31]), simulările MadGraph5 au relevat o limitare în producția de particule cu o masă mai mare de 82 GeV în ciocnirile cu ioni grei. Rezultatele obținute din simulările Geant4 ilustrează, de asemenea, faptul că monopolii magnetici nu pot ajunge la geometria MoEDAL atunci când se utilizează monopolii magnetici produși în ciocniri ultra-periferice Pb-Pb la o masă de 80 GeV utilizând **canalul de fuziune de fotoni**. Datorită energiei cinetice reduse, toți monopolii magnetici sunt absorbiți de structura de aluminiu din LHCb VELO, așa cum a fost discutat în Capitolul 5. Sistemul de detecție MMTs prezintă o receptivitate comparativ mai redusă față de monopolii magnetici generați în ciocniri ultra-periferice Pb-Pb. Acest lucru se datorează amplasării sale mai îndepărtate față de detectorii NTD și HCC. Cu toate acestea, este important să subliniem că monopolii magnetici **produși prin canalul de fuziune a fotonilor** în ciocnirile Pb-Pb s-ar putea să nu fie candidați potriviți pentru geometria MoEDAL. Acest lucru este valabil chiar și atunci când se ia în considerare creșterea așteptată a secțiunilor eficace cu  $Z^4$  (pentru mase mai mici), în contrast cu monopolii magnetici produși în ciocnirile proton-proton. Prin urmare, este necesară o investigație suplimentară pentru a înțelege dinamica care are loc la IP8 și pentru a obține „insight-uri” în fenomenele observate. În cazul simulării geometriei conductei de fascicul CMS, pare să prezinte un răspuns mai bun la monopolii magnetici cu energie cinetică foarte redusă. Capitolul 6 prezintă utilizarea condiției  $\text{PreStepMomentumDirection.z}() * \text{PostStepMomentumDirection.z}() < 0$  pentru selectarea monopolii magnetici care prezintă o mișcare de rotație în cadrul câmpului magnetic CMS (3,8 T). Această condiție de selecție se dovedește eficientă în izolarea acestor monopolii magnetici. De asemenea, pentru a stabili limitele de excludere a maselor cu un nivel de încredere de 95%, s-a implementat strategia prezentată în Capitolul 6 și în [42] prin intermediul simulărilor de tip „Toy Monte Carlo”. Rezultatele indică faptul că monopolii magnetici cu limite de masă de până la 80 GeV pot fi excluși atunci când se utilizează o valoare prag de energie cinetică de  $< 2,5$  MeV. În plus, o valoare prag de energie cinetică de mai mica de 0,001 MeV permite excluderea monopolilor magnetici cu limite de masă de până la 70 GeV. Cu toate acestea, este important să menționăm că valoarea exactă a energiei cinetice necesare pentru ca monopolii magnetici să se lege de nucleele de beriliu rămâne necunoscută. Prin urmare, viitoarele cercetări în această direcție vor fi efectuate pentru avansarea acestei analize.

Capitolul 7 introduce un sistem prototip de scanare termică, care reprezintă o alternativă promițătoare la sistemul de scanare optică pentru studierea NTD-urilor expuse în detectorul MoEDAL. Rezultatele inițiale obținute din diverse teste efectuate cu acest sistem sunt prezentate în Figura 7.2 pentru a demonstra capacitatea sistemului de a detecta defecte moleculare în mostrele iradiate cu Pb208 din Bologna. Cu toate acestea, sunt necesare îmbunătățiri suplimentare, în special în ceea ce privește izolarea termică, pentru a elimina potențialele interferențe de la curent în timpul experimentului. Mai mult, eforturile în curs se concentrează pe testarea unui sistem de încălzire mai precis și uniform pentru a îmbunătăți acuratețea rezultatelor obținute. Este important să menționăm că sistemul se află încă în stadiul de prototip, iar dezvoltările viitoare sunt așteptate să abordeze aceste limitări și să optimizeze performanța sa.

## IX. Bibliografie

- [1] Kusenko, Alexander, et al. "Fundamental forces and scalar field dynamics in the early universe." *Physics Letters B* 804 (2020): 135369.
- [2] Novaes, Sérgio Ferraz. "Standard model: An introduction." *arXiv preprint hep-ph/0001283* (2000).
- [3] Huang, Kerson. *Fundamental Forces of Nature: The story of gauge fields*. World Scientific, 2007.
- [4] Kusenko, Alexander, et al. "Fundamental forces and scalar field dynamics in the early universe." *Physics Letters B* 804 (2020): 135369.
- [5] Baldi, Pierre, Peter Sadowski, and Daniel Whiteson. "Searching for exotic particles in high-energy physics with deep learning." *Nature communications* 5.1 (2014): 4308.
- [6] Brüning, O., H. Burkhardt, and S. Myers. "The large hadron collider." *Progress in Particle and Nuclear Physics* 67.3 (2012): 705-734.
- [7] S. Baird, "Accelerators for pedestrians", AB-Note-2007-014 OP.
- [8] Acharya, Bobby, et al. "Search for highly-ionizing particles in pp collisions at the LHC's Run-1 using the prototype MoEDAL detector." *The European Physical Journal C* 82.8 (2022): 694.
- [9] Katre, Akshay. "Magnetic monopole search with the MoEDAL test trapping detector." *EPJ Web of Conferences*. Vol. 126. EDP Sciences, 2016.
- [10] Mitsou, Vasiliki A. "Hunting magnetic monopoles and more with MoEDAL at the LHC." *arXiv preprint arXiv:1710.08609* (2017).
- [11] [ Staelens, Michael A. "Physics From Beyond the Standard Model: Exotic Matter Searches at the LHC with the MoEDAL-MAPP Experiment." (2021).
- [12] Pinfold, James L. "The MoEDAL experiment-a new light on LHC physics." *EPJ Web of Conferences*. Vol. 95. EDP Sciences, 2015.
- [13] Staelens, Michael (13 October 2019). "Recent Results and Future Plans of the MoEDAL Experiment". Link: [arXiv:1910.05772](https://arxiv.org/abs/1910.05772)

- [14] Pinfold, James. "MoEDAL-MAPP, an LHC Dedicated Detector Search Facility." arXiv preprint arXiv:2209.03988 (2022).
- [15] Acharya, B., et al. arXiv: MoEDAL-MAPP, an LHC Dedicated Detector Search Facility. No. arXiv: 2209.03988. 2022.
- [16] See: <https://moedal.web.cern.ch/>
- [17] Lax, M., and D. F. Nelson. "Maxwell equations in material form." *Physical Review B* 13.4 (1976): 1777.
- [18] Moulin, F. (2001). "Magnetic monopoles and Lorentz force". *Nuovo Cimento B*. 116 (8): 869–877. Link: arXiv:math-ph/0203043.
- [19] G. Giacomelli , “Magnetic Monopole”, *Riv.Nuovo Cim.* 7N12 (1984) 1-111 Link: DOI:10.1007/BF02724347
- [20] Gelis, François, and Naoto Tanji. "Schwinger mechanism revisited." *Progress in Particle and Nuclear Physics* 87 (2016): 1-49.
- [21] MoEDAL Collaboration, „The Physics Programme of the MoEDAL Experiment at the LHC”, *Int. J. Mod. Phys. A*29, 1430050 (2014), arXiv:1405.7662 [hep-ph].
- [22] Image taken from: MoEDAL Collaboration, „The Physics Programme of the MoEDAL Experiment at the LHC”, *Int. J. Mod. Phys. A*29, 1430050 (2014), arXiv:1405.7662 [hep-ph].
- [23] Harland-Lang, L. A., V. A. Khoze, and M. G. Ryskin. "The production of a diphoton resonance via photon-photon fusion." *Journal of High Energy Physics* 2016.3 (2016): 1-27.
- [24] d'Enterria, David; da Silveira, Gustavo G. (22 August 2013). "Observing Light-by-Light Scattering at the Large Hadron Collider". *Physical Review Letters*. American Physical Society (APS). 111 (8): 080405. Link: arXiv:1305.7142.
- [25] Beth, R.A. (1935). "Direct detection of the angular momentum of light". *Phys. Rev.* 48 (5): 471. Link: doi:10.1103/PhysRev.48.471
- [26] Carlos A. Bertulani, Spencer R. Klein and Joakim Nystrand, “Physics of Ultra-Peripheral Nuclear Collisions” 13 July 2005, Link: DOI:10.1146/annurev.nucl.55.090704.151526

- [27] Max S. Zolotarev, Kirk T. McDonald , “ Classical Radiation Processes in the Weizsacker-Williams Approximation, Classical Physics, 29 Mar 2000, Link: [arXiv:physics/0003096v6](https://arxiv.org/abs/physics/0003096v6)
- [28] J. D. Jackson (1975-10-17). Classical Electrodynamics (2rd edition). ISBN 978-0-471-43132-9.
- [29] Acharya, B., et al. “Search for highly-ionizing particles in pp collisions at the LHC's Run-1 using the prototype MoEDAL detector”. EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C Volume 82 Issue 8 Article Number 694 (2022) . DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10608-2
- [30] MadGraph website: <https://launchpad.net/mg5amcnlo>
- [31] Wen Yi Song, Wendy Taylor, “Pair production of magnetic monopoles and stable high-electric-charge objects in proton-proton and heavy-ion collisions”, 22 Jul 2021, High Energy Physics – Phenomenology, Link: [arXiv:2107.10789v2](https://arxiv.org/abs/2107.10789v2)
- [32] Geant4 website: <https://geant4.web.cern.ch/>
- [33] James Lewis Pinfold, “ The MOEDAL experiment at the lhC—a progress report”, Universe 5(2):47, Link: DOI:10.3390/universe5020047
- [34] De Roeck, A., et al. "Sensitivity of LHC experiments to exotic highly ionising particles." The European Physical Journal C 72 (2012): 1-18.
- [35] Acharya, B et al., “Search for magnetic monopoles produced via the Schwinger mechanism”. Nature 602, 63–67 (2022). Link: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04298-1>



## X. Contribuții

### Publicații MoEDAL (AIS cumulativ = 37.719)

[1]. Acharya, B., **H. Branzas** et al. - "Search for magnetic monopoles produced via the Schwinger mechanism." - Nature 602.7895 (2022): 63-67. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04298-1>, AIS = 25.583

[2]. Acharya, B., **H. Branzas** et al. - "Search for highly-ionizing particles in pp collisions at the LHC's Run-1 using the prototype MoEDAL detector." - The European Physical Journal C82.8 (2022): 694. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10608-2>, AIS = 1.208

[3]. Acharya, B., **H. Branzas** et al. - "Search for magnetic monopoles with the MoEDAL forward trapping detector in 2.11 fb<sup>-1</sup> of 13 TeV proton-proton collisions at the LHC" - Physics Letters B782(2018)510-516. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.05.069>, AIS = 1.244

[4]. Acharya, Bobby, **H. Branzas** et al. - "First Search for Dyons with the Full MoEDAL Trapping Detector in 13 TeV proton-proton collisions" - Physical Review Letters 126.7 (2021): 071801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.071801>, AIS = 3.228

[5]. Acharya, Bobby, **H. Branzas** et al. - "Magnetic monopole search with the full MoEDAL trapping detector in 13 TeV pp collisions interpreted in photon-fusion and Drell-Yan production" - Physical Review Letters 123.2(2019)021802 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.021802>, AIS = 3.228

[6]. Acharya, B., **H. Branzas** et al. - "Search for magnetic monopoles with the MoEDAL forward trapping detector in 13 TeV proton-proton collisions at the LHC" - Physical Review Letters 118.6(2017)061801, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.061801>, AIS = 3.228

### Publicații KM3NeT & ANTARES (AIS cumulativ = 60.499)

[1]. Albert, Arnaud, **H. Branzas** et al. - "Search for spatial correlations of neutrinos with ultra-high-energy cosmic rays" - The Astrophysical Journal 934.2(2022)164, AIS = 1.581

- [2]. A. Albert, **H. Branzas** et al. (ANTARES collaboration) - "Search for non-standard neutrino interactions with 10 years of ANTARES data" - JHEP 7.048(2022)2112-14517, AIS = 1.408
- [3]. A. Albert, **H. Branzas** et al. - "Search for secluded dark matter towards the Galactic Centre with the ANTARES neutrino telescope" - Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (2022)028, AIS = 1.563
- [4]. A.Arthur, **H. Branzas** et al. - "Search for solar atmospheric neutrinos with the ANTARES neutrino telescope" - Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (2022)018, AIS = 1.563
- [5]. Albert, A. **H. Branzas**, et al. - "Search for magnetic monopoles with ten years of the ANTARES neutrino telescope" - Journal of High Energy Astrophysics" 34(2022)1-8, AIS = 1.408
- [6]. Aiello, S. **H. Branzas**, et al. - "Combined sensitivity of JUNO and KM3NeT/ORCA to the neutrino mass ordering" - Journal of High Energy Physics 2022.3(2022)1-31, AIS = 1.408
- [7]. Aiello, S. **H. Branzas**, et al. - "Determining the neutrino mass ordering and oscillation parameters with KM3NeT/ORCA" - The European Physical Journal C82.1 (2022)26, AIS = 1.208
- [8]. Aiello, S. **H. Branzas**, et al. - "Sensitivity to light sterile neutrino mixing parameters with KM3NeT/ORCA" - Journal of High Energy Physics - 2021.10(2021)1-26, AIS = 1.408
- [9]. Albert, Arthur, **H. Branzas** et al. - "Search for neutrinos from the tidal disruption events AT2019dsg and AT2019fdr with the ANTARES telescope" - The Astrophysical Journal 920.1(2021)50, AIS = 1.581
- [10]. van Haren, **H. Branzas et al** - "The KM3NeT potential for the next core-collapse supernova observation with neutrinos" - The European Physical Journal C5(2021), AIS = 1.208
- [11]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "ANTARES Search for Point Sources of Neutrinos Using Astrophysical Catalogs: A Likelihood Analysis" - The Astrophysical Journal 911.1(2021)48, AIS = 1.581
- [12]. Albert, Arnould, **H.Branzas** et al. - "Measurement of the atmospheric  $\nu_e$  and  $\nu_\mu$  energy spectra with the ANTARES neutrino telescope" - Physics Letters B816(2021) 136228, AIS = 1.244

- [13]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "ANTARES upper limits on the multi-TeV neutrino emission from the GRBs detected by IACTs" - Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2021.03(2021)092, AIS = 1.563
- [14]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "Constraining the contribution of Gamma-Ray Bursts to the high-energy diffuse neutrino flux with 10 yr of ANTARES" data" - Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 500.4(2021)5614-5628, AIS = 1.23
- [15]. Aiello, Sebastiano, **H. Branzas** et al. - "Architecture and performance of the KM3NeT front-end firmware" - Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems 7.1 (2021): 016001-016001. AIS = 0.43
- [16]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "Monte Carlo simulations for the ANTARES underwater neutrino telescope" - Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2021.01(2021)064, AIS = 1.563
- [17]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "Observation of the cosmic ray shadow of the Sun with the ANTARES neutrino telescope" - Physical Review D 102.12(2020)122007, AIS = 1.108
- [18]. Aiello, Sebastiano, **H. Branzas** et al. - "The control unit of the KM3NeT data acquisition system" - Computer Physics Communications 256(2020)107433, AIS = 1.674
- [19]. Aiello, S., **H. Branzas** et al. - "Deep-sea deployment of the KM3NeT neutrino telescope detection units by self-unrolling" - Journal of Instrumentation 15.11(2020) P11027, AIS = 0.34
- [20]. Aiello, Sebastiano, **H. Branzas** et al. - "gSeaGen: the KM3NeT GENIE-based code for neutrino telescopes" - Computer Physics Communications 256(2020)107477, AIS = 1.674
- [21]. Albert, A., **H. Branzas**, et al. "Combined search for neutrinos from dark matter self-annihilation in the Galactic Center with ANTARES and IceCube." Physical Review D 102.8 (2020): 082002, AIS = 1.108
- [21]. Aiello, Sebastiano, **H. Branzas**, et al. - "Event reconstruction for KM3NeT/ORCA using convolutional neural networks." - Journal of Instrumentation 15.10(2020) P10005, AIS = 0.34
- [22]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "Search for dark matter towards the Galactic Centre with 11 years of ANTARES data" - Physics Letters B 805(2020)135439, AIS = 0.194

- [23]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "Search for neutrino counterparts of gravitational-wave events detected by LIGO and Virgo during run O2 with the ANTARES telescope" - The European Physical Journal C80(2020)1-9, AIS = 1.208
- [24]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "ANTARES and IceCube combined search for neutrino point-like and extended sources in the southern sky" - The Astrophysical Journal 892.2(2020)92, AIS = 1.581
- [25]. Ageron, M., **H. Branzas** et al. - "Dependence of atmospheric muon flux on seawater depth measured with the first KM3NeT detection units" - The European Physical Journal C80.2(2020)1-11, AIS = 1.208
- [26]. Solares, HA Ayala, **H. Branzas** et al. - "A search for cosmic neutrino and gamma-ray emitting transients in 7.3 yr of ANTARES and Fermi LAT Data" - The Astrophysical Journal 886.2(2019)98, AIS = 1.581
- [27]. Aiello, Sebastiano, **H. Branzas** et al. - "KM3NeT front-end and readout electronics system: hardware, firmware, and software" - Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems 5.4(2019)046001-046001, AIS = 0.43
- [28]. Aiello, Sebastiano, **H. Branzas** et al. - "Sensitivity of the KM3NeT/ARCA neutrino telescope to point-like neutrino sources" - Astroparticle Physics 111(2019)100-110, AIS = 1.563
- [29]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "ANTARES neutrino search for time and space correlations with IceCube high-energy neutrino events" - The Astrophysical Journal 879.2(2019)108, AIS = 1.581
- [30]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "Measuring the atmospheric neutrino oscillation parameters and constraining the 3+1 neutrino model with ten years of ANTARES data" - Journal of High Energy Physics 2019.6(2019)1-23, AIS = 1.408
- [31]. Albert, Arnaud, **H. Branzas** et al. - "Search for multi-messenger sources of gravitational waves and high-energy neutrinos with advanced LIGO during its first observing run, ANTARES, and IceCube" - The Astrophysical Journal 870.2(2019)134, AIS = 1.581
- [32]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "The search for high-energy neutrinos coincident with fast radio bursts with the ANTARES neutrino telescope" - Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 482.1(2019)184-193, AIS = 1.23
- [33]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "The cosmic ray shadow of the Moon observed with the ANTARES neutrino telescope" - The European Physical Journal C78(2018)1-9, AIS = 1.208

[34]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "Joint constraints on galactic diffuse neutrino emission from the ANTARES and IceCube neutrino telescopes" - The Astrophysical Journal Letters 868.2(2018)L20, AIS = 3.017

[35]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "Long-term monitoring of the ANTARES optical module efficiencies using  $^{40}\text{K}$  decays in sea water" - The European Physical Journal C78.8(2018)1-8, AIS = 1.208

[36]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "The Search for Neutrinos from TXS 0506+ 056 with the ANTARES Telescope" - The Astrophysical Journal Letters 863.2(2018)L30, AIS = 3.017

[37]. Aiello, S., **H. Branzas** et al. - "Characterisation of the Hamamatsu photomultipliers for the KM3NeT Neutrino Telescope" - Journal of Instrumentation 13.05(2018)P05035, AIS = 0.34

[38]. Bhandari, S., **H. Branzas** et al. - "The SURvey for Pulsars and Extragalactic Radio Bursts–II. New FRB discoveries and their follow-up" - Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 475.2(2018)1427-1446, AIS = 1.23

[39]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "All-flavor search for a diffuse flux of cosmic neutrinos with nine years of ANTARES data" - The Astrophysical Journal Letters 853.1(2018)L7, AIS = 3.017

[40]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "An algorithm for the reconstruction of neutrino-induced showers in the ANTARES neutrino telescope" The Astronomical Journal 154.6(2017)275, AIS = 1.581

[41]. Albert, Arnould, **H. Branzas** et al. - "Search for high-energy neutrinos from binary neutron star merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory" - The Astrophysical Journal Letters (2017), AIS = 3.017

[42]. Albert, A., **H. Branzas** et al. - "First all-flavor neutrino pointlike source search with the ANTARES neutrino telescope" - Physical Review D96.8(2017)082001, AIS = 1.108

**Total AIS (cumulative MoEDAL + KM3NeT + ANTARES) = 98.218**

## **Schimburi Săptămânale Pentru Experimentul ANTARES**

**02/06/2016 – 09/06/2016**

**16/02/2017 – 23/02/2017**

**30/07/2021 - 09/08/2021**

## **Schimburi Săptămânale Pentru Experimentul KM3NeT**

**31/07/2019 - 07/08/2019**

**06/04/2020 – 13/04/2020**

**31/03/2021 – 07/04/2021**

**26/10/2022 – 02/11/2022**

## **Discuții interne în cadrul colaborării MoEDAL**

(Februarie, 2021): “MadGraph5 and Gauss v49r17 data analysis” – H. Brânzaș;

(Martie, 2021): “MadGraph5 Cross Sections Update” – H. Brânzaș;

(Martie, 2021): “MadGraph5 Cross Sections in PbPb” – H. Brânzaș;

(Martie, 2021): “MadGraph5 Cross Sections in PbPb Update” – H. Brânzaș;

(Iulie, 2021): “MadGraph5 Cross Sections in PbPb Update” – H. Brânzaș;

(Ianuarie, 2023): “Magnetic Monopoles production în Pb-Pb collisions” – H. Brânzaș;

(Martie, 2023): “Magnetic Monopoles production în Pb-Pb collisions Update” – H. Brânzaș;

(Mai, 2023): “Magnetic Monopoles production în Pb-Pb collisions Update” – H. Brânzaș;

(Septembrie, 2023): “Magnetic Monopoles production în Pb-Pb collisions Update” – H. Brânzaș;

(Octombrie, 2023): “Magnetic Monopoles production în Pb-Pb collisions Update” – H. Brânzaș;

