

Raport științific

privind implementarea proiectului în perioada ianuarie – decembrie 2014

(max 5 pagini)

Pentru perioada menționată obiectivul din cadrul proiectului a fost cel notat cu O3, având ca titlu **Obținerea de noi rezultate experimentale privind "freeze-out"-ul chimic în ciocnirile Au-Au, Cu-Cu și p-p la energiile disponibile la RHIC**. Tema este în acord cu obiectivele majore ale celor mai importante programe de Fizică nucleară relativistă și ultrarelativistă aflate în derulare, cum sunt cele de la RHIC-BNL și LHC-CERN, sau în pregătire, cum sunt cele de la FAIR-GSI și NICA-IUCN, și anume: explorarea diagramei de fază a materiei nucleare în conexiune cu investigarea deconfinării și a restaurării simetriei chirale.

Principalele activități derulate pentru atingerea scopurilor științifice ale proiectului în cadrul acestui obiectiv, care sunt în strânsă corelare cu activitățile desfășurate în anul anterior. În anul 2014 activitatea majoră a fost axată pe „Realizarea de noi simulări folosind cele mai bune coduri de simulare (AMPT, UrQMD) pentru experimentul CBM la acceleratorul FAIR”. S-au considerat două direcții de lucru, și anume: (i) **Selectarea pozițiilor detectorilor în experimentul CBM**, (ii) **Simulări cu diferite coduri și compararea cu rezultatele experimentale obținute în experimentul BRAHMS**.

Tranziția de la un sistem format din cuarci și gluoni deconfinăți la un sistem format din hadroni poate fi reflectată de diferite valorile unor mărimi fizice de interes, de distribuțiile lor, precum și de fluctuațiile asociate acestora, cu deosebire în ordinele superioare și cumulanți. Este de așteptat ca fluctuațiile mari în numărul de barioni și în sarcinile electrice asociate să dea indicații asupra unei astfel de tranziții. De asemenea, dependențele acestor mărimi și ale fluctuațiilor lor de energiile de interacție ale ionilor grei pot indica realizarea unor tranziții de fază. În aceste condiții este important ca aranjamentul experimental folosit să fie capabil să dea informații de încredere asupra centralității ciocnirii și a ratelor de producere pentru diferite tipuri de particule, precum și a caracteristicilor cinematice. Toate acestea vor permite obținerea de informații de încredere asupra dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste la energiile disponibile la FAIR-GSI, precum și a tipurilor de tranziții de fază în materia nucleară fierbinte și densă formată.

Este important de subliniat faptul că preocupările din acest an pe problema **selectării pozițiilor detectorilor în experimentul CBM** sunt o continuare a celor din anii anteriori (Centrality determination in 15 GeV/u Au-Au collisions in CBM Experiment – Valerica Baban, Alexandru Jipa, Cătălin Ristea, Oana Ristea et al – Romanian Reports in Physics 65(4)(2013)1314-1320, Identified particle production in nuclear collisions at relativistic energies – Oana Ristea, Elena Giubega, Alexandru Jipa et al - Romanian Reports in Physics 65(2)(2013)411-410; Valerica Baban, Alexandru Jipa - Centrality determination in heavy-ion collisions - The 13th International Balkan Workshop on Applied Physics, 4-6 July 2013, Constanța, Romania, poster etc). Ele sunt, de asemenea, o completare a preocupărilor care au condus la investigații de acest tip pe baza datelor experimentale obținute în Experimentul BRAHMS de la RHIC-BNL.

În continuarea preocupărilor anterioare de a încerca descrierea dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste folosind metode bazate pe folosirea conceptului de haos, s-a încercat să se analizeze modul în care producerea de particule este reflectată de distribuția de rapiditate, având în vedere faptul că această mărime, rapiditate, este o măsură a convertirii mișcării longitudinale a sistemelor nucleare care se ciocnesc în mișcarea transversală a particulelor generate în procesul de interacție a celor două sisteme nucleare (nuclee).

S-a pornit de la introducerea exponentului Lyapunov multidimensional, definit prin relația de mai jos

$$L = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{d(t)}{d(0)} = \lim_{t \rightarrow \infty} L(t),$$

unde $d(t)$ reprezintă distanța în spațiul fazelor dintre cele două sisteme

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[(\vec{r}_{i1} - \vec{r}_{i2})^2 + (\vec{p}_{i1} - \vec{p}_{i2})^2 \right]}$$

unde r_{i1}, p_{i1} , sunt poziția, respectiv, impulsul particulei i din primul sistem, iar r_{i2}, p_{i2} , sunt coordonatele analoge în cel de al doilea sistem. Deoarece structura sistemului de mai multe corpuri se poate modifica în timp, pentru aplicarea relației anterioare trebuie făcută pentru anumite condiții. În locul căii „globale”, care presupune calcularea distanței cu ajutorul relației de mai jos:

$$d = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \vec{r}_{i1} - \sum_{i=1}^{n_2} \vec{r}_{i2} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n_1} \vec{p}_{i1} - \sum_{i=1}^{n_2} \vec{p}_{i2} \right)^2}$$

s-a propus o altă cale. Aceasta implică o metodă intuitivă. Pentru un constituenț format din mai multe corpuri se consideră setul următor:

$$M_i = \left\{ x_i(t), y_i(t) \left| \frac{dp_{x_i}}{dt}(t) = 0 \vee \frac{dp_{y_i}}{dt}(t) = 0 \right. \right\}.$$

Acest set permite definirea unei „hărți de clusterizare” $M = \bigcup_{i=1}^n M_i$. Prin folosirea acestei metode se poate obține o

„proiecție bidimensională” a tuturor cluster-ilor creați în interiorul sistemului. Programul de calcul asociat caută toate punctele în care se schimbă derivatele asociate. Pentru descrierea formării fragmentelor sau rezonanțelor barionice sau mezonice, unele particule libere pot fi excluse din sistem. În plus, pe lângă condiționările legate de legea conservării energiei totale, a fost propus un test care să dea o măsură a preciziei/acurateții simulării. Astfel, pentru simulări obișnuite se poate considera și procese inverse. Astfel, se poate compara starea inițială a sistemului considerat și starea finală pentru procesul inversat, folosind distanța în spațiul fazelor definită anterior. În acest fel se crește gradul de încredere în predicțiile pentru procesele simulate. Din punctul de vedere al metodelor folosite este importantă implementarea unei funcții Lyapunov structural care permite luarea în considerare a evoluției temporale.

Pe lângă aplicarea metodei la datele obținute în diferite simulări pentru ciocniri nucleu-nucleu la energiile care vor fi disponibile la FAIR-GSI, s-a aplicat pentru ciocniri simetrice, la energii compatibile cu energiile de la FAIR-GSI, ciocniri pentru care există rezultate experimentale. Una dintre ciocnirile alese este cea de tip C-C la 4,5 A GeV/c. Astfel de ciocniri au fost realizate la Sincrofazotronul U-10 de la IUCN Dubna, în cadrul Colaborării SKM 200. Pentru realizarea simulărilor s-a considerat că nucleele care se ciocnesc sunt reprezentate de două seturi distincte de nucleoni plasate, inițial, într-o rețea cubică, cu marginile situate la distanțe egale cu raza nucleului $r = r_0 A^{1/3}$. Ținta este, inițial, în repaus, iar impulsurile constituenților sistemului incident pot fi specificate ca niște parametrii. Pentru simplificare, a fost neglijată contracția Lorenz. A fost folosită o groapă de potențial de tip Yukawa, de adâncime finită, la care au fost adăugați alți doi termeni, și anume: un termen coulombian și un termen repulsiv, specific interacției tari, de distanță scurtă ($V_0 = 35$ MeV, $a = 2$ Fm, $k = 200$). Rezultatele obținute, împreună cu cele experimentale, sunt incluse în Fig.1. Se poate observa că modelul propus descrie foarte bine distribuția unghiulară și, în consecință, distribuția de pseudorapiditate. Există unele discrepante cantitative în descrierea distribuțiilor de energie și impuls.

Având în vedere relația de definiție a rapidității, și anume: $y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_L}{E - p_L}$, se poate observa atenuarea acestora

pentru distribuția de rapiditate. Comportări similar s-au observat și pentru alte ciocniri nucleare la diferite energii. Aceste observații au permis introducerea de noi ipoteze în codul de simulare bazat pe haos, ceea ce a mărit concordanța dintre rezultatele experimentale și predicțiile codului (I.V.Grossu et al – Computer Physics Communications 185(1)(2014)1339-1342, I.V.Grossu et al – Computer Physics Communications 185(11)(2014)3059-3061). Aceste rezultate au fost folosite pentru analizele propuse, fiind publicate sau prezentate la diferite conferințe naționale și internaționale. Exemple în acest sens sunt incluse la sfârșitul raportului.

Așa cum s-a menționat la începutul raportului, o altă direcție de interes a fost cea legată de realizarea unor simulări cu diferite coduri și compararea cu rezultatele experimentale obținute în experimentul BRAHMS.

La realizarea acestor simulări s-au avut în vedere mai multe aspecte. S-a pornit de la faptul că majoritatea rezultatelor experimentale de până acum indică diferite tipuri de comportare hidrodinamică a materiei nucleare fierbinți și dense formată în regiunea de suprapunere a nucleelor care se ciocnesc. De asemenea, la selectarea rezultatelor s-a luat în considerare strânsa conexiune a m[rimilor fizice de interes cu energia totală disponibilă în sistemul centrului de masă (SCM), geometria ciocnirii, domeniul de rapiditate și natura particulei. De aceea, pe lângă, rezultatele experimentale directe, grupul a considerat necesară luarea în considerare a unor simulări pentru alte ciocniri și energii totale disponibile în SCM și începerea creerii unor baze de date și a unor căi de analiză a unor astfel de date, cu luarea în considerare a structurii detectorilor și a tipurilor de semnale care se pot obține. Acest lucru este important, având în vedere faptul că dependența de domeniul de rapiditate este în strânsă legătură cu numărul de participanți și producerea de particule. Există o gamă largă de metode care permit investigarea acestui tip de comportare. De exemplu, o variantă este cea care presupune decompunerea regiunii participante, extrem de dense, prin „explozie” și formarea unei unde de șoc. Astfel, prin fit-area spectrelor de impuls transversal pentru particulele cu sarcină detectate, cu funcțiile care descriu evoluția unde de șoc, cu luarea în considerare a faptului că emisia fiecărui tip de particulă – în cazul experimentului considerat pioni, kaoni și protoni – se face, cu o anumită probabilitate, preponderent la momente diferite din evoluția regiunii participante, deci la diferite temperaturi și densități ale acesteia, s-au obținut parametrii pentru „înghețul” cinetic.

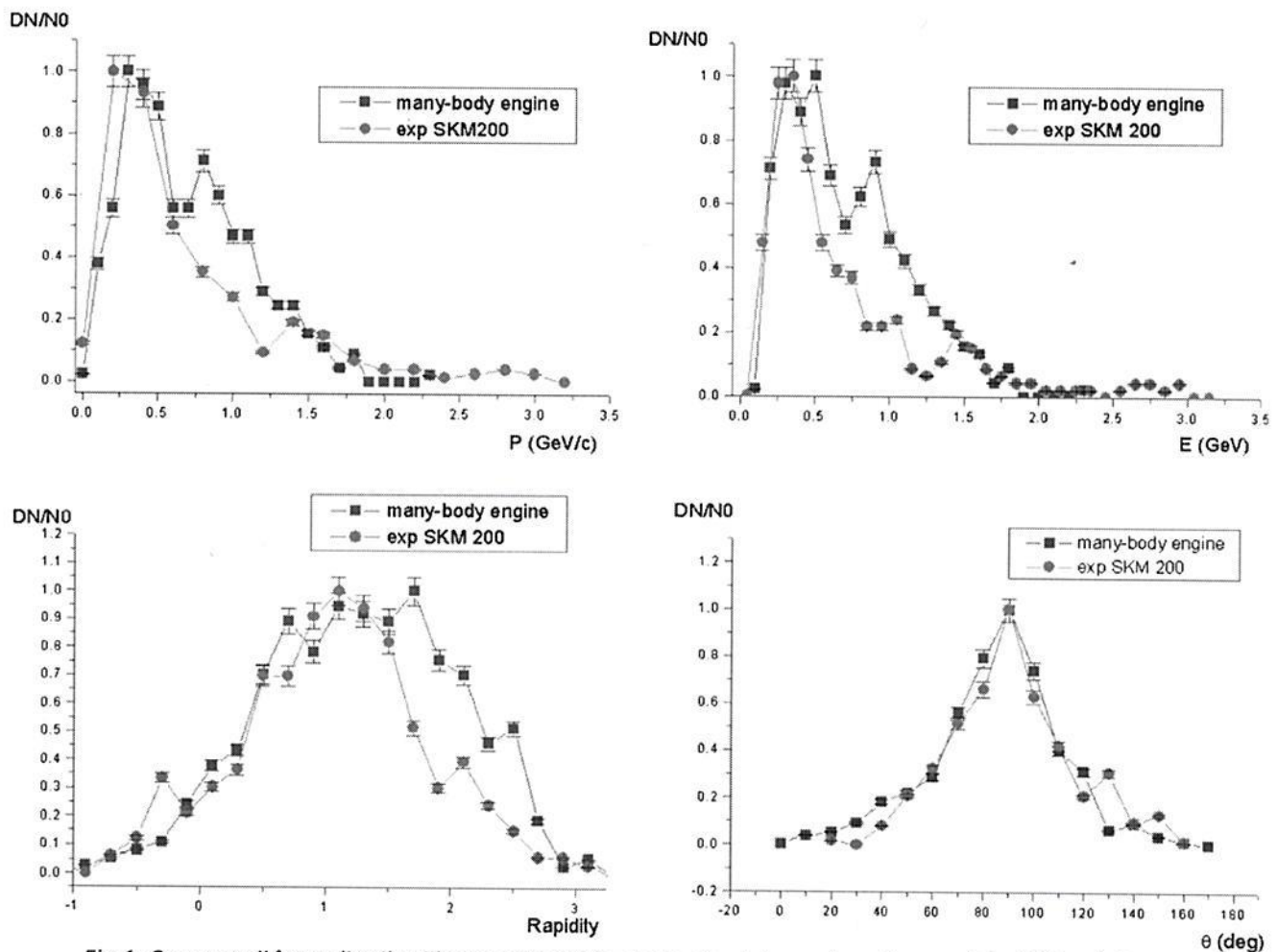


Fig.1. Comparații între distribuțiile experimentale și cele simulate pentru câteva mărimi fizice de interes (energie, impuls, rapiditate și unghi de emisie) pentru ciocniri C-C la 4,5 A GeV/c

Unul dintre codurile cele mai folosite pentru descrierea dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste este cel de dinamică moleculară cuantică ultrarelativă, cu acronimul UrQMD (Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics (UrQMD)). Acesta este un model de transport și permite efectuarea de simulări pentru descrierea dinamicii ciocnirilor ionilor grei de la energiile disponibile la SIS-18 (GSI) până la energiile la RHIC (BNL) și chiar, cu numeroase precauții, pentru energiile disponibile la LHC (CERN). Cu ajutorul acestui cod se pot studia numeroase procese fizice de interes, de la multifragmentare și curgere colectivă, la producere de particule și corelații în producerea de particule. Dacă sunt luate în considerare procese de împrăștiere tari, în acord cu Cromodinamica cuantică perturbativă, modelul include rutine de tip PYTHIA, propuse de grupul de la Universitatea din Lund (Suedia). Bazele fizice ale modelului sunt date în lucrările următoare: (i) Microscopic Models for Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions - S. A. Bass, M. Belkacem, M. Bleicher, M. Brandstetter, L. Bravina, C. Ernst, L. Gerland, M. Hofmann, S. Hofmann, J. Konopka, G. Mao, L. Neise, S. Soff, C. Spieles, H. Weber, L. A. Winkelmann, H. Stöcker, W. Greiner, C. Hartnack, J. Aichelin and N. Amelin - *Prog. Part. Nucl. Phys.* **41** (1998) 225–370; (ii) Relativistic Hadron-Hadron Collisions and the Ultra-Relativistic Quantum Molecular Dynamics Model (UrQMD) - M. Bleicher, E. Zabrodin, C. Spieles, S.A. Bass, C. Ernst, S. Soff, H. Weber, H. Stöcker and W. Greiner - *J. Phys.* **G25** (1999), 1859–1896. Analiza comportării hidrodinamice a materiei nucleare a fost inițiată în lucrarea Fully integrated transport approach to heavy ion reactions with an intermediate hydrodynamic stage - H. Petersen, J. Steinheimer, G. Burau, M. Bleicher and H. Stöcker - *Phys. Rev. C* **78** (2008) 044901. De la începuturile modelului a fost investigată posibilitatea conexiunii comportării hidrodinamice a materiei nucleare cu tranziții de fază în material nucleară fierbinte și densă, cu deosebire cu plasma de cuarci și gluoni ((a) Relativistic hydrodynamics for heavy ion collisions. 1. General aspects and expansion into vacuum - D. H. Rischke, S. Bernard and J. A. Maruhn - *Nucl. Phys. A* **595** (1995) 346; (b) Relativistic hydrodynamics for heavy ion collisions. 2. Compression of nuclear matter and the phase transition to the quark - gluon plasma - D. H. Rischke, Y. Pursun and J. A. Maruhn - *Nucl. Phys. A* **595** (1995) 383).

Un alt cod de simulare folosit tot mai des pentru descrierea comportării materiei nucleare înalt excitată și dense este bazat pe un model de transport multi-fază pentru ciocniri nucleare relativiste (Zi-Wei Lin, Che Ming Ko et al - *Phys. Rev. C* **72** (2005) 064901, B.B.Back, M.D.Baker, M.Ballintijn, D.S.Barton, B.Becker, R.R.Betts, A.A.Bickley, R.Bindel

et al - Nucl. Phys. A 757(2005)28). Codul de simulare, cu acronimul AMPT (A Multi-Phase Transport model), este bazat pe un model mixt care ia în considerare atât faza hadronică, cât și faza partonică. Codul folosește codul HIJING (Heavy Ion Jet Interaction Generator) pentru generarea condițiilor inițiale, codul ZPC (Zhang's Parton Cascade) pentru modelarea împrăștiilor partonice. De asemenea, acest cod mai conține, pentru descrierea procesului de hadronizare, componente ale modelului Lund pentru fragmentarea corzilor sau ale modelului de „fuzionare”/coalescență a cuarurilor. Pentru tratatarea împrăștiilor hadronice se folosește un model de transport de tip relativist (ART – A Relativistic Transport model). Se obține astfel o descriere coerentă a dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste. Modelul permite estimarea unui set larg de parametrii. Trebuie subliniat faptul că rezultatele prevăzute de model (cod) depind puternic de parametrii de intrare folosiți. Modelul este extrem de util pentru obținerea de informații asupra proprietăților materiei nucleare înalt excitată și dense formate în ciocniri nucleare relativiste și ultra-relativiste. Codul de simulare AMPT există în două variante, și anume: o variantă de bază – notată AMPT - și o variantă bazată pe teoria corzilor - care ia în considerare „topirea” acestora. Condițiile inițiale diferă ușor pentru cele două variante ale codului. Ceea ce este important de subliniat este faptul că acest cod – prin cele două variante - permite luarea în considerare a numeroase aspecte specifice dinamicii ciocnirilor nucleare relativiste, de la forma distribuțiilor de rapiditate la curgerea eliptică și producerea de particule cu arome „grele” („farmec”/„charm” și „frumusețe”/„beauty” („bottom”). De aceea, pentru descrierea unor rezultate recente este tot mai folosit (de exemplu: Md.Nasim, B.Mohanty, Nu Xu – Phys.Rev.C87(2013)014903 – Elliptic flow of ϕ mesons as a sensitive probe for the onset of the deconfinement transition in high energy heavy ion collisions, Xie Yi-Long et al – Nucl.Phys.A920(2013)33-44 – Scaling properties of multiplicity fluctuations in heavy-ion collisions simulated with AMPT model etc).

Pentru această etapă s-au făcut simulări cu ambele tipuri de coduri. S-a început compararea cu rezultatele experimentale obținute în ciocniri Au-Au la energiile disponibile la RHIC-BNL.

În Tabelul I sunt incluse datele simulate cu codul UrQMD pentru ciocniri Au-Au la câteva dintre energiile disponibile în prezent la RHIC-BNL, respectiv, la energiile care vor fi disponibile la SIS-100 și SIS-300 la FAIR-GSI.

| Ciocnirea | Energia | Nr. evenimente |
|-----------|-----------------------------------|----------------|
| Au-Au | $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ | 10000 |
| Au-Au | $\sqrt{s_{NN}} = 62 \text{ GeV}$ | 10000 |
| Au-Au | $p_{SL} = 25 \text{ AGeV}/c$ | 42000 |
| Au-Au | $p_{SL} = 11 \text{ AGeV}/c$ | 100000 |
| Au-Au | $p_{SL} = 5 \text{ AGeV}/c$ | 100000 |
| Au-Au | $p_{SL} = 2 \text{ AGeV}/c$ | 100000 |

Tabelul I Simulări de interes cu codul UrQMD

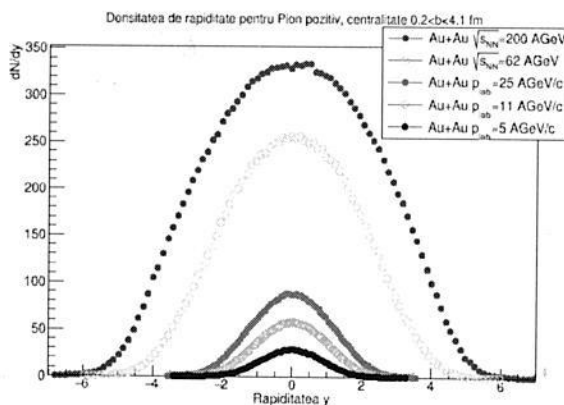


Fig.2. Distribuția de rapiditate a pionilor pozitivi

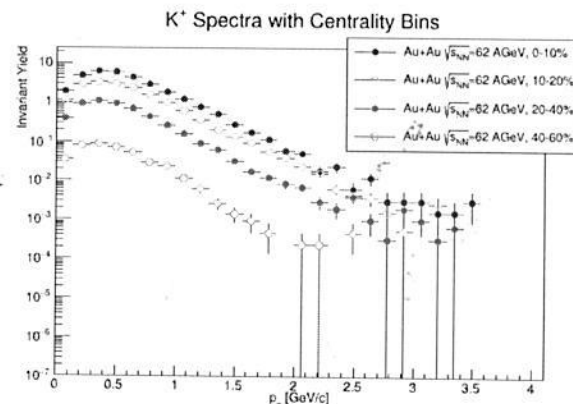


Fig.3. Distribuția de impuls transversal a kaonilor pozitivi

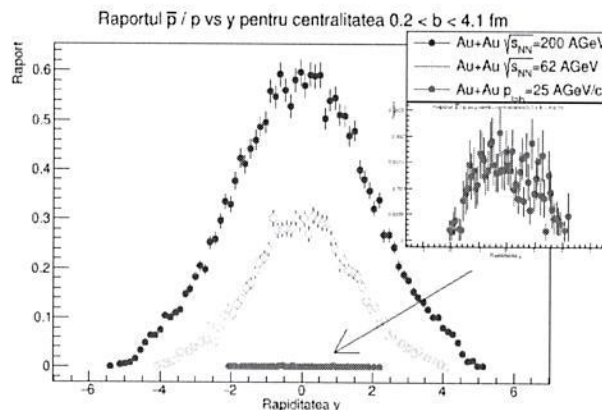


Fig.4. Distribuția raportului antiproton/proton, pentru diferite energii, în funcție de rapiditate

Câteva dintre rezultatele de interes obținute sunt incluse în raport. Astfel, în Fig.2. sunt prezentate distribuțiile de rapiditate ale pionilor pozitivi obținute pentru cele 6 energii considerate în Tabelul I. Se observă dependența de energia fasciculului. Distribuția de impuls transversal pentru kaonii pozitivi produși în ciocniri Au-Au la $\sqrt{s_{NN}} = 62 \text{ GeV}$ - pentru 4 domenii de centralitate a ciocnirii - este prezentată în Fig.3. Distribuția raportului ratelor de producere de antiprotoni, respectiv, protoni, în funcție de rapiditate este prezentată în Fig.4, pentru câteva energii de interes. Sunt extrem de importante dependențele de energie și de rapiditate, precum și indicațiile referitoare la posibilitatea identificării condițiilor optime pentru realizarea unor tranziții de fază în materia nucleară înalt excitată și densă. Predicțiile codurilor de simulare și calculele de model sunt într-un bun acord cu rezultatele experimentale. Dezvoltări specifice sunt în pregătire, în prezent.

Așa cum am mai arătat, în această perioadă echipa de cercetare a făcut unele calcule și simulări pentru ciocniri Au-Au la energiile care vor fi disponibile la SIS-100, respectiv, SIS-300, de la FAIR-GSI Darmstadt, Germania, pentru a întregii posibilă informație pentru procesele fizice discutate, dar și pentru experimente derulate la RHIC-BNL în cadrul Colaborării BRAHMS. Printre aceste lucrări se numără: (i) **Ioan Valentin Grossu, Călin Beșliu, Daniel Felea, Alexandru Jipa et al** - High precision framework for chaos many-body engine - *Computer Physics Communications* 185(1)(2014)1339-1342; (ii) **Measurements of dileptons with the CBM Experiment at FAIR – Claudia Hoehne for the CBM Collaboration – Nuclear Physics A931(2014)735-739***; (iii) **Measurements of the silicon tracking system of the CBM Experiment at FAIR – J.Heuser, V.Friese for the CBM Collaboration – Nuclear Physics A931(2014)1136-1140*** (*Lista cu membrii colaborării CBM se găsește în revistă (*Nuclear Physics A931(2014)1122-1227*)); (iv) **Alexandru Jipa, Ioan Valentin Grossu, Daniel Felea,** - Applications of Chaos Many-Bode Engine for the analysis of relativistic nuclear collisions at 200 A GeV/c - XXIV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2014), May 19-24, 2014, Darmstadt, Germany; (v) **Oana Ristea, Alexandru Jipa, Cătălin Ristea, ...** - Tsallis blast-wave analysis in relativistic heavy ion collisions - XXIV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2014), May 19-24, 2014, Darmstadt, Germany; (vi) **Cătălin Ristea, Alexandru Jipa, Oana Ristea,** - Higher moments of multiplicity distributions in nuclear collisions at relativistic energies - XXIV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2014), May 19-24, 2014, Darmstadt, Germany; (vii) **Alexandru Jipa, Ionel Lazanu, Oana Ristea, Marius Călin, Călin Beșliu, Cătălin Ristea, Tiberiu Eșanu, Vania Covlea, Dănuț Argintaru, Valerica Baban, Adrian Scurtu, Nicolae Țuțuraș, Silviu Cioranu, Adrian Bîrzu, Mihai Potlog – On the dynamics of nucleus-nucleus collisions at SIS-100 energies using CBM experimental set-up - Sesiunea Anuală de Comunicări Științifice a Facultății de Fizică, Măgurele, 20 iunie 2014 (prezentare orală); (viii) Valerica Baban, Alexandru Jipa, Dănuț Argintaru - Glauber MC model and flow in heavy ion collisions - Sesiunea Anuală de Comunicări Științifice a Facultății de Fizică, Măgurele, 20 iunie 2014 (prezentare orală); (ix) Călin Beșliu, Dănuț Argintaru, Alexandru Jipa, Mădălin Cherciu, Valeriu Grossu, Valerica Baban - Jet analysis of the transition to multifragmentation - Sesiunea Anuală de Comunicări Științifice a Facultății de Fizică, Măgurele, 20 iunie 2014 (prezentare orală); (x) Raluca Iordache, Oana Ristea – High p_T particle suppression in relativistic nuclear collisions - Sesiunea Anuală de Comunicări Științifice a Facultății de Fizică, Măgurele, 20 iunie 2014 (prezentare orală).**

Director proiect,

Prof.univ.dr. Alexandru JIPA