

Raport științific

privind implementarea proiectului în perioada **ianuarie – decembrie 2015**

(max 5 pagini)

Pentru perioada menționată obiectivul din cadrul proiectului a fost cel notat cu O5, având ca titlu **Examinarea diagramei de fază a materiei nucleare cu includerea rezultatelor experimentale recente de la RHIC și LHC. Comparații cu predicțiile unor simulări anterioare.** 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 2015 activitatea majoră a fost axată pe examinarea predicțiilor acestor simulări pentru a ști la ce să ne așteptăm atunci când experimentul CBM va deveni operațional. S-au considerat trei direcții de lucru, și anume: (i) **Analiza rezultatelor experimentale de la experimentele de RHIC și LHC;** (ii) **Simulări pentru noile experimente de la FAIR-GSI și NICA-IUCN;** (iii) **Studii preliminare asupra conexiunilor dintre ipotezele codurilor de simulare, rezultate din date simulate și predicții privind comportarea materiei nucleare la energiile disponibile la FAIR-GSI**

Tranzițiile de fază în materia nucleară a 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.

Pentru **analiza rezultatelor experimentale de la experimentele de RHIC și LHC**, grupul a depus eforturi pentru a observa posibile salturi în dependențele unor mărimi fizice de interes de energia disponibilă în sistemul centrului de masă. Acest lucru permite obținerea informații asupra dinamicii regiunii participante și tranzițiilor de fază în diferite condiții de densitate de energie și temperatură. S-au considerat ciocniri Au-Au la energia maximă disponibilă la RHIC-BNL și ciocniri Pb-Pb la energia de 2,76 A TeV, în SCM, la LHC-CERN. Este important de subliniat faptul că rezultatele preliminare ale comparațiilor în care se consideră mărimi fizice care prezintă dependențe de impulsul transversal, p_T , indică o privilegiere a descrierii bazate pe modele termice. Cum dinamica ciocnirilor nucleare relativiste și ultrarelativiste este legată de geometria ciocnirii, s-a făcut o analiză a dependenței de energie și centralitate reflectată prin numărul de participanți, pentru multiplicități (Tabelul I).

Centralitate	BRAHMS Au+Au	ALICE Pb+Pb
0-10%	328 ± 6	2895 ± 109
10-20%	239 ± 10	966 ± 37
20-40%	140 ± 11	1075 ± 38
40-60%	62 ± 10	410 ± 15

Table I

Folosirea raportului dintre numărul de participanți și numărul de spectator poate indica influența centralității asupra dinamicii ciocnirii (Fig.1) pentru două ciocniri considerate, la energiile lor specifice. Trebuie remarcată schimbarea de comportare pentru valori mai mari de 3 ale raportului, precum și palierul pentru domeniul de valori 0,5-2,5 al raportului, indiferent de energie.

În analiza comparativă făcută de interes a fost și discutarea dependenței formei distribuției de impuls transversal de centralitatea ciocnirii. Au fost luate în considerare aspect legate de comportările maselor transversale pentru tipurile de hadroni luate în considerare. Distribuțiile de masa transversală prezentate în Fig.2 și în Fig.3 sunt obținute în ciocniri Au-Au la $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ (Experimentul BRAHMS). Se constată că atât pentru kaon, cât și pentru protoni, forma spectrului este liniară. Se poate considera o independență relativă a pantelor spectrelor de clasa de centralitate a ciocnirii, exprimată aici în procente. Rezultate similare s-au obținut și pentru ciocniri Pb-Pb la $\sqrt{s_{NN}} = 2,76 \text{ TeV}$. Trebuie menționat faptul că există unele diferențe între tipurile de hadroni și că acestea cresc cu energia.

O problemă dezbătută în literatura de specialitate este cea legată de simetria ratelor de producere pentru hadroni și antihadroni, cu deosebire în evoluția temporală de la momentul inițial, al producerii, la momentul de „îngheț”.

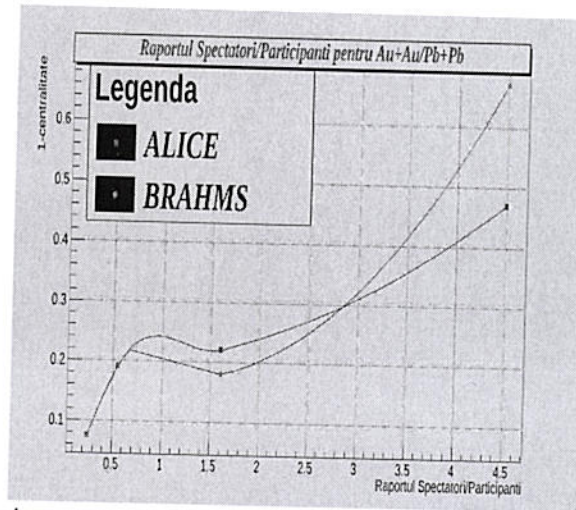


Fig.1. Dependenta centralității de raportul dintre participanți și spectatori

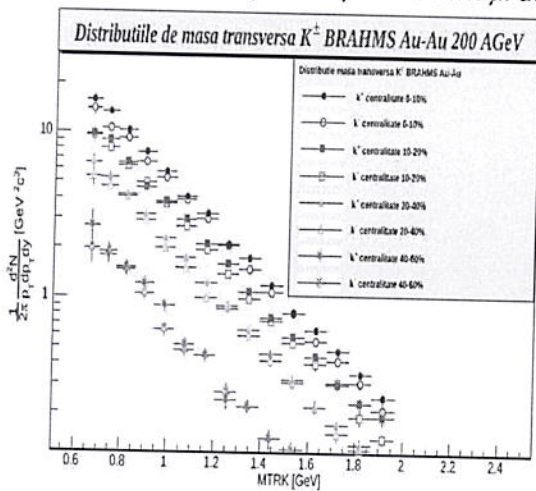


Fig.2. Distribuțiile de masa transversală pentru K^\pm în Experimentul BRAHMS

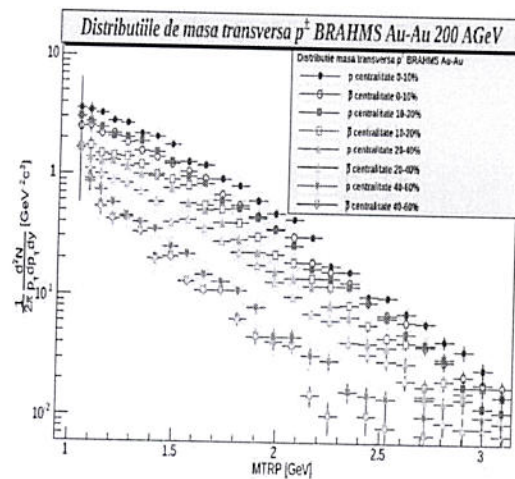


Fig.3. Distribuțiile de masa transversală pentru p^\pm în Experimentul BRAHMS

O problemă dezbătută în literatura de specialitate este cea legată de simetria ratelor de producere pentru hadroni și antihadroni, cu deosebire în evoluția temporală de la momentul inițial, al producerii, la momentul de „îngheț”. Rezultatele comparațiilor între ratele de producere pentru hadroni și antihadroni în cele două ciocniri considerate (Au-Au la $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$, respectiv, Pb-Pb la $\sqrt{s_{NN}} = 2,76 \text{ TeV}$), pentru diferite centralități, sunt incluse în Tabelul II. Se remarcă asimetria raportului \bar{p}/p pentru ambele ciocniri. Trebuie menționat faptul că informațiile sunt utile pentru diferite scenarii cosmologice.

Ciocnirea/Energie	Centralitate 0-10%	Centralitate 40-60%
Au-Au - $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$	0.70 ± 0.07	0.48 ± 0.07
Pb-Pb - $\sqrt{s_{NN}} = 2,76 \text{ TeV}$	1.02 ± 0.06	0.44 ± 0.10

Tabelul II Raportul \bar{p}/p în ciocniri Au-Au și Pb-Pb

Este de remarcat faptul că apar diferențe pentru rapoartele dintre ratele de producere pentru kaonii pozitivi și kaonii negativi K^+ / K^- , respectiv, \bar{p}/p . Asimetria este maximă și aproape constantă pentru perechile K^+ , K^- . Pentru emisia de pioni există o asimetrie foarte mică, iar valoarea raportului tinde la 1 ($(\pi^-/\pi^+) \rightarrow 1$).

Trebuie arătat faptul că raportul este dependent de rapiditate, la o energie data, și că valoarea raportului crește cu creșterea energiei disponibile, pentru toate rapiditățile. Creșterea este mai pronunțată pentru regiunea

centrală de rapiditate, unde există o conversie semnificativă din mișcarea longitudinală a nucleului incident în mișcarea transversală a particulelor generate în ciocnire (Fig.4).

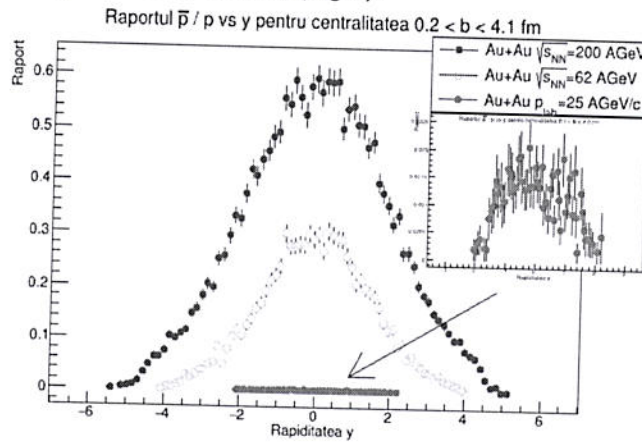


Fig.4. Distribuția raportului antiproton/proton, pentru diferite energii, în funcție de rapiditate

Investigarea potențialelor chimice ale hadronilor – atât în cazul celui barionic, μ_B , cât și al celui de stranietate, μ_s – poate oferi informații importante, având în vedere posibilele modificări de la momentul inițial al momentului final, de „îngheț”. Investigarea posibilelor dependențe de energia disponibilă în ciocnire este bogată în informații, de asemenea. Folosind metodele propuse în literatura de specialitate, cu deosebire cele legate de modelul termic al lui Becattini, au fost efectuate calcule, bazate pe rapoartele antiparticul-particulă, iar principalele rezultate sunt incluse în Tabelul III.

Centralitate [%]	μ_s [MeV]		μ_B [MeV]	
	Pb-Pb 2.76 A TeV	Au-Au 200 A GeV	Pb-Pb 2.76 A TeV	Au-Au 200 AGeV
Ciocnire				
0-10	1.85±0.004	8.2± 0.01	0.2± 0.00002	48± 0.24
40-60	3± 0.02	11.2± 0.3	1.2± 0.0004	52± 0.47

Tabelul III Potențiale chimice de stranietate și barionice pentru ciocniri Au-Au și Pb-Pb

Un rezultat extrem de interesant și util obținut este legat de menținerea tendinței de scădere a potențialelor chimice de ambele tipuri cu creșterea energiei disponibile. Se poate considera că este o indicație asupra restaurării simetriei chirale la energii extrem de mari.

Pentru a completa analiza comparativă am făcut estimări ale timpului de evoluție al regiunii participante fierbinți și dense, de la momentul formării, la momentul de „îngheț”, folosind un model de evoluție de tip expansiune Hubble. Pentru estimarea „timpului Hubble” s-au folosit relațiile de mai jos:

$$TH_{E_i} = \left(\frac{E_{cin_tr_min}}{E_{cin_tr_i}} \right)^2 * \tau$$

$$TH_{\tau_{tr_i}} = \left(\frac{\beta_{tr_min}}{\beta_{tr_i}} \right)^2 * \tau,$$

unde τ are valoarea de 3,5 Fm/c.

În Fig.5 sunt incluse unele din rezultatele obținute pentru cele două ciocniri. Valorile sunt în acord cu posibilitatea formării plamei de cuarci și gluoni și a unui timp de viață pentru această fază a materiei nucleare de ordinul a câțiva Fm/c.

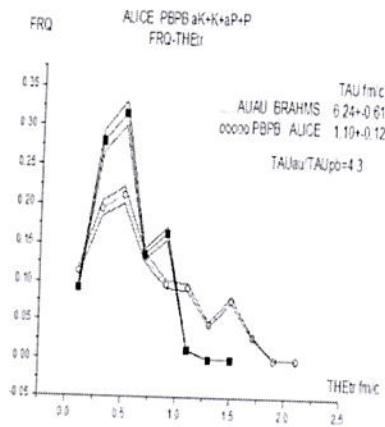


Fig.5. Comportarea timpului Hubble pentru cele două ciocniri

Toate concluziile desprinse din analiza comparativă susțin formarea plasmei de cuarci și gluoni în ciocnirile respective. Formarea ei este favorizată la energii mai mari (**Andrea Danu, Oana Ristea, Călin Beșliu, Alexandru Jipa et al** - Comparisons among the hadron production in ultrarelativistic heavy ion collisions in different transverse momentum ranges. Preliminary results - **Romanian Reports in Physics 67(3)(2015)831-836**).

O analiză suplimentară, pe un domeniu mai larg de energii, cu luarea în considerare a ciocnirilor de referință proton-proton la toate energiile, dar și a ciocnirilor asimetrice disponibile (d-Au, respectiv, p-Pb) se impune.

Această analiză a fost completată de analiza detaliată a evoluției temporale și a procesului de curgere realizată în articolul C.Ristea, A.Jipa, Oana Ristea, C.Beșliu, I.Lazanu, T.Eșanu, M.Călin, N.G.Țuțuraș, Valerica Baban, D.Argintaru - Hydrodynamic flow and phase transitions in relativistic nuclear collisions reflected by Hubble type fireball evolution, **articol acceptat spre publicare în Romanian Reports in Physics**, pentru ciocniri Au-Au la energii cuprinse între $\sqrt{s_{NN}} = 1,98 \text{ GeV}$ și $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$. Timpul Hubble scade de la circa 24 Fm/c la circa 2 Fm/c, iar „constanta” Hubble microscopică asociată crește cu energia până la energii $\sqrt{s_{NN}} \approx 15 \text{ GeV}$, apoi atinge o valoare constantă, în limita impreciziilor și incertitudinilor experimentale, de circa $0,850 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$, ceea ce permite un număr mare de stări posibile ale materiei nucleare fierbinți și dense din materia nucleară. Valorile sunt obținute pentru „îngheț” chimic. În cazul „înghețului” cinetic/termic valorile se modifică. Astfel, timpul Hubble scade de la circa 83 Fm/c la circa 7 Fm/c, pentru cele două energii extreme menționate. Valoarea „constantei” Hubble microscopice asociate are o comportare total diferită, prezentând un maxim, de circa $0,650 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$, pentru energii $\sqrt{s_{NN}} \approx 10 \text{ GeV}$. Cele două comportări indică posibilitatea unor mecanisme diferite, concurente, în astfel de ciocniri.

Trebuie remarcat faptul că rezultatele obținute în ciocniri Pb-Pb la energia $\sqrt{s_{NN}} = 2,76 \text{ TeV}$ indică o temperatură de „îngheț” termic de 96 MeV. Timpul asociat este de circa 6,0 Fm/c, ceea ce conduce la o „constantă” Hubble microscopică de circa $0,323 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$. Trebuie remarcat faptul că valoarea este, în limita impreciziilor și incertitudinilor experimentale, similară cu cea obținută în ciocniri Au-Au la $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$.

Estimările dimensiunilor sistemului la momentul de „îngheț” chimic, bazate pe dependența entropiei de temperatura de „îngheț” chimic, indică o creștere a acestora cu creșterea energiei, până la o valoare în jur de 5,20 Fm. Pentru ciocniri Pb-Pb la energia $\sqrt{s_{NN}} = 2,76 \text{ TeV}$ valoarea crește la 5,95 Fm. Aceste rezultate indică o viteză de expansiune în creștere semnificativă cu creșterea energiei disponibile.

Principalele concluzii sunt legate de posibilitatea estimării „constantei” Hubble microscopice folosind o ecuație de stare a materiei nucleare de tip Stefan-Boltzmann. Valoarea ei este de ordinul a 10^{23} s^{-1} . Se poate afirma că aceasta este o constantă în ciocniri nucleu-nucleu la energii la care formarea plasmei de cuarci și gluoni este dovedită experimental. În cazul în care se folosește o ecuație de stare în care se consideră un gaz de hadroni și rezonanțe care interacționează se obțin valori mai mari decât în cazul ipotezei gazului în care nu există interacții.

O altă problemă abordată este cea a decuplării dintre „înghețul” chimic și „înghețul” termic. Valorile obținute și discutate, parțial, anterior, indică valori de câțiva Fm/c, în ciocniri nucleu-nucleu la energii suficient de mari astfel încât să fie formată plasma de cuarci și gluoni. Rezultatele sunt în acord cu cele obținute prin efect Handbury-Brown și Twiss. Trebuie menționat faptul că estimările bazate pe o ecuație de stare care ia în considerare Cromodinamica cuantică pe rețea (lattice), în aproximația temperaturilor mari, indică un timp de viață al plasmei de cuarci și gluoni formată în regiunea participantă mai scurt, în jur de 1 Fm/c.

Având în vedere palierul destul de larg de energii compatibile cu apariția unor cuarci liberi, precum și rezultate experimentale recente referitoare la formarea unor entități „stranii”, de tip pentacuarc sau/și dibarion, au fost făcute eforturi de includere a acestora în codul de simulare propriu bazat pe haos. Primele rezultate obținute sunt încurajatoare (Ioan Valentin Grossu, Călin Beșliu, Alexandru Jipa, Daniel Felea, Emil Stan, Tiberiu Eșanucations 195(2015)218-220 - Support for massless particles in Chaos Many-Body Engine simulations of nuclear collisions at relativistic energies - *Computer Physics Communications* 195(2015)218-220). Sunt posibile și alte entități (Fig.6)

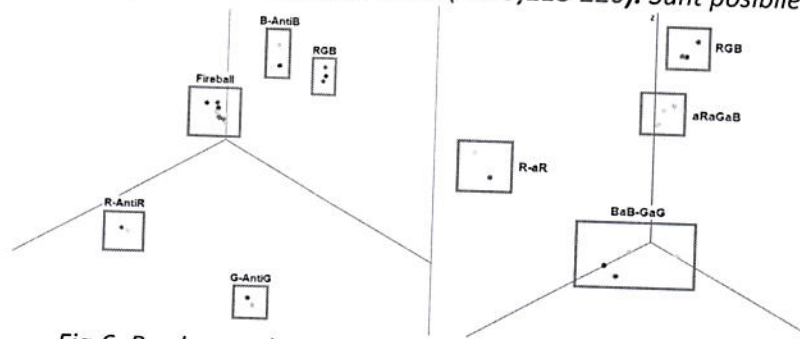


Fig.6. Producere de entități „stranii” folosind codul CMBE-CDC

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.

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, precum și la NICA-IUCN Dubna pentru a întregii posibila informație pentru procesele fizice discutate, dar și pentru experimente derulate la RHIC-BNL în cadrul Colaborării BRAHMS.

Rezultatele obținute în cadrul acestui proiect au fost publicate sau prezentate la importante conferințe internaționale și naționale. Uneori ele au fost publicate împreună cu rezultatele obținute în alte proiecte, în principal în proiectul F09/30.VI.2014 - YaPT-CBM.

Printre aceste lucrări se numără: (i) Ioan Valentin Grossu, Călin Beșliu, Alexandru Jipa, Daniel Felea, Emil Stan, Tiberiu Eșanucations 195(2015)218-220 - Support for massless particles in Chaos Many-Body Engine simulations of nuclear collisions at relativistic energies - *Computer Physics Communications* 195(2015)218-220; (ii) **Andrea Danu, Oana Ristea, Călin Beșliu, Alexandru Jipa et al** - Comparisons among the hadron production in ultrarelativistic heavy ion collisions in different transverse momentum ranges. Preliminary results - *Romanian Reports in Physics* 67(3)(2015)831-836; (iii) C.Ristea, A.Jipa, Oana Ristea, C.Beșliu, I.Lazanu, T.Eșanu, M.Călin, N.G.Țuțuraș, Valerica Baban, D.Argintaru - Hydrodynamic flow and phase transitions in relativistic nuclear collisions reflected by Hubble type fireball evolution – articol acceptat spre publicare în *Romanian Reports in Physics*; (iv) **O.Ristea, A.Jipa, C.Ristea, C.Beșliu, I.Lazanu, M.Călin, T.Eșanu, V.Baban, N.Țuțuraș, D.Argintaru** - Tsallis statistics approach to the transverse momentum spectra in relativistic nuclear collisions - 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU9), 24-27 August 2015, Istanbul University, Istanbul, Turkey – **prezentare orală**; (v) **Al.Jipa, C.Beșliu, N.G.Țuțuraș, Oana Ristea, C.Ristea, I.V.Grossu, D.Felea, M.Călin, I.Lazanu, T.Eșanu, Valerica Baban, Dănuț Argintaru, E.Stan, A.Jinaru** - The research of the possibility of creating the transition regime in the nuclear matter through the study of particle cumulative production in relativistic nuclear collisions using the CBM experiment at FAIR-GSI – The XXV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Kobe, Japan, 2015, Book of abstracts pages 167-168 (0947/527) – **poster**; (vi) **Al.Jipa** – Some comments on the quark-gluon plasma formation and specific experimental signals - Abstract Book - page 112 - Annual Session of Scientific Communications of the Faculty of Physics of the University of Bucharest, June 19th 2015 - **oral presentation**; (vii) **C.Ristea, Oana Ristea, Al.Jipa, C.Beșliu, I.Lazanu, M.Călin, T.Eșanu, Valerica Baban, N.G.Țuțuraș, D.Argintaru** - Strangeness production in high energy collisions - The XXV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2015), Kobe, Japan (Abstract book 0546/569, page 89) – **poster**; (viii) **Oana Ristea et al** - On the antiparticle to particle ratios in Au-Au collisions at SIS-FAIR GSI energies - The Third European Nuclear Physics Conference, Groningen, Holland, 30.VIII-5.IX.2015 – **poster**; (ix) **Alexandru Jipa** – Sesiunea Anuală de Comunicări Științifice a Facultății de Fizică a Universității din București, iunie 2015. Unele rezultate de interes sunt incluse în **articolul colaborării BRAHMS, trimis dpre publicare la Physical Review C** (BRAHMS Collaboration (I.C.Arsene, ..., C.Beșliu, ..., Al.Jipa, ..., C.Ristea, Oana Ristea, ..., I.S.Zgură) - Rapidity and centrality dependence of nuclear modification factors and identified particle ratios in Cu-Cu collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$)

Al.Jipa