

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

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

**De acord,**  
**DIRECTOR GENERAL**  
Dr. Nicolae Marius MARGINEAN  
**Avizat,**  
**DIRECTOR DE PROGRAM**  
Dr. Mihai RADU

### **RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI**

**Contractul nr.: 10N/2019**

**Proiectul: PN 19 06 01 03**

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

**Faza: nr. 8**

Programe de calcul pentru studiul unor observabile cu ajutorul modelelor fenomenologice la energii relativiste si ultrarelativiste (Partea I)

**Termen de încheiere a fazei: 9.12.2021**

#### 1. Obiectivul proiectului:

Cercetari teoretice si experimentale in descrierea materiei subatomice.

#### 2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:

Vor fi realizate comparatii ale predictiilor unor modele fenomenologice HIJING, PYTHIA, EPOS, PHOJET cu rezultatele analizelor multi-diferentiale ale distributiilor de impuls transvers ale hadronilor identificati, ale particulelor incarcate si ale corelatiilor de doua particule in interactia p+p la energiile LHC functie de multiplacitatea de particule incarcate, forma evenimentului si unghiul azimutal relativ la particula cu impulsul transvers cel mai mare dintr-un eveniment. Vor fi facute sistematici ale diferitelor observabile experimentale functie de energia de ciocnire in centrul de masa, densitatea de particule pe unitatea de rapiditate si unitatea de suprafata de interactie, densitatea de energie Bjorken, etc. folosind datele experimentale de la LHC si RHIC.

### 3. Obiectivul fazei:

Studiul performanțelor unor modele fenomenologice complexe în prezicerea distribuțiilor de impuls transversal în ciocniri la energii relativiste și ultrarelativiste și comparația cu datele experimentale existente. Influența dezintegrării rezonanțelor.

### 4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

Vor fi realizate programe de calcul pentru construirea de distribuții de moment transversal pentru particule constituite din cuarci ușori și studiul contribuției rezonanțelor, cu straniețate și multi-straniețate rezultate din analiza evenimentelor generate cu modele fenomenologice la energii relativiste și ultrarelativiste. Aceasta va ajuta la compararea rezultatelor experimentale obținute prin analiza de date de la experimentul ALICE cu prezicerile modelelor fenomenologice.

### 5. Rezumatul fazei:

#### **Introducere**

Cele mai importante experimente din zilele noastre presupun ciocnirea de particule la energii foarte mari. Cel mai faimos accelerator de particule este marele accelerator de hadroni (Large Hadron Collider-LHC) de la CERN, care se concentrează pe ciocniri proton-proton și ciocniri care implică ioni grei.

Deoarece spațiul stărilor finale este foarte mare, este imposibil să se determine funcția de distribuție a probabilității de reacție, atât prin experiment cât și la nivel teoretic.

Fenomenologia este o ramură a fizicii la energii relativiste și ultra-relativiste al cărei scop este acela de a umple golul dintre teorie și experiment. Un instrument important al fenomenologiei îl constituie generatorii de evenimente, care sunt folosiți pentru a simula ciocnirile dintre particule.

Pentru ciocnirile proton-proton două exemple de generatori de evenimente sunt PYTHIA și EPOS-LHC. Generatorii de evenimente simulează procesele care au loc când se ciocnesc două particule cu scopul de a reproduce structura evenimentelor observate de exemplu la LHC.

Aceste programe fac alegeri aleatorii în mai multe puncte în timpul simulării. Algoritmii care se bazează pe alegerea aleatorie sunt numiți algoritmi Monte Carlo (MC) și din acest motiv, generatorii de evenimente sunt numiți generatori Monte Carlo în comunitatea de specialitate. Cu ei se pot simula procese din fizica ciocnirilor la energii relativiste similare aceluia care au loc la LHC. Dar evenimentele sunt încă atât de complicate încât este imposibil să se compare direct rezultatele simulării cu rezultatele experimentale. În schimb, ne uităm la marimi construite numite observabile fizice. Generatorii de evenimente pot fi folosiți pentru a prezice funcțiile de distribuție ale acestor observabile și aceste distribuții măsurate experimental pot fi apoi comparate cu prezicerile. Este nevoie să fie generate evenimente și apoi să fie elaborate programe care să construiască observabilele fizice și funcția lor de

distribuite. Ca și în experiment, pentru a avea o statistica buna este nevoie de generarea și analiza a zeci de milioane de evenimente.

O întrebare particulară foarte actuală în fizica ciocnirilor relativiste este ce se întâmplă cu cuarcii în condiții extreme de temperatura și presiune. Paradigma dominantă actuală este că se formează o nouă stare a materiei numită Plasmă Quark-Gluon (QGP), unde hadronii se dizolvă și formează un mediu continuu de quarci și gluoni. Se crede că materia în univers a fost într-o stare QGP în primele momente după Big Bang, și ca poate apărea în mod natural în miezul stelelor neutronice. Unele experimente de fizică la energii înalte încearcă să creeze QGP pentru a-i studia proprietățile. Cel la care se accesează cea mai mare energie de ciocnire până în prezent este experimentul ALICE de la LHC. Acest experiment încearcă să creeze QGP prin ciocnirea ionilor grei. Dacă se formează QGP, în aceste condiții atât de violente aceasta se extinde, se răcește și se transformă înapoi în hadroni într-o fracțiune de miliardime dintr-o nanosecundă. Acest lucru face imposibil studiul direct, iar ipoteza QGP se bazează în schimb pe un număr de fenomene indirecte, denumite semnături QGP. Cu toate acestea, fenomenele considerate ca semnături QGP au fost observate nu numai în ciocnirile dintre doi ioni grei, dar și în cele dintre un proton și un ion greu, și chiar între doi protoni, caz în care condițiile nu sunt suficient de extreme. Există un efort în desfășurare pentru a încerca să se explice aceste observații în paradigma QGP. Pe de altă parte, există și abordări diferite care caută explicații alternative pentru aceste observații care să nu necesite formarea QGP. În acest context generatorii de evenimente menționați mai sus reprezintă cele două puncte de vedere.

## **Modele teoretice utilizate**

### Ciocniri proton-proton

#### *Modelul PYTHIA [1]*

Un eveniment PYTHIA standard este generat în trei pași: nivelul de proces, nivelul partonic și nivelul hadronic.

Nivelul de proces implică selectarea partonilor din hadronii care se ciocnesc pe baza funcțiilor lor de distribuție partonica (PDF) și simularea procesului inițial. În PYTHIA, procesele sunt clasificate ca „QCD soft” sau „QCD hard”. În timp ce „hard” în mod normal se referă la amplasarea transferurilor de impuls implicate, în acest context acești termeni se referă doar la modul în care este modelat evenimentul. Nivelul partonic implică corecțiile procesului „hard” și include interacțiunea multipartonica (MPI) rămășițele de fascicul, radiația de stare inițială și finală și reconectarea culorilor (CR). În cele din urmă, nivelul hadronic se ocupă cu hadronizarea, precum și cu efectele posthadronizării, cum ar fi dezintegrarea și reimprastierea (imprastierea multiplă) a hadronilor.

#### *Modelul EPOS-LHC [2]*

Modelul EPOS este un model core-corona, ceea ce înseamnă că sistemul format este construit dintr-o porțiune de miez densă și o coroană mai diluată. Starea inițială este modelată de formarea de „ladder”-uri de partoni (o reprezentare a MPI) care are ca rezultat câmpuri de culoare numite tuburi de flux, care nu sunt foarte diferite de „string”-uri din modelul PYTHIA. Miezul se formează în regiunile în care densitatea

de tuburi de flux este peste un anumit prag, în timp ce restul (de obicei limitat la regiunile periferice ale sistemului de ciocnire) alcătuiesc corona. Partea de miez se extinde hidrodinamic și în cele din urmă hadronizează prin hadronizare colectivă, în timp ce corona se va fragmenta prin fragmentare de „string”-uri. În EPOS-LHC nu a fost efectuată o hidrodinamizare completă spre deosebire de EPOS3 (încă în dezvoltare). În schimb, este utilizată o parametrizare pentru a simula „flow”-ul, care funcționează destul de bine pentru sistemele mici, dar ar trebui să fie folosit cu grijă în ciocniri ionilor grei. Particulele „soft” sunt puternic afectate de miez, în timp ce particulele „hard” supraviețuiesc într-o măsură mai mare și se vor fragmenta în jeturi. Hadronizarea în EPOS-LHC este implementată printr-o imagine micro-canonică, unde spațiul de fază este împărțit în grupuri care sunt portionate în pseudorapiditate. În fiecare cluster, hadronii sunt extrași dintr-un ansamblu micro-canonic cu o anumită probabilitate. În EPOS3, imaginea micro-canonică este înlocuită de un ansamblu grand-canonic, care oferă o imagine termică completă pentru hadronizarea în miez.

### Ciocnirile ionilor grei

#### *Structura de calcul hibrida TRAJECTUM [3]*

Codul este scris în C++ și încorporează calculul condițiilor inițiale, faza prehidrodinamică, fază hidrodinamică, și formarea de particule în interiorul unui singur executabil. În plus, pentru fiecare dintre aceste componente o clasa de bază specifică interfața cu care componenta comunică cu celelalte componente. În acest fel, devine posibil să existe mai multe versiuni pentru fiecare componentă, pe care utilizatorul le poate schimba după cum dorește. Interfața comună atunci garantează că, indiferent de alegerea făcută de utilizator, componenta va interacționa consistent cu celelalte. În plus, TRAJECTUM interoghează fiecare componentă aleasă care sunt parametrii necesari pentru a funcționa corect și verifică fișierul de parametri specificat de utilizator pentru a citi acești parametri. Conținutul de particule final servește ca exemplu al afirmației că toate componentele interacționează corect în mod automat. În implementarea curentă este posibilă alegerea pentru conținutul de particule final utilizarea codurilor UrQMD sau SMASH ca „afterburner”-i.

### **Rezultate**

Au fost generate peste 180 de milioane de evenimente cu codurile menționate mai sus. Pentru analiza acestora au fost elaborate programe de calcul pentru construirea observabilelor fizice teoretice necesare comparației cu datele experimentale existente. Studiul modului în care modelele fenomenologice descriu datele experimentale ne va ghida în îndeplinirea obiectivelor specifice din cadrul colaborărilor ALICE și CBM. Acestea sunt legate de comparația rezultatelor experimentale obținute în studii multi-diferențiale ale produsilor rezultați în ciocniri pp la energiile LHC, studiul sistematic al proprietăților de scalare ale hadronilor și precizarea unor observabile de interes la experimentul CBM. Datele experimentale folosite pentru comparație se găsesc în ref. [4-10]. Pentru ciocnirile proton-proton au fost alese date publicate ca funcție de multiplicitate folosind în special selectorul de multiplicitate VOM. Pionii, kaonii și protonii detectați în experiment nu sunt în

totalitate cei generati in procesul de hadronizare adica, particule primare. Distributiile de impuls transversal contin si particulele care provin din dezintegrarea rezonantelor care au un timp de viata foarte scurt. In incercarea de a cauta mecanismele care stau in spatele producerii acestor particule se analizeaza si observabile care deriva din distributiile de impuls transversal (randamentele de productie si impulsul transversal mediu) dar si parametrii care rezulta din potrivirea acestora cu formule inspirate de modele fenomenologice.

Modelul PYTHIA este folosit pe scara larga in analiza de fizica de la ALICE atat pentru corectarea datelor experimentale brute cat si pentru comparatia cu datele experimentale obtinute in final. In ultimii ani acest model a fost si este dezvoltat prin introducerea unor fenomene menite sa descrie observatii experimentale recente. Aceste mecanisme nu sunt luate in calcul implicit in model ci ele sunt activate prin selectarea unor optiuni atunci cand se face generarea de evenimente. Au fost testate cateva dintre aceste optiuni. Desi modelul a progresat substantial in ultimii ani pe linia descrierii fenomenelor observate in cazul ciocnirilor hadronice la energii relativiste comparatia detaliata cu datele poate sa dezvaluie slabiciunile modelului si sa conduca la imbunatatirea sa. In mod curent se fac comparatii cu modelul potrivit la un moment dat, in totalitatea multitudinii sale de parametri, pe o anumita cantitate de date experimentale existente, asa numitele « Tunes ». Exista mai multe variante ale acestor potriviri. In Fig. 1 a si b se poate vedea comparatia datelor experimentale cu prezicerile modelului plecand de la Tune6 (mijloc) fara reconectare de culoare (NCR-stanga) si cu noua schema de reconectare de culoare (CR-dreapta) in termeni de distributii de impuls transversal pentru particule incarcate rezultate in ciocniri pp la  $\sqrt{s} = 7$  TeV, randamente de productie a particulelor si impuls transversal mediu. Se poate vedea ca introducerea reconectarii de culoare imbunatateste acordul cu datele experimentale dar si ca orice mecanism nou introdus peste o « Tune » preexistenta poate necesita o repotrivire a parametrilor ceea ce este o operatiune dificila. In general, pentru aceasta varianta dar si mai departe se poate vedea ca potrivirea cea mai buna cu datele este pentru multiplicitati mari. Felul in care evenimentul teoretic este construit este foarte asemanator cu cel detectat experimental si permite urmarirea modului in care a fost generata particula, fie ea creata la hadronizare, particula primara, fie provenita din dezintegrarea unei rezonante. In figurile care contin distributii de impuls transversal liniile punctate reprezinta distributiile particulelor primare pentru fiecare multiplicitate. De asemenea randamentele de productie si impulsurile transversale medii pentru particulele primare sunt reprezentate cu rosu.

Mai multe incercari au fost facute pornind de la asa-numita potrivire Monash, Tune 14, care este frecvent folosita in colaborarea ALICE. Optiunile folosite au fost introduse separat, cate una, pentru a vedea efectul sau asupra potrivirii cu datele experimentale. Astfel au fost considerate : « rope hadronization » cu cele doua mecanisme : « string shoving » si « flavour ropes » care iau in considerare suprapunerile « string »-urilor in planul transversal, reamprastierea hadronilor si reamprastierea hadronilor combinata cu folosirea unui model termic in alegerea unei noi arome in procesul de fragmentare si producerea unui nou hadron dintr-un set de arome.

In Fig. 2 a,b se poate vedea comparatia intre Tune14 si Tune14 plus « flavour ropes » pentru ciocniri pp la energia  $\sqrt{s} = 7$  TeV. In ceea ce priveste distributiile de

impuls transversal acestea sunt descrise aproximativ similar, deosebirile fiind la nivel de detaliu și depinzând de multiplicitate. Se poate observa că dacă acordul randamentelor de producere de particule se îmbunătățește în cel de-al doilea caz, descrierea impulsului transversal mediu se înrăutățește.

În schimb, în Fig. 3 a,b se face comparația între Tune14 și Tune14 plus opțiunea de activare a remapastierii la nivel hadronic. Dacă la distribuțiile de impuls transversal comparația poate fi caracterizată ca și în exemplul anterior, efectul îmbunătățirii acordului cu datele experimentale se manifestă la impulsul transversal mediu pentru particula cea mai grea.

Ca o observație general valabilă modelul nu descrie bine datele la valori mici ale impulsului transversal.

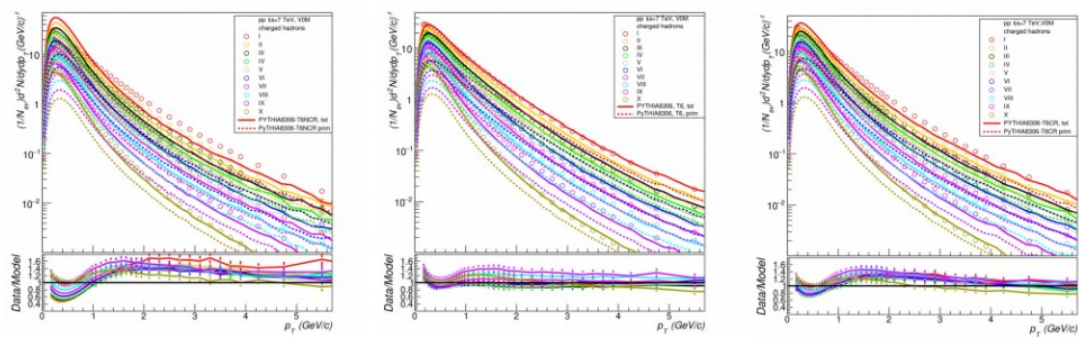


Fig. 1a

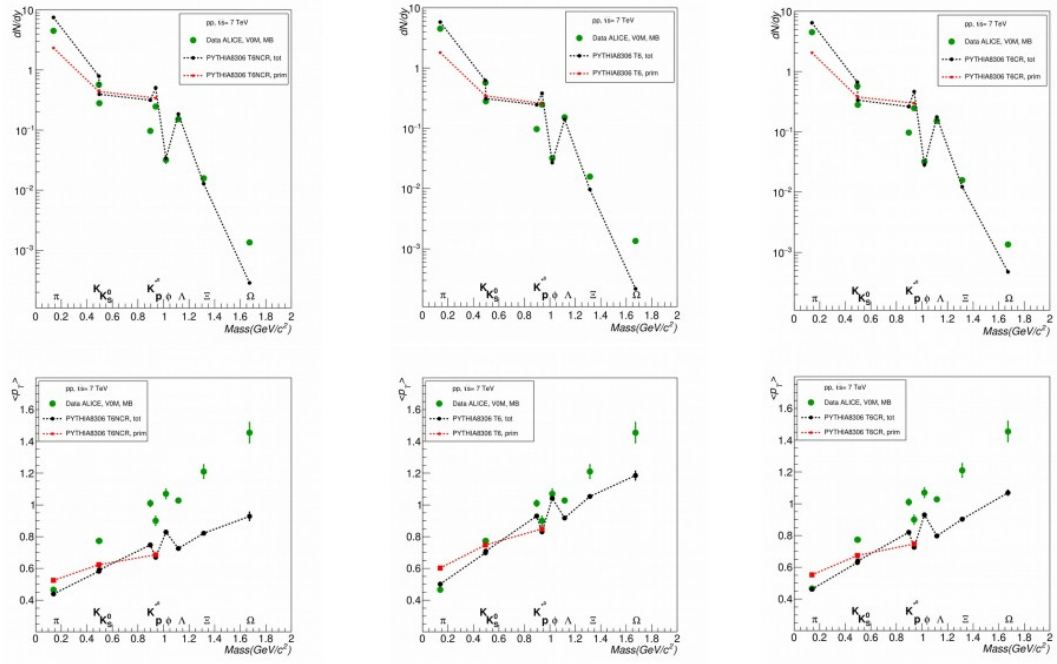


Fig.1b

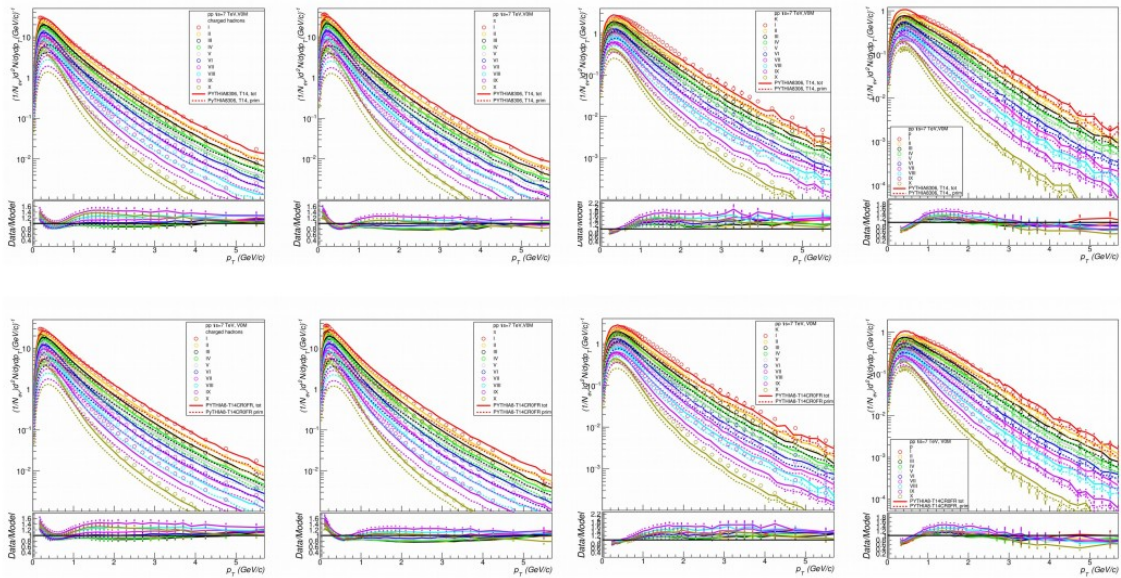


Fig. 2a

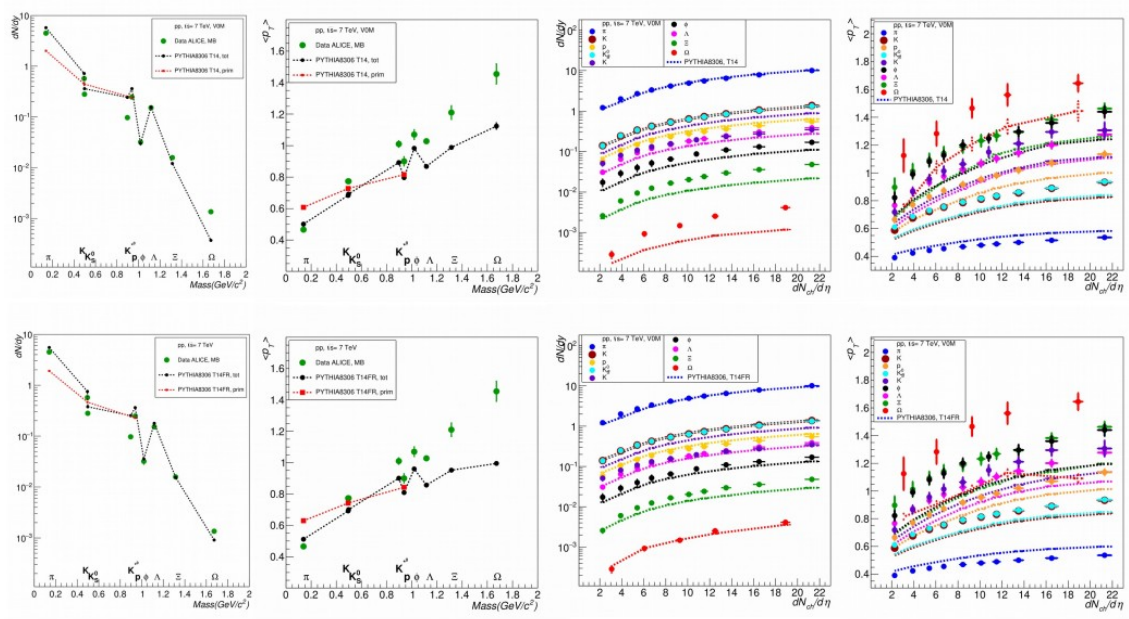


Fig. 2b

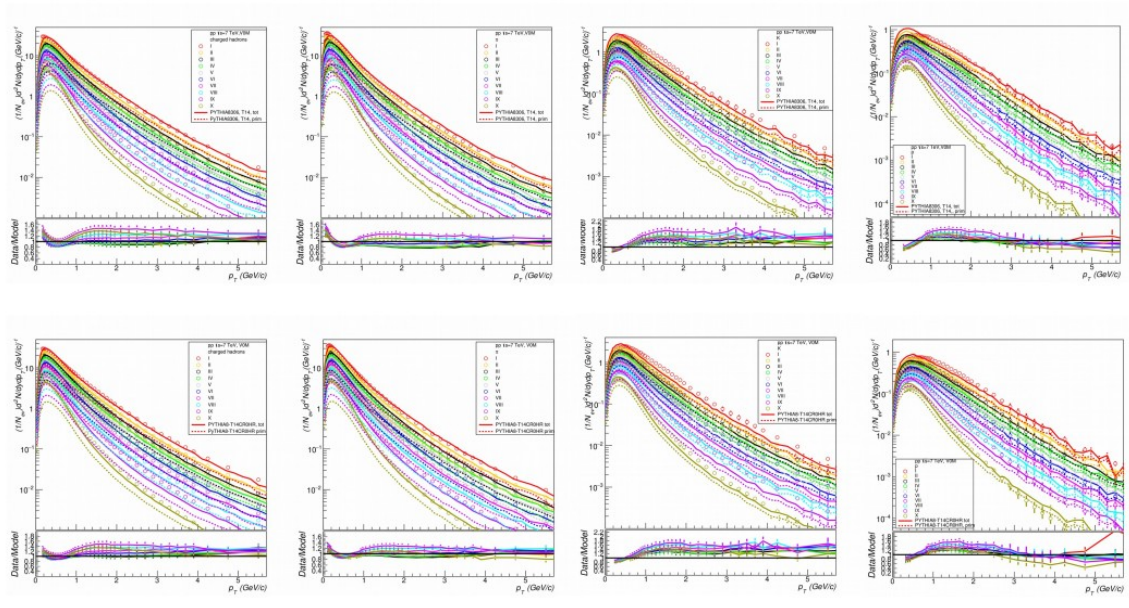


Fig. 3a



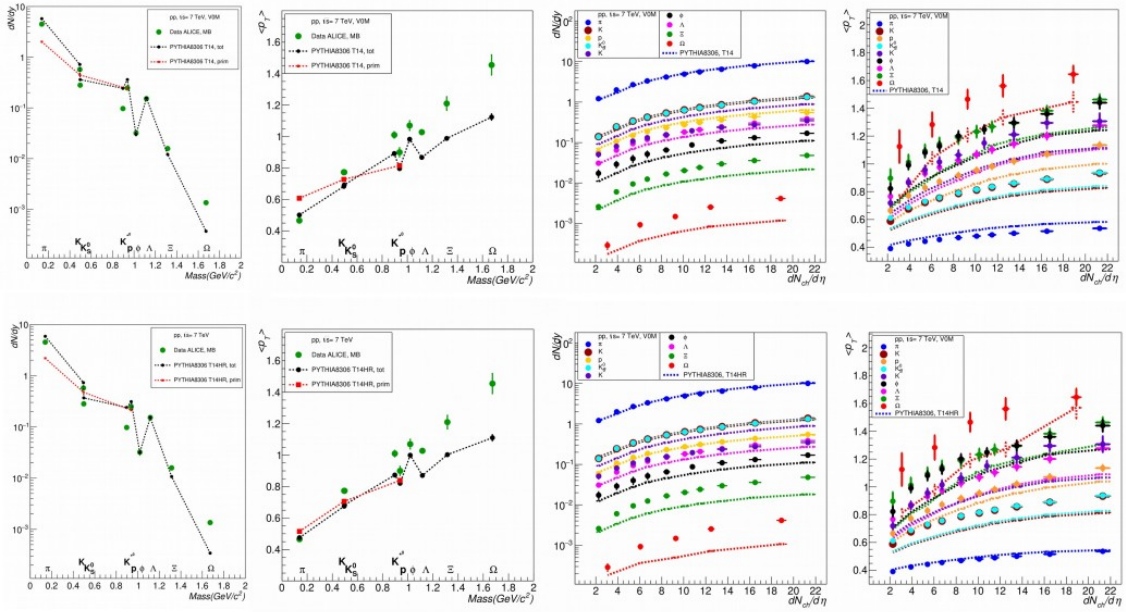


Fig. 3b

De asemenea au fost facute aceleasi tipuri de comparatii cu modelul EPOS-LHC. Pentru a vedea care este comportarea in functie de energia de ciocnire au fost comparate date experimentale de la energia  $\sqrt{s} = 13$  TeV cu prezicerile modelului Pythia8306 Tune14 si EPOS-LHC (Fig. 4 a,b). Aici a fost urmarita si prezicerea densitatii de particule incarcate in intervalul de pseudorapiditate  $|\eta| < 0.5$  in functie de selectorul de multiplicitate ales. Concordanta in comparatia dintre datele experimentale si cele doua modele este similara intre energiile de  $\sqrt{s} = 7$  si 13 TeV. In general, modelul EPOS-LHC descrie mai bine impulsul transversal mediu.

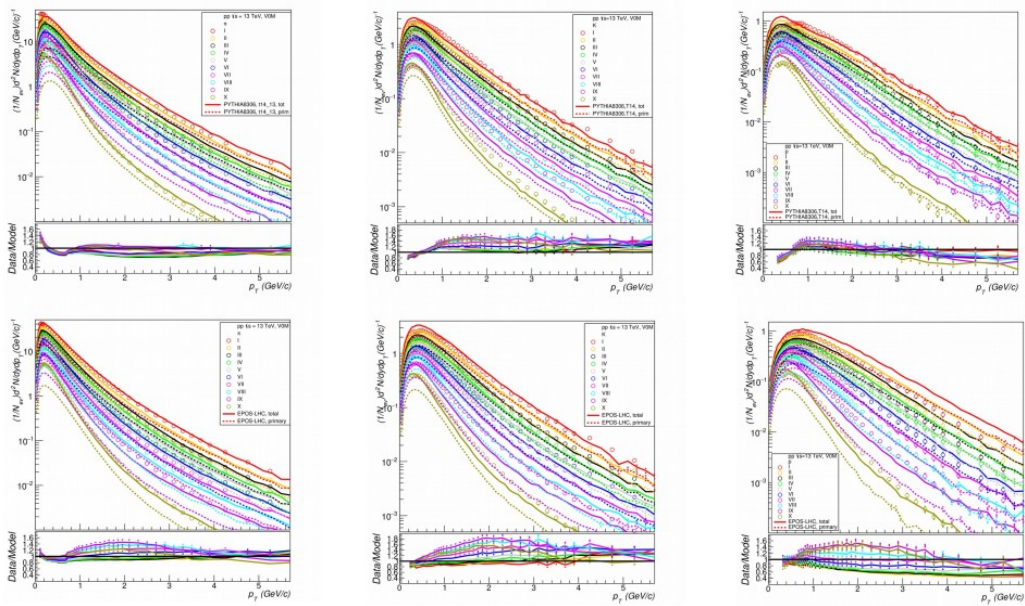


Fig. 4a

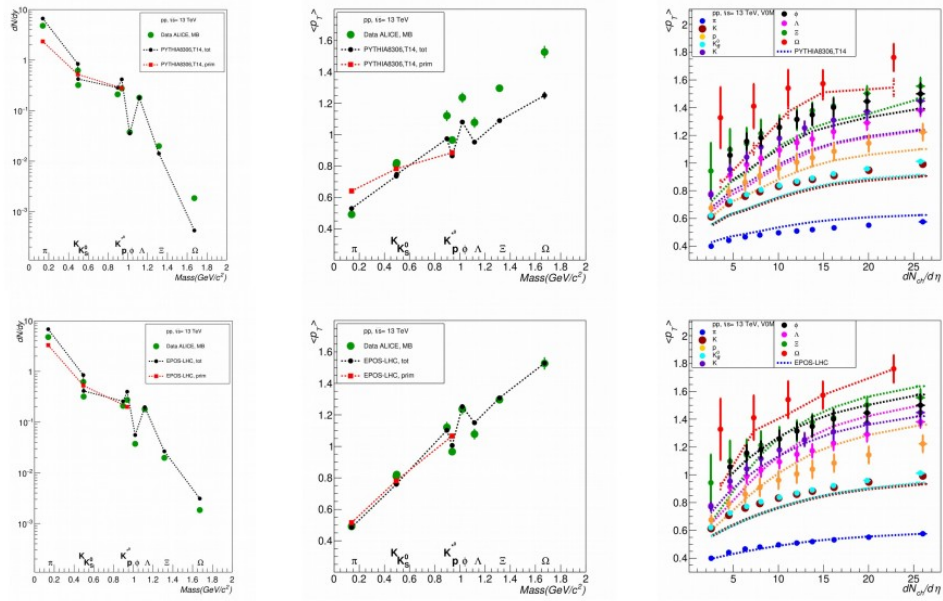


Fig. 4b

In Fig. 5 a,b se arata parametri rezultati din potrivirea simultana a distributiilor de impuls transversal ale pionilor, kaonilor si protonilor, pentru ciocniri pp la energiile de  $\sqrt{s} = 7$  si 13 TeV, cu formula data de modelul Boltzmann Gibbs Blast Wave pentru doua seturi de limite in impuls transversal si comparatia cu parametrii obtinuti din date experimentale. Rezultatele obtinute din datele experimentale sunt aratate alaturat pentru ca atata timp cat modelele nu pot descrie perfect datele comparatia nu se poate face decat calitativ.

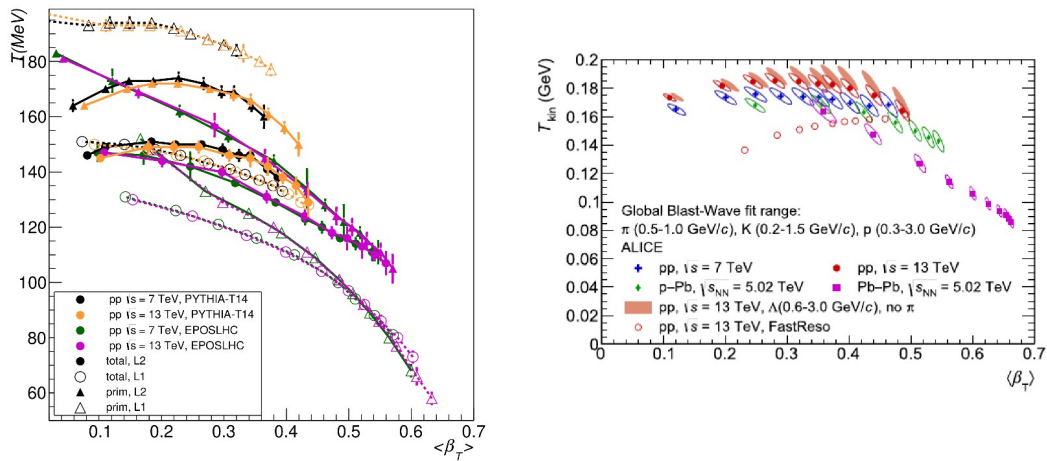


Fig. 5a

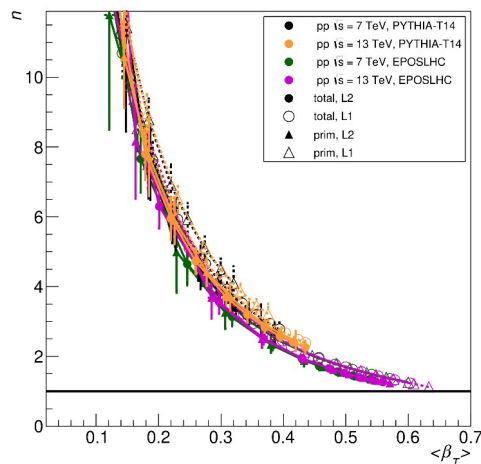


Fig. 5b

In reprezentarea temperatura (T) -viteza de expansiune transversala medie ( $\langle \beta_T \rangle$ ), modelul PYTHIA este mai apropiat calitativ de datele experimentale pentru ca prezice comportarea plata in T atat pentru potrivirea simultana pe pioni, kaoni si protoni totali cat si pentru particulele primare. EPOS-LHC da o comportare specifica ionilor grei cu o dinamica mai extinsa si caracteristica modelelor hidrodinamice. Totusi valorile temperaturii nu corespund acelor din datele experimentale si sunt mai mari pentru particulele primare decat pentru cele totale spre deosebire de experiment. Pentru parametrul formei profilului vitezei de expansiune transversala, n, acesta scade cu viteza de expansiune transversala medie si ramane la valori mai mari decat 1 ca si in cazul datelor experimentale.

In cazul ionilor grei s-a facut comparatia cu datele experimentale pentru distributiile de impuls transversal ale pionilor, kaonilor si protonilor obtinute in ciocnirile Pb-Pb la energiile de  $\sqrt{s} = 2.76$  si  $5.02$  TeV (Fig. 6). Se poate observa acordul bun cu datele experimentale la centralitati mari, ceea ce selecteaza codul TRAJECTUM ca un candidat bun in studii ulterioare.

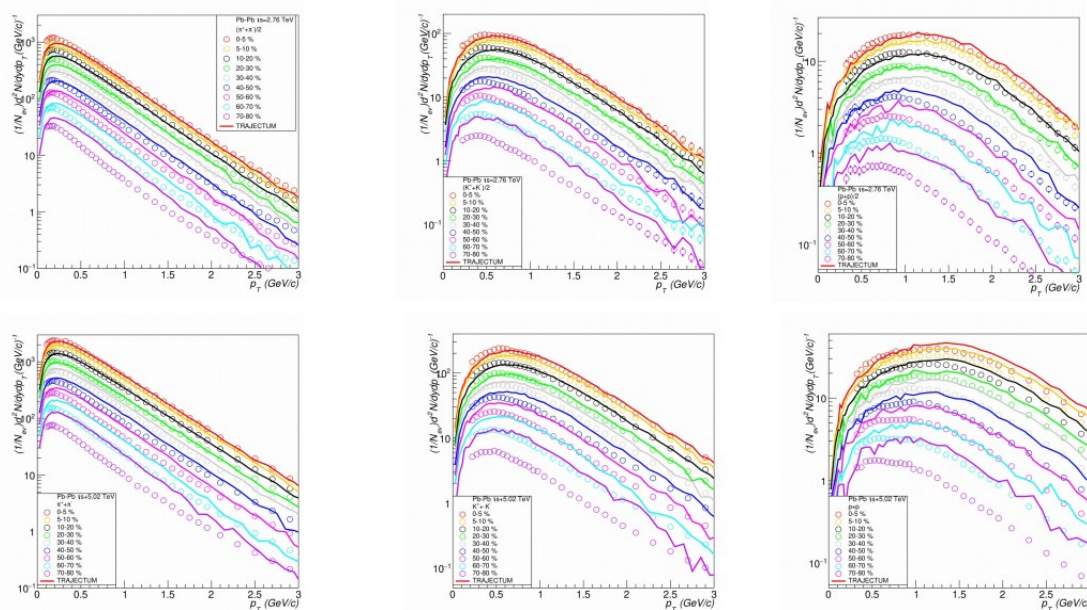


Fig. 6

Au fost facute calcule de distributii de impuls transversal pentru pioni, kaoni si protoni cu modelele JAM [11] si UrQMD [12] in ciocniri Au-Au la energia de 10 AGeV. Acestea au fost folosite ca argumente in favoarea promovarii TRD-2D, dezvoltat in departamentul nostru, in cadrul colaborarii CBM pentru studii unde este importanta regiunea de impuls transversal mic.

## Concluzii

A fost generat un numar mare de evenimente in cadrul modelelor PYTHIA8, versiunea cea mai noua 8306, cu diferite optiuni, EPOS-LHC, TRAJECTIONS, JAM si UrQMD pentru a face comparatia cu distributii de impuls transversal masurate experimental in ciocniri pp la energiile  $\sqrt{s} = 7$  si 13 TeV si Pb-Pb la energiile  $\sqrt{s} = 2.76$  si 5.02 TeV si preziceri pentru Au-Au la 10 GeV/A. In acest context a fost investigata contributia dezintegrarii rezonantelor in aceste distributii. In aceste conditii au rezultat urmatoarele concluzii :

- modelul PYTHIA8 cu diferite optiuni descrie destul de bine datele experimentale dar sunt necesare comparatii mai detaliate pe date rezultate din studii multi-diferentiale. Dificultatea consta in potrivirea unei multitudini de parametri in conditiile in care este nevoie sa fie generat un numar foarte mare de evenimente, mai ales in cazul observabilelor diferentiale care necesita o statistica buna, pentru a trage concluzii corecte.
- modelul EPOS-LHC sau orice model de tip hidrodinamic trebuie de asemenea utilizat pentru o comparatie care sa evidentieze diferentele intre ipotezele fizice al diferitelor modele pe drumul gasirii unei descrieri convingatoare si unitare a fenomenelor care au loc la ciocniri relativiste.

- structurile teoretice complexe de tip hibrid sunt foarte promitatoare in descrierea datelor experimentale dar folosirea lor nu e triviala pentru ca trebuie cunoscute si manipulate multe tipuri de modele teoretice.
- Studiul influentei dezintegrării rezonantelor asupra distributiilor de pioni, kaoni si protoni prin modele teoretice arata calitativ ca acestea pot sa explice comportarea datelor experimentale, dar cantitativ poate exista o diferenta. Dificultatea consta in faptul ca modelul trebuie sa descrie foarte bine datele experimentale de la care sa porneasca o indicatie cantitativa corecta asupra contributiei rezonantelor.

## **Bibliografie**

- [1] T. Sjostrand si al., Comp. Phys. Comm. 191(2015)159
- [2] T. Pierog si al., Phys. Rev. C92(2015)034906
- [3] G. Nijss si al., Phys. Rev. C103(2021) 054909
- [4] Colaborarea ALICE, Eur. Phys. J. C (2012) 72:2183
- [5] Colaborarea ALICE, Phys. Rev. C88 (2013) 049910
- [6] Colaborarea ALICE, Eur. Phys. J. C (2015) 75:226
- [7] Colaborarea ALICE, Phys. Rev. C99 (2019) 024906
- [8] Colaborarea ALICE, Eur. Phys. J. C (2020) 80:167
- [9] Colaborarea ALICE, Eur. Phys. J. C (2020) 80:693
- [10] Colaborarea ALICE Phys. Rev. C101 (2020) 044907
- [11] Y. Nara si al., Eur. Phys. J (2018) A50:1
- [12] J.C. Bleicher si al., J. Phys. G (1999) 325:1859

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

Rezultatele si concluziile fazei actuale au fost descrise in rezumat. In continuare este nevoie de extinderea catre detalii in comparatia cu datele experimentale si folosirea puterii de predictie a modelelor in cadrul unor studii sistematice. Aceste aspecte sunt avute in vedere in faze ulterioare ale proiectului. Extinderea catre alte modele teoretice se va lua de asemenea in considerare.

Obiectivul acestei faze a fost realizat integral.

Responsabil proiect

*Prof. Dr. Mihai Petrovici*