

Beszámoló a
„Jetek fragmentációja és végállapoti effektusok nehézionütközésekben RHIC és
LHC energián''
című PD 73596 számú OTKA pályázatról

Barnaföldi Gergely Gábor

Bevezető

Az OTKA PD73596 számú projekt célja, hogy a brookhaveni RHIC és genfi CERN LHC részecskegyorsítók hadron-hadron ütközéseiben keletkező jetek és hadronok mért spektrumait elméleti úton értelmezze. Kutatásomban elsősorban a hadronizáció folyamatának modellezésére fókuszáltam, melyhez a fenti két részecskegyorsító adatai mellett az amerikai Tevatron és korábbi CERN LEP gyorsító adatait is figyelembe vettem. Elemzésem során elektron-pozitron, proton-proton, proton-atommag, valamint atommag-atommag ütközéseiben mért spektrumokat vizsgáltam.

Elméleti munkám során frissítésre került a korábban használt pQCD kód, amely alkalmassá vált az LHC energiájú számolások modellezésére, illetve az újonnan kidolgozásra kerülő fragmentációs függvények és modellek tesztelésére. A tesztelési folyamatban van egy további számítógépes kód, amely fragmentációs függvények illesztését végzi. Elméleti kutatásaim mellett részt vettem az ALICE VHMPID moduljának fejlesztésében, amelyhez háttérszámításokat szolgáltattam saját modellem alapján.

Kutatási eredményeimet 23 nemzetközi és magyar szakmai konferencián mutattam be, illetve 4 szemináriumot tartottam. A tudományterületem népszerűsítéseként 14 előadást tartottam magyar és általános és középiskolákban, valamint National Geographic, a HVG, és az Atomoktól a Csillagokig tudományos sorozatainak keretében. A kutatásom 3 és fél éve alatt munkáimból 17 poszter és mintegy 20 cikk jelent meg, mely közül 11 referált folyóiratban. A cikkek összes impakt faktora: 28.57.

A projekthez kapcsolódóan 3 diák munkáját irányítottam, akik részt vettek az OTDK 2011 konferencián és két első helyezést valamint egy dicséretet szereztek. Későbbiekben mindhárom diák BSc fokozatot szerzett, illetve folyamatban van MSc tanulmányaik lezárása.

Fő kutatási irányok és eredmények összefoglalása

A PD73596 OTKA projekt a hadronizáció és fragmentáció elméleti vizsgálatára irányult nagyenergiás ütközésekben. Kutatásaim az alábbi pontok alapján többféle módszerrel történtek, amelyekhez szükség esetén további eljárások kidolgozása is kapcsolódott. A továbbiakban ezeket fejtem ki részletesebben.

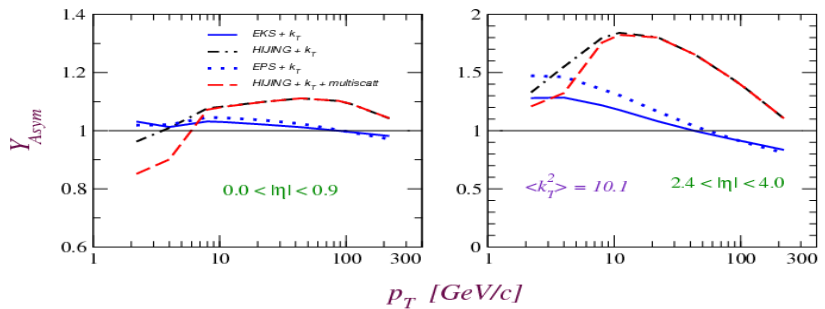
- (i) A RHIC és az LHC hadron-hadron ütközéseiben mért hadronspektrumok elméleti elemzése a nukleáris effektusok szempontjából [1,2,3,4,5,7,9,20,].
- (ii) A hadronizáció geometriai szerkezetének vizsgálata, az ún. „underlying event” egy új definíciójának tesztje a jet-anyag kölcsönhatás vizsgálatának elősegítéséhez [11,13,14].
- (iii) A fragmentációs függvények egy lehetséges új parametrizálását a nem-extenzív statisztikus modell keretén belül [15,16,17,18].
- (iv) Hadronspektrumok analízise és szimulációja a tervezett ALICE VHMPID kísérlethez [6,10,12,19].

(i) Hadronspektrumok és nukleáris effektusok vizsgálata

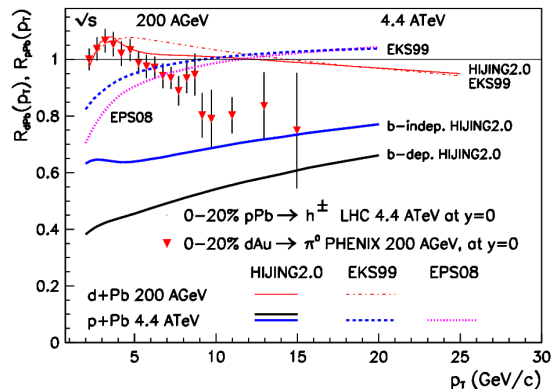
A projekt kezdetén a proton-proton ütközések elméleti vizsgálata volt az elsődleges cél. A továbbfejlesztett pQCD programkód segítségével a proton-proton ütközésekben keletkező részecskezápork keletkezési mechanizmusát valamint jellemző fizikai paramétereit vizsgáltam meg (spektrum, jet-kúpszög, skálaválasztás, energiatfüggés). Számolásaimat összehasonlítottam a RHIC valamint, a Tevatron részecskegyorsító kísérleteiben mért adatokkal valamint, becslést adtam az LHC proton-proton ütközéseiben mérhető részecskezápor paraméterekre. Ezen eredményeimet a prágai „4. High- p_T Physics for the LHC” konferencián mutattam be.

Megvizsgáltuk továbbá, hogy RHIC proton-proton ütközéseiben mérhető anomális proton/pion arány, hogyan modellezhető. Összehasonlítottam a pQCD alapú parton modell valamint a koaleszcencia modell által adott eredményeket. Számolásaimban reprodukáltam a RHIC STAR kísérletében mért arányt, ill. meghatároztam az LHC energiákon várható proton/pion arányokat is. Munkám a JPG folyóiratban jelent meg [2,3]. Proton-proton kutatásaim során kitértem a 3-jet eseményekben keletkező kvark ill. gluon jetek azonosítására vonatkozó kísérleti modell elméleti elemzésére is amit a QM 2009 konferencián mutattunk be poszteren [P3].

A proton-proton ütközésekben megjelenő részecskezápork vizsgálata mellett a nehézionfizikai ütközésekben keletkezett hadronok elemzésével is foglalkoztam. A továbbfejlesztett pQCD kód segítségével – beépítve az AKK NLO fragmentációs függvényeket – lehetővé vált a pionok, kaonok és protonok (ill. azonosítatlan hadronok) produkciójának pontos számolása. Elsőként a pionok és azonosítatlan hadronok keletkezése során mérhető nukleáris effektusok rapiditásfüggését vizsgáltam. Modellemben kiszámítottam a RHIC aszimmetrikus dAu ütközésekben mérhető rapiditás aszimmetria faktort. Számításaimat összevetettük egy független pQCD kód számolásaival is, valamint becslést adtunk az LHC dPb (pPb) ütközéseiben kísérletileg mérhető rapiditás aszimmetria faktor értékére. Rámutattam a nukleáris módosítási és a rapiditás aszimmetria faktorok közötti kapcsolatra, amely a későbbi mérésekben nyújthat segítséget az előre (ill. visszazórt) inkluzív hadronok nukleáris módosítási faktorainak meghatározásában. A kutatás eredményit két konferenciakiadványban [5], illetve a PRC folyóiratban publikáltam [4]. A vizsgálat során kitértünk a rapiditás aszimmetria fragmentációtól való függésére is, amit a QM 2009-en poszteren mutattam be [P2].



Az LHC 2012-re tervezett 4.4 ATeV-es pPb ütközésekhez, a fenti pQCD kód segítségével jóslatot adtam a várható hadronspektrumokra, illetve az ismert nagyenergiás nukleáris effektusok által okozott, az $R_{pPb}(p_T)$ -ben megmutatható, nukleáris módosító hatások bizonytalanságára Megmutattam, hogy LHC energiákon, a 2–10 GeV/c impulzusú tartományban a korábban – a RHIC dAu ütközéseiben – használt nukleáris árnyékolási modellek igen jelentős (15%-50%) elnyomási faktort



okoznak (l. ábra), miközben az RHIC ütközési energiáin ugyanezek az árnyékolási parametrizációk nagyon hasonlóan viselkedtek. Munkámban a pQCD modellem számolásait összehasonlítottuk a HIJING Monte-Carlo modell egy továbbfejlesztett változatának eredményeivel, amellyel összhangban találtuk. Eredményünket a Phys. Rev. C folyóiratban publikáltuk [7,20].

Atommag-atommag ütközések tekintetében két további analízisre került sor a RHIC-ben mérhető valamint az LHC-ben várható legnagyobb impulzusok esetére megvizsgáltam a Gyulassy-Lévai-Vitev-féle (elsőrendű GLV közelítés), nem-Abeli, indukált jet-energiavesztését [1]. Megállapítást nyert, hogy a GLV jet elnyomás erőssége csökken az extrém nagy impulzusok felé. Ezt az eredményt a QM 2011 konferencián bemutatott első kísérleti eredmények is alátámasztották.

(ii) A hadronizáció geometriai vizsgálata – „underlying event” analízis

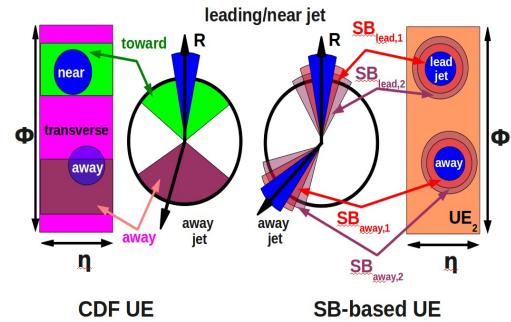
A hadronizáció térbeli szerkezetének feltérképezésének egy lehetséges módja pl. a hadron-hadron szögkorreláció mérése vagy a részecskezáporkok (jetek) vizsgálata. A nagy transzverzális impulzusú hadronok keletkezésekor fontos információt hordozhat a hadronizációról a szögkorreláció háttere, vagy jetek esetében az ún. „Underlying Event (UE)” tartománya. Ezt a tartományt az eseménytérből a jetek levonásával kapjuk. Különösen érdekes lehet az UE összetételének megváltozása a jetek közelében, ha a jet kölcsönhatott az atommag-atommag ütközésekben megkeletkezett színes, termalizált anyaggal. Ennek vizsgálatára azonban a hagyományos UE definíció nem alkalmas. Egy módosított UE-definíciót alkalmazó (l. ábra) analízisben azt vizsgáltuk, hogy a hadron-hadron szögkorreláció paramétereinek változása

(tömegközépponti energia, trigger részecske típusa, ill. transzverzális impulzus kiszélesedés), hogyan módosítja a háttér hadron-összetételének geometriáját, és impulzuseloszlását. Az új definíciót a Hot Quarks 2010 és a HCBM 2010 konferencián került bemutatásra [P8], amelyekről J. Phys. CS [11] illetve az Eur. Phys. Journal [13] folyóiratokban jelentek meg összefoglaló publikációk. A kidolgozott eljárást proton-proton ütközéseken demonstrálva a az utrechti „6. High-pT Physics for the LHC 2010” workshopon mutattam be, majd az AIP CS folyóiratokban publikáltuk [14].

E munkámhoz kapcsolódik egy segédeljárás is, melyben a nagy számítási kapacitású szimulációk nem hagyományos módon (CPU), hanem számítógépek grafikus kártyán futnak többszörös sebességnövekedést elérve. Az ALICE kísérlet által használt AliROOT szimuláció környezetet alapul véve egy olyan GPU kód készült el, amely valós időben képes Monte-Carlo szimulációkat futtani GPU kártyákon. A módosított kód alkalmas arra is, hogy az LHC GRID hálózatában kihasználja a GPU-val rendelkező node-okat. Első eredményeket poszteren mutattam be – az általam szervezett – GPU nap 2010 és GPU nap 2011 rendezvényeken, valamint tervezem egy további publikáció elkészítését is [P5,P12,P17].

(iii) Új típusú fragmentációs modell és vizsgálata

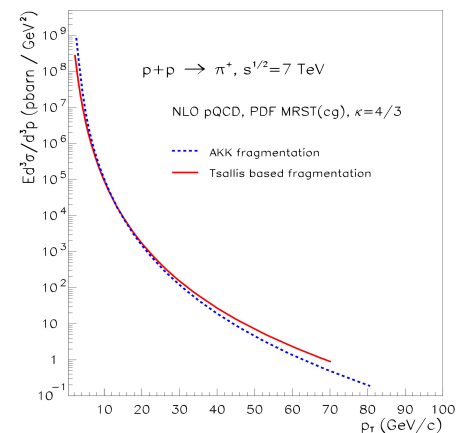
A nem extenzív statisztikus fizika egy teljesen új elmélet, mely keretén belül lehetségessé vált nem egyensúlyi termodinamikai rendszerek – mint pl. a nagyenergiás részecskeütközések vagy részecskezáporkok) tárgyalása. Ebben a modellben feloldhatóvá válhat a hadronspektrumok eloszlásának kettőssége: kis impulzusokra exponenciális, nagy impulzusokra hatványfüggvény. Nehézionütközések fizikai leírására alkalmazva a nem-extenzív termodinamika elméleti modellt, egy



lehetséges javaslatot adtam a hadronizáció folyamatára. Az említett modell a QM 2009, QM 2011, valamint további nemzetközi és magyar konferencián került bemutatásra [P1,P6,P13,P14,P15,P16].

Köszönhetően a CERN LHC részecskegyorsító sikereinek, 2010 tavaszától, folyamatosan elérhetővé válnak kísérletileg mért hadronspektrumok a 900 GeV-es a 2,36 TeV-es valamint a 7 TeV-es proton-proton ütközésekben. Az újonnan mért adatokra kiterjesztettem korábbi analízisemet, amelyben a RHIC kísérleti adatait vizsgáltuk 200 AGeV tömegközépponti energián arany-arany ütközésekben. E korábbi analízisben Tsallis-Pareto eloszlást feltételezve az illesztési paramétereket analizáltam. A meghatározott effektív hőmérséklet valamint Tsallis féle q-paraméter értékek illesztése során láthatóvá vált azok skálázása. A fenti jelenségről nemzetközi konferenciákon (Jet Collaboration Meeting, Hot Quarks 2010) és a Budapesten megrendezésre került HCBM 2010 konferencián előadást tartottam. Az elhangzott előadások anyaga a J. Phys. CS [15] illetve az Eur. Phys. Journal [16] folyóiratokban került publikálásra.

A fenti felismerésünk nyomán feltételezhető, hogy a mérhető Tsallis-Pareto eloszlások eredete a partonok fragmentációs folyamataiban keresendő. Vizsgálataim másik részében, az AKK fragmentációs függvény parametrizáció egy lehetséges Tsallis-Pareto illesztését végeztem el. Az AKK hatványfüggvény-paraméterezést a korábban kifejlesztett pQCD alapú parton modellben már többször sikeresen teszteltem (ld. ábra) Jelenleg ennek a parametrizációnak egy módosított változatával végzek analíziseket. Az átparaméterezés lehetőségéről ill. háttéréről a Gribov '80 nemzetközi munkakonferencián tartottam előadást, amelyből konferenciakiadvány készült [15].



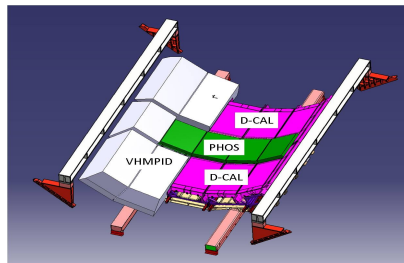
A kifejlesztésre került egy a nem-extenzív statisztikus folyamatokon alapuló fenomenologikus modell is. Ebben a modellben olyan fragmentációs függvényeket illesztettem, amely nem a hagyományos hatványfüggvény alakú, hanem Tsallis-Pareto eloszlást követ. Az Physics Letters B folyóiratban megjelent publikációban [17] e modellt, a legegyszerűbb rendszer, az elektron-pozitron ütközés adataira illeszkedő eloszlásokra is sikerült megadni, amely lehetővé teszi a fragmentációs függvények új alakú parametrizálását. Ezen eredményeimet az utrechti „6. High-pT Physics for the LHC 2011”, és a franciaországi „Quark Matter 2011” konferenciákon mutattam be [P13,P14].

Jelenleg több különböző elméleti feltevést (kanonikus és mikrokanonikus Tsallis eloszlások) tesztelése folyik párhuzamosan a korábbi és a legújabb RHIC-es és LHC-s adatokon. Ezek segítségével már precízen leírható lesz az elektron-pozitron vagy proton-proton ütközésekben mérhető részecskespektrum, sőt azok arányai is. Ehhez elkészült egy számítógépes kód is, amely a Tsallis – Pareto-alapú fragmentációs függvények kísérleti adatokhoz való illesztést végzi. Ez lehetőséget adhat a Tsallis-paraméterek fizikai értelmezésére, valamint azok végállapoti effektusoktól való függésének vizsgálatára.

A nem-extenzív fizikai kutatásaim során lehetőségünk volt Budapesten megszervezni a "HCBM 2010 - Hot and Cold Baryonic Matter 2010"-es nemzetközi workshopot is, amelyen vendégül láttuk - többek között - C. Tsallist a nem-extenzív statisztika atyját. A konferencia anyagát a EPJ Conference Series folyóiratban jelentet meg, amelynek társszerkesztője voltam [16].

(iv) Hadronspektrumok a tervezett ALICE VHMPID detektor szimulációihoz

Hadron-hadron korrelációs eredményeim segítségével szolgáltak a CERN LHC ALICE kísérleti együttműködés tervezett VHMPID al-detektorának (l. ábra) fejlesztéséhez és szimulációjához, amely konferenciakiadványokban [6,12] és posztereken került publikálásra [P7,P9,P10,P11,P15]. Emellett az illesztett hadronspektrumok, hozamok, részecskearányok és a jet elemzés része lett a CERN ALICE VHMPID Letter of Intent-nek is. E publikáció 2012 elején lett benyújtva az ALICE detektor fejlesztésért felelős csoportjának és 2012 szeptemberében kerülhet elfogadásra [19].



Összegzés, kitekintés

A PD73596 számú OTKA posztdoktori ösztöndíj lehetőséget teremtett a PhD munkám során elkezdett elméleti kutatásaim folytatásához, valamint egy teljesen új kutatási irány kibontakoztatására. A nem extenzív statisztikus módszerek alkalmazása a nehézionütközésekben egyre elfogadottabb a közösségben, a nagy kísérleti együttműködések, már ezen függvényeket is illesztik a kísérleti publikációikban. A megkezdett kutatások tovább folytathatóak, ami az eddigi 20 megjelent publikáció számát tovább fogja növelni.

A módosított pQCD kód segítségével az LHC futásai alatt további elemzések készíthetők, az egyre növekvő tömegközépponti energia és luminozitás mellett, lehetővé téve a nagyeneriás nukleáris effektusok tesztelését.

A pályázat időtartama alatt 4 Bsc/MSc diák munkáját irányítottam, valamint részt vettem csoportunk PhD hallgatóinak motiválásában, akikkel közös publikációkat is készítettünk. Emellett nagy hangsúlyt fektettem az utánpótlás-nevelés és a tudománynépszerűsítés terére is.

Publikációk

- [1] G.G. Barnaföldi, B.A. Cole, G. Fai P. Lévai: Where does the energy loss lose strength?, J.Phys.G35:104066, 2008 IF:5.270
- [2] P. Lévai, G. Papp, G.G. Barnaföldi, G. Fai: Pion production in dAu collisions at RHIC energy. EPJ ST 155: pp. 89-99. (2008) IF: 0.689
- [3] P. Lévai, G.G. Barnaföldi, G. Fai: The proton-to-pion ratio and the near-side jet correlation in pp and AA collisions, J. Phys. G35 104111, 2008 IF:5.270
- [4] A. Adeluyi, G.G. Barnaföldi, G. Fai , P. Lévai: Relativistic light-on-heavy nuclear collisions and the implied rapidity asymmetry, Phys. Rev. C80, 014903, 2009 IF:3.477
- [5] A. Adeluyi, G.G. Barnaföldi, G. Fai , P. Lévai: Expected nuclear modifications and pseudorapidity asymmetry in p(d)Pb collisions at the LHC, PoS HIGHPTLHC:016, 2009
- [6] A.G. Agócs, ..., G.G. Barnaföldi, et al.: Very high momentum particle identification at the LHC, Indian J.Phys. 84 (2010) 1635, 2010 IF: 0.291

- [7] G. G. Barnaföldi, G. Fai, P. Lévai, B. A. Cole and G. Papp: Cold nuclear modifications at RHIC and LHC, Indian Journal of Physics Volume 84, Number 12, 1721, 2010 IF: 0.291
- [8] G.G. Barnaföldi, P. Lévai, B. Lukács: Compact stars in Kaluza –Klein World, J. Phys.: Conf. Ser. 218 012010, 2010 IF: 2.124
- [9] G.G. Barnaföldi, V. Gogokhia: Vacuum Energy Density in the Quantum Yang -- Mills Theory, J.Phys. G37 025003, 2010 IF:1.170
- [10] A. DiMauro, ..., G.G. Barnaföldi et al.: The VHMPID RICH upgrade project for ALICE at LHC, Nucl.Instrum.Meth. A639 274, 2011 IF: 1.317
- [11] A.G. Agócs G.G. Barnaföldi, P. Lévai: Jets and Underlying Events at LHC Energies, J.Phys. CS. 270 012017,, 2011
- [12] A.G. Agócs, ..., G.G. Barnaföldi: VHMPID: a new detector for the ALICE experiment at LHC, EPJ Web of Conf. 13 03004, 2011
- [13] A.G. Agócs, G.G. Barnaföldi, P. Lévai: Underlying events in p+p collisions at LHC energies, EPJ Web of Conf. 13 04006, 2011
- [14] A.G. Agócs, G.G. Barnaföldi, P. Lévai: Underlying Event Studies for LHC energies., AIP Conf. Proc. 1348, 124, 2011
- [15] G.G. Barnaföldi, K. Ürmössy, T.S. Biró: Tsallis-Pareto like distributions in hadron-hadron collisions, J.Phys.CS. 270 (2011) 012008, 2011
- [16] G.G. Barnaföldi, T.S. Biró (eds.): HCBM 2010 – International Workshop on Hot and Cold Baryonic Matter Budapest, Hungary, August 15-20, 2010, EPJ Web of Conferences Vol. 13, 2011
- [17] K. Ürmössy, G.G. Barnaföldi, T.S. Biró: Generalised Tsallis Statistics in Electron-Positron Collisions., Phys.Lett. B701 (2011) 111, 2011 IF: 5.255
- [18] K. Ürmössy, T.S. Biró, G.G. Barnaföldi: Pion Production Via Resonance Decay in a Non-extensive Quark-Gluon Medium with Non-additive Energy Composition Rule, EPJ Web of Conf. 13 (2011) 05003, 2011
- [19] A.G. Agócs, ... G G Barnaföldi, et al: Letter of Intent of the Very High Momentum Particle Identification Detector for the CERN ALICE Experiment CERN-ALICE, 2012.
- [20] G.G. Barnaföldi, J. Barrette, M. Gyulassy, P. Lévai, V. Topor Pop: Predictions for p+Pb at 4.4A TeV to Test Initial State Nuclear Shadowing at Energies Available at the CERN Large Hadron Collider , Phys.Rev. C85 (2012) 024903 IF:3.416

Poszterek

- [P1] G.G. Barnaföldi, T.S. Biró, G. Fai, K. Ürmössy, P. Ván: Hadronization: Fragmentation or Non-Extensivity?, Quark Matter 2009 International Conference, 2009, Knoxville, USA
- [P2] A. Adeluyi, G.G. Barnaföldi, G. Fai, P. Lévai: Rapidity Asymmetry in p(d)A Collision, Quark Matter 2009, Knoxville, USA
- [P3] S. Pochybova, P. Lévai, G.G. Barnaföldi: Topological Study of Three-Jet events in ALICE, Quark Matter 2009 International conference, 2009
- [P4] G.G. Barnaföldi, B. Lukács, P. Lévai: Extra Dimensions in Compact Stars?, EMMI Workshop 2009, Wroclaw, Poland
- [P5] Nagy M.F., G.G. Barnaföldi et al: GPU gyorsítás az AliROOT keretrendszerhez, Fizikus Vándorgyűlés, Pécs
- [P6] Ürmössy K. Biró T. Barnaföldi: Nem extenzív hadroneloszlások RHIC és LHC energián, Fizikus Vándorgyűlés, Pécs
- [P7] Berényi D. et al.: VHMPID, egy új detektor a CERN ALICE kísérletében, Fizikus Vándorgyűlés, Pécs
- [P8] Agócs, G.G. Barnaföldi P. Lévai: Correlation of Identified Hadrons at RHIC and LHC Energies, HCBM 2010, Budapest
- [P9] D. Berényi et al.: New Detector for the CERN ALICE Experiment, HCBM 2010, Budapest
- [P10] Barnaföldi G.G. et al.: Sokszálas gáztöltésű detektorok fejlesztése a CERN ALICE és NA61 kísérleteihez, ELTE Innovációs nap 2011, Budapest
- [P11] Barnaföldi G.G. et al.: Sokszálas detektorok fejlesztése alkalmazott kutatásokhoz, ELTE Innovációs nap 2011, Budapest
- [P12] M.F. Nagy, G.G. Barnaföldi: Application of GPUs in Particle Physics Simulation, GPU Nap 2010, MTA KFKI RMKI, Budapest
- [P13] G.G. Barnaföldi, T.S. Biró, G. Kalmár, K. Ürmössy, P. Ván: Non-Extensive Approach to High-Energy Collisions, Quark Matter 2011, 23-28 May 2011, Annecy, France, 2011
- [P14] K. Ürmössy, T.S. Biró, G.G. Barnaföldi, P. Ván: Tsallis Statistics in Fragmentation, Poster presented at International Conference on Quark Matter 2011, 23-28 May 2011, Annecy, France, 2011
- [P15] G. Hamar, G.G. Barnaföldi et al.: Very High Momentum Particle Identification Detector at CERN LHC ALICE, Poster: International Conference on Quark Matter 2011, 2011
- [P16] G. G. Barnaföldi, T.S. Biró, K. Ürmössy and P. Ván: Extensivity, nonextensivity and Zeroth Law,

Poster: Joint European Thermodynamics Conference, JETC 11 Chemnitz, 2011

[P17] M.F Nagy, G.G. Barnaföldi: Application of GPUs in High Energy Monte Carlo Simulations, GPU Nap 2011, MTA KFKI RMKI Budapest

**Final Summary Report on
"Jet fragmentation and Final State Effects in Heavy-Ion Collisions at RHIC and
LHC Energies"
PD 73596 OTKA proposal**

Gergely Gábor Barnaföldi

Introduction

The aim of the PD73596 OTKA project was the theoretical description of the jets and hadron spectra measured in high-energy nucleon-nucleon collisions at RHIC Brookhaven and at LHC CERN Geneva. My research primary focused on the modeling hadronization processes for which next to the two above mentioned particle accelerators, the earlier Tevatron (USA) and CERN LEP data were also applied. Several spectra measured in electron-positron, proton-proton, proton-nucleus, and nucleus-nucleus collisions were analyzed.

During my theoretical investigations I updated my earlier pQCD program code, which now can be applied for calculations for processes at LHC energies, moreover it provide a framework to include newly developed fragmentation functions or models easily. Another program code to fit parameterized fragmentation functions is under test. In parallel my theoretical researches I participated in the research and development of the proposed subdetector of the ALICE experiment, the so called VHMPID, where background analysis and calculations were done based of my theoretical model.

My result were presented on 23 international and Hungarian topical conferences, and 4 seminar were given also. I participated in 14 Science PR event, my talks were presented for elementary and high schools students, for National Geographic Hungary, HVG journals, and for the "From the Atoms to Stars" series. During the 3 and half year of the project my results were presented on 17 posters, 20 publication including 11 peer-reviewed regular scientific journal. My total impact factor for the whole period is 28.57.

In connection to my project I could lead 3 students, who got 2 first prize and 1 honourable prize on the OTKD 2011 conference. Under my supervision all students got their BSc diploma, and now preparing for their MSc works.

The main research directions and my results

The PD73596 OTKA project focused on the theoretical investigation of hadronization and fragmentation in high-energy collisions. I used various models to be discussed in details, based on the points below. Note these induced further sub-studies, which I also mention.

- (i) Theoretical description of measured hadron spectra and nuclear effects in hadron-hadron collisions of RHIC and LHC [1,2,3,4,5,7,9,20,].
- (ii) Investigation on geometrical description of hadronization, based on a new definition of the underlying event, motivated by the jet-matter interaction studies [11,13,14].
- (iii) A new type of fragmentation function parameterization, based on non-extensive statistical models [15,16,17,18].
- (iv) Analysis and simulation of hadron spectra for the proposed CERN ALICE VHMPID experiment [6,10,12,19].

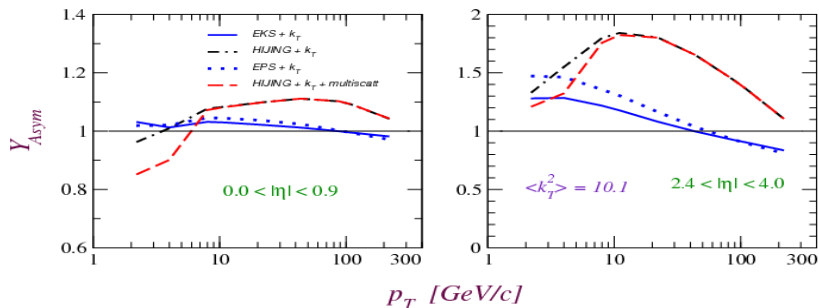
(i) Theoretical description of hadron spectra and nuclear effects

In the first term of OTKA project the theoretical analysis of the proton-proton data using a pQCD code. For this task I started to investigate of jet production and jet properties (spectra, jet-cone angle, scale, energy dependence) and understanding mechanisms of the jet production at higher energies in NLO. I compared jet-cone variables to RHIC and Tevatron data, and I made predictions for the LHC. This work was summarized in a talk at the "High- p_T Physics for the LHC" conference.

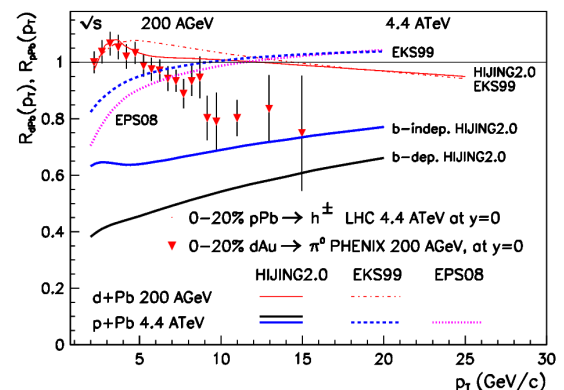
I analyzed how to model the anomalous proton-to-pion ratio measured in proton-proton collisions at RHIC. I compared results given by our pQCD based parton and to a so called coalescence model. I could reproduced values measured by STAR at RHIC and predicted the ratio for LHC also, which was published in J. Phys G [2,3]. I also investigated theoretically the way for a possible measurement on identification of quark and gluon jets in 3-jet-events of the LHC's proton-proton collisions. Results were presented on a poster at QM 2009 conference [P3].

In parallel to the above, investigation of heavy-ion collisions were also done. I developed the existing pQCD program code with the latest version of the AKK NLO fragmentation function for calculating pion, kaon and proton productions. By this update, the pQCD code was capable to analyze a rapidity-dependent nuclear

property, the so called rapidity asymmetry. I could test and compare my program code with a separate one in parallel, on the reconstruction of the rapidity asymmetry factor measured recently in dAu collisions at the RHIC. Predictions were also carried out for the expected value of this nuclear property at LHC energies (see Figure to the right). I pointed out the connection between nuclear modification factor and rapidity asymmetry, which can help to measure forward or backward nuclear modifications in a future experiment. Results were summarized in two conference proceedings [5] and in the PRC [4]. Furthermore, investigation on the dependence of the rapidity asymmetry on the fragmentation were presented as a poster at QM 2009 conference [P2].



The upgraded pQCD-based program code was capable to make prediction for spectra will be measured in the 4.4 ATeV pPb collisions planned to run in 2012. Furthermore, I presented the uncertainty of nuclear modification the high-energy nuclear effects, which will present in $R_{pPb}(p_T)$ via measurements. It become clear the nuclear shadowing parameterizations might cause strong (15%-50%) suppression factor at the LHC in the 2–10 GeV/c transverse momentum region. These parameterizations however, works similarly at RHIC energies in dAu collisions, at LHC energies 40% difference will appear (See more on Fig to the right). I could compare my pQCD calculation to a an upgraded version of NIJING Monte-Carlo , which was published finally in Phys. Rev. C [7,20].

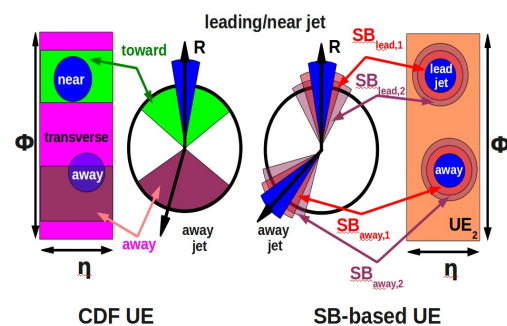


In case of nucleus-nucleus collisions two further analysis has been done for RHIC and LHC energies. I investigated the behavior of the non-Abelian induced jet energy loss, applying the first order Gyulassy-Levai-Vitev (GLV) jet-quenching model in central AuAu and PbPb collisions the possible highest transverse momenta of RHIC and LHC experiments [1]. I could propose, the strength of the jet-suppression getting weaker as reaching higher transverse momenta values. This results was proved by the first experimental results from the LHC at QM 2011 conference.

(ii) Investigation on the geometry of the hadronization – „underlying event” analysis

Hadron-hadron angular correlations and jet analysis are excellent tools to map the spatial structure and space-time evolution of hadronization processes. Furthermore, information on hadronization can be obtain via testing the background of a triggered high transverse momentum hadron-hadron correlations.

In a study hadron content of the background was investigated in a triggered angular hadron-hadron correlation. I presented, how the geometry of identified hadron production is changing via varying e.g. c.m. energy, type of the trigger hadron, or the width of transverse-momentum distributions. This work was also presented on Hot Quarks 2010 and on HCBM 2010 conferences [P8]. Contribution were published in J. Phys. CS [11] and in Eur. Phys. Journal [13]. The UE is the remnants of an event, after identified jets were removed from the there. Parallel to the continuation of my angular-correlation studies, we developed a new definition for the so called “Underlying Event” (UE). This can be investigated via surrounding belts defined concentrically around the jets. We assume, the remnants of jet-matter interaction might be detected via UE analysis in events from nucleus-nucleus collisions. Our method was presented on proton-proton collisions on the High- p_T Physics for the LHC 2010” workshop, and published in JPG CS and in AIP CS [14].



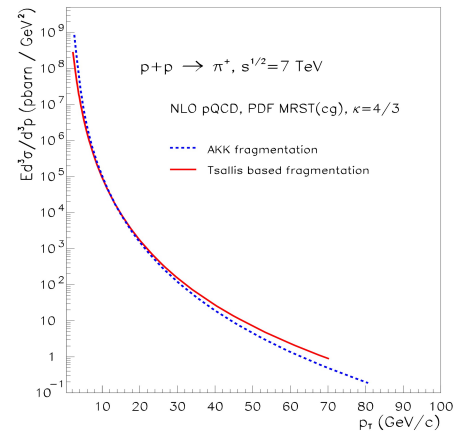
Connected to my simulation research a new special method were developed, which enable to use the graphical processing units (GPU) of computers instead of the standard CPU. Via this method numerical simulations on GPU can be speed up compared to the CPU calculations. The code was merged with the AliROOT, the standard analysis framework of the ALICE experiment. The structure of the code was general also to be able to run on the LHC GRID network is GPUs exist on a given computer node. The computer code and the first results were presented on the GPU Day 2010 and GPU Day 2011 – organized by me, where results were show on posters[P5,P12,P17]. Summary publication is expected to be submitted soon.

(iii) Investigations of a novel fragmentation model

The non-extensive statistical approach is a completely novel theory, especially in the field of high-energy heavy-ion collisions. Within this it become possible to describe statistically/thermodynamically such a non-equilibrium system like jets or relativistic heavy ion collisions. This model provide a general formalism for the ambivalent hadron spectra: exponential distribution for low and power law at high transverse momenta. In this framework a consistent picture can be given for the hadronization/fragmentation. This was presented at the QM 2009, QM 2011, conferences and further international and domestic workshops [P1,P6,P13,P14,P15,P16].

Thanks to the success of the LHC facility at CERN, new hadron spectra from proton-proton collisions at 900 GeV, 2.36 TeV and 7 TeV c.m. energies have been available since the spring of 2010. Using our published analysis based on RHIC's 200 GeV c.m. energy experimental data in gold-gold collisions, I extended my earlier work for the latest measurements. Earlier, we assumed and fitted Tsallis-Pareto distribution for hadron spectra, extracting the effective temperature and the Tsallis q-parameter. Now, I discovered a scaling in these data, which was presented on international conferences namely: Jet Collaboration Meeting, Hot Quarks 2010, and the HCBM 2010 – organized in Budapest. Summary of the talks were published in J. Phys CS [15] and Eur. Phys. Journals [16].

Based on the above findings, one can assume Tsallis – Pareto-like distributions are originating from the fragmentation processes of partons. Testing this issue, the power-law-tailed AKK fragmentation function parameterization were re-fitted with and extended Tsallis – Pareto-like distribution. The re-fitted AKK parameterization were compared to original in an earlier used pQCD based parton model calculations (See Figure to the right). The way of the re-parameterization was presented at the Gribov '80 workshop, and published in a conference proceedings[15].



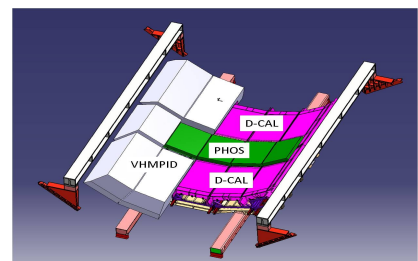
Based on my researches on the non-extensive statistics-based phenomenological model I could fit fragmentation functions, which are not the usual power-law-tailed, but Tsallis – Pareto-like. We could even fit such a distributions to data from the simplest, electron-positron collisions, which may led us to re-parameterize fragmentation functions. This result was published in Physics Letters B [17], and presented on the “High- p_T Physics for the LHC 2011” and “Quark Matter 2011” conferences [P13,P14].

Recently, we started to work on to test various theoretical assumptions (canonical or micro-canonical) on the earlier and latest RHIC and LHC data. This led us to precise description of hadron spectra and hadron ratios in electron-positron and proton-proton collisions. To obtain the best fit we developed a computer code in order to fit and understand the physical meaning of Tsallis parameters and the their dependence on final state effects. This code in under test now, and soon I can provide a Tsallis – Pareto-distribution based fragmentation functions.

Last, but not least we had the chance to organize an international workshop on “Hot and Cold Baryonic Matter 2010”, where C. Tsallis – the father of the non-extensive statistical physics – were invited. The contributions of the workshop was published in EPJ Conference Series, co-edited by me [16].

(iv) Hadron spectra for the proposed ALICE VHMPID detector

Using the developed analysis method and my results of my hadron-hadron correlation studies, I could contribute to the development of the proposed VHMPID sub-detector of the CERN LHC ALICE experiment (see on Figure to the right.) My simulation has been included to the R&D, and were published and in conference proceedings [6,12] and on poster presentations [P7,P9,P10,P11,P15]. The analysis study of mine including hadron spectra, jet study, and



hadron ratios, become part of the CERN ALICE VHMPID Letter of Intent too, which was submitted to the ALICE Collaboration Board in February 2012. The final decision on the acceptance of the LoI by the Board is expected to have by September 2012 [19].

Summary and outlook

The PD73596 OTKA postdoctoral project give me the chance to continue my theoretical studies following my PhD works, moreover to ignite and motivate a novel theoretical direction. Following my studies the non-extensive statistical approach is getting more conventional in the field of heavy ion physics. Even large experimental collaborations started to use these functions as a fitting function in their publications. Since other publication are still on the way, the 20 item list of publication will be extended by further works.

The updated pQCD code enable us to make further investigations and prediction for the high-energy nuclear effects in the future as reaching higher center of mass energies and luminosities at the LHC.

During the project I leaded 4 BSc/MSc student's work and participated in the motivation of PhD students of our group for common publications. I continuously emphasized the importance of public relations of science in general and especially my field for the next generation.

Publications

- [1] G.G. Barnaföldi, B.A. Cole, G. Fai P. Lévai: Where does the energy loss lose strength?, J.Phys.G35:104066, 2008 IF:5.270
- [2] P. Lévai, G. Papp, G.G. Barnaföldi, G. Fai: Pion production in dAu collisions at RHIC energy. EPJ ST 155: pp. 89-99. (2008) IF: 0.689
- [3] P. Lévai, G.G. Barnaföldi, G. Fai: The proton-to-pion ratio and the near-side jet correlation in pp and AA collisions, J. Phys. G35 104111, 2008 IF:5.270
- [4] A. Adeluyi, G.G. Barnaföldi, G. Fai , P. Lévai: Relativistic light-on-heavy nuclear collisions and the implied rapidity asymmetry, Phys. Rev. C80, 014903, 2009 IF:3.477
- [5] A. Adeluyi, G.G. Barnaföldi, G. Fai , P. Lévai: Expected nuclear modifications and pseudorapidity asymmetry in p(d)Pb collisions at the LHC, PoS HIGHPTLHC:016, 2009
- [6] A.G. Agócs, ..., G.G. Barnaföldi, et al.: Very high momentum particle identification at the LHC, Indian J.Phys. 84 (2010) 1635, 2010 IF: 0.291
- [7] G. G. Barnaföldi, G. Fai, P. Lévai, B. A. Cole and G. Papp: Cold nuclear modifications at RHIC and LHC, Indian Journal of Physics Volume 84, Number 12, 1721, 2010 IF: 0.291
- [8] G.G. Barnaföldi, P. Lévai, B. Lukács: Compact stars in Kaluza –Klein World, J. Phys.: Conf. Ser. 218 012010, 2010 IF: 2.124
- [9] G.G. Barnaföldi, V. Gogokhia: Vacuum Energy Density in the Quantum Yang -- Mills Theory, J.Phys. G37 025003, 2010 IF:1.170

- [10] A. DiMauro, ..., G.G. Barnaföldi et al.: The VHMPID RICH upgrade project for ALICE at LHC, Nucl.Instrum.Meth. A639 274, 2011 IF: 1.317
- [11] A.G. Agócs G.G. Barnaföldi, P. Lévai: Jets and Underlying Events at LHC Energies, J.Phys. CS. 270 012017,, 2011
- [12] A.G. Agócs, ..., G.G. Barnaföldi: VHMPID: a new detector for the ALICE experiment at LHC, EPJ Web of Conf. 13 03004, 2011
- [13] A.G. Agócs, G.G. Barnaföldi, P. Lévai: Underlying events in p+p collisions at LHC energies, EPJ Web of Conf. 13 04006, 2011
- [14] A.G. Agócs, G.G. Barnaföldi, P. Lévai: Underlying Event Studies for LHC energies., AIP Conf. Proc. 1348, 124, 2011
- [15] G.G. Barnaföldi, K. Ürmösy, T.S. Biró: Tsallis-Pareto like distributions in hadron-hadron collisions, J.Phys.CS. 270 (2011) 012008, 2011
- [16] G.G. Barnaföldi, T.S. Biró (eds.): HCBM 2010 – International Workshop on Hot and Cold Baryonic Matter Budapest, Hungary, August 15-20, 2010, EPJ Web of Conferences Vol. 13, 2011
- [17] K. Ürmösy, G.G. Barnaföldi, T.S. Biró: Generalised Tsallis Statistics in Electron-Positron Collisions., Phys.Lett. B701 (2011) 111, 2011 IF: 5.255
- [18] K. Ürmösy, T.S. Biró, G.G. Barnaföldi: Pion Production Via Resonance Decay in a Non-extensive Quark-Gluon Medium with Non-additive Energy Composition Rule, EPJ Web of Conf. 13 (2011) 05003, 2011
- [19] A.G. Agócs, ... G G Barnaföldi, et al: Letter of Intent of the Very High Momentum Particle Identification Detector for the CERN ALICE Experiment CERN-ALICE, 2012.
- [20] G.G. Barnaföldi, J. Barrette, M. Gyulassy, P. Lévai, V. Topor Pop: Predictions for p+Pb at 4.4A TeV to Test Initial State Nuclear Shadowing at Energies Available at the CERN Large Hadron Collider , Phys.Rev. C85 (2012) 024903 IF:3.416

Posters

- [P1] G.G. Barnaföldi, T.S. Biró, G. Fai, K. Ürmösy, P. Ván: Hadronization: Fragmentation or Non-Extensivity?, Quark Matter 2009 International Conference, 2009, Knoxville, USA
- [P2] A. Adeluyi, G.G. Barnaföldi, G. Fai, P. Lévai: Rapidity Asymmetry in p(d)A Collision, Quark Matter 2009, Knoxville, USA
- [P3] S. Pochybova, P. Lévai, G.G. Barnaföldi: Topological Study of Three-Jet events in ALICE, Quark Matter 2009 International conference, 2009

- [P4] G.G. Barnaföldi, B. Lukács, P. Lévai: Extra Dimensions in Compact Stars?, EMMI Workshop 2009, Wroclaw, Poland
- [P5] Nagy M.F., G.G. Barnaföldi et al: GPU gyorsítás az AliROOT keretrendszerhez, Fizikus Vándorgyűlés, Pécs
- [P6] Ürmössy K. Bíró T. Barnaföld: Nem extenzív hadroneloszlások RHIC és LHC energián, Fizikus Vándorgyűlés, Pécs
- [P7] Berényi D. et al.: VHMPID, egy új detektor a CERN ALICE kísérletében, Fizikus Vándorgyűlés, Pécs
- [P8] Agócs, G.G. Barnaföldi P. Lévai: Correlation of Identified Hadrons at RHIC and LHC Energies, HCBM 2010, Budapest
- [P9] D. Berényi et al.: New Detector for the CERN ALICE Experiment, HCBM 2010, Budapest
- [P10] Barnaföldi G.G. et al.: Sokszálas gáztöltésű detektorok fejlesztése a CERN ALICE és NA61 kísérleteihez, ELTE Innovációs nap 2011, Budapest
- [P11] Barnaföldi G.G. et al.: Sokszálas detektorok fejlesztése alkalmazott kutatásokhoz, ELTE Innovációs nap 2011, Budapest
- [P12] M.F. Nagy, G.G. Barnaföldi: Application of GPUs in Particle Physics Simulation, GPU Nap 2010, MTA KFKI RMKI, Budapest
- [P13] G.G. Barnaföldi, T.S. Biró, G. Kalmár, K. Ürmössy, P. Ván: Non-Extensive Approach to High-Energy Collisions, Poster presented at International Conference on Quark Matter 2011, 23-28 May 2011, Annecy, France, 2011
- [P14] K. Ürmössy, T.S. Biró, G.G. Barnaföldi, P. Ván: Tsallis Statistics in Fragmentation, Poster presented at International Conference on Quark Matter 2011, 23-28 May 2011, Annecy, France, 2011
- [P15] G. Hamar, G.G. Barnaföldi et al.: Very High Momentum Particle Identification Detector at CERN LHC ALICE, Poster: International Conference on Quark Matter 2011, 2011
- [P16] G. G. Barnaföldi, T.S. Biró, K. Ürmössy and P. Ván: Extensivity, nonextensivity and Zeroth Law, Poster: Joint European Thermodynamics Conference, JETC 11 Chemnitz, 2011
- [P17] M.F Nagy, G.G. Barnaföldi: Application of GPUs in High Energy Monte Carlo Simulations, GPU Nap 2011, MTA KFKI RMKI Budapest