

OTKA 49466-os pályázat szakmai zárójelentése

A nehézion-ütközésekben létrehozott új anyag tulajdonságainak elméleti és kísérleti vizsgálata

„A tökéletes folyadék felfedezésétől a kvark-gluon plazma kísérleti azonosításáig”

Résztevő kutatók:

Zimányi József (témavezető, 2005-2006)

Csörgő Tamás (résztevő kutató, majd Zimányi József elhunytá után témavezető 2007-)

Bíró Tamás Sándor (résztevő kutató)

Munkánkat számos fiatalabb kolléga és doktorandusz segítette, név szerint Csanád Máté (ELTE), Nagy Márton (ELTE majd KFKI RMKI), Novák Tamás (Nijmegeni Egyetem, majd KRF), Purcsell Gábor (BME), Ster András (KFKI MFA majd KFKI RMKI), Ván Péter (BME majd KFKI RMKI) Vértesi Róbert (Debreceni Egyetem majd KFKI RMKI), Ürmössy Károly (BME) valamint a senior kísérleti kollégák közül Sziklai János (KFKI RMKI). Szerepük különösen fontossá vált Zimányi József akadémikus elhunytá után. Őket úgy tüntettük fel, mint a projekt részttevő kutatói által szerzett tudományos közlemények társszerzőit.

Az eredményeink rövid összefoglalása:

Kutatási eredményeinket 132 referált folyóiratban megjelent közleményben jelentettük meg. Számos nemzetközi konferenciát szerveztünk, vagy voltunk a konferenciák nemzetközi tanácsadó testületeinek tagjai. Számtalan előadásban ismertettük eredményeinket mind itthon, mind külföldön, Brazíliától Észak-Amerikán át Európán keresztül Indiáig és Japánig.

Eredményeinket két, igen jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó publikáció foglalja mintegy keretbe, nevezetesen a zárójelentés közlemények rovatában a 9-es, és a 131-es publikációi. A 9. sz. publikáció a PHENIX kollaboráció működésének első 5 évét összefoglaló munka. Legfontosabb megállapítása, hogy a RHIC gyorsító Au+Au ütközéseiben egy új, igen forró és sűrű anyagforma jön létre, amely a várakozásokkal ellentétben nem az aszimptotikus szabadság következményeként várható, szinte kölcsönhatás mentes kvarkok és gluonok gázaként, hanem egymással erősen kölcsönható szabadsági fokok folyadékaként viselkedik. **A tökéletes folyadék felfedezésének kiemelkedő sikerét nem csak a felfedezést bejelentő brookhaveni sajtótájékoztató és az azt követő népszerű tudományos közlemények serege jelentette, hanem a kiemelkedő számú, a zárójelentés beadásáig beérkezett 869 hivatkozás is szépen mutatja.** Csörgő Tamás lényegesen járult hozzá ennek a publikációnak a sikeréhez a tökéletes folyadék kép helyességének, alkalmazhatóságának a kiemelésével, a cikk részletes belső referálásával és a cikk konklúziójához adott lényeges hozzájárulással.

Ezeket a kísérleti eredményeket részletes elméleti hidrodinamikai publikációkkal is alátámasztottuk, és azokat lényegesen kiegészítettük, melyeket alább részletesebben is ismertetünk. Számos új és alapvető elméleti eredményt értünk el továbbá a nem-extenzív termodinamika elméletében és nehézion-fizikai alkalmazásaiban, továbbfejlesztettük az ALCOR és a Buda-Lund modelleket, új eredményeket értünk el a kvantum-statisztikus korrelációk és kvantum-optikai módszerek nagyenergiás fizikai alkalmazásai területén. Tárgyaltuk a préselt kvantum-állapotok megjelenésének megjósolását a nagyenergiás fizikában, és az ezzel kapcsolatban a PHENIX előzetes státuszú kísérleti eredményeket is bemutattunk pl a WPCF 2009 konferencián a CERN-ben 2009 őszén.

Részletesebb eredményeink:

Zimányi József akadémikus váratlan halála miatt az általa vezetett területeken és irányokban kutatásaink némileg eltértek a tervezettől, a témavezető halála miatti veszteséget az OTKA által engedélyezett módon, fiatalok bevonásával mérsékeljük. A veszteség azonban lényegileg pótolhatatlan.

Bizonyára Zimányi József is örömmel fogadta volna azonban a BNL RHIC gyorsító PHENIX kísérletének legújabb eredményeit, melyekhez a PHENIX elektromágneses kaloriméterek foton időzítéseinek recalibrálásával csoportunk is lényegesen hozzájárult, és amelyek alapján **a RHIC programjának első szakasza** a kvark-gluon plazma azonosításával, kezdeti, legalább 300 MeV-es hőmérsékletével, az elliptikus folyási paraméterek kvarkszám skálázásának kimutatásával sikeresen, **a kvark-gluon plazma felfedezésével** és szinte tökéletes folyadékként történő viselkedésével **sikeresen lezárult**. A közlemények listájában 131-es sorszámommal megadott Phys. Rev. Letters cikkünk volt az első szakfolyóiratban megjelent cikk, amely lényegesen a hadronok létezésének határhőmérséklete feletti értéket közölt szakmai folyóiratokban. „Ezek az adatok a RHIC-nél előállított kvark-gluon plazma hőmérsékletének első kísérleti meghatározását jelentik” - nyilatkozta Stephen Vidgor, az USA Brookhaveni Nemzeti Kutató Intézetének RHIC programért felelős igazgatóhelyettese.

Nem várt további siker volt a Zimányi akadémikus által kifejlesztett ALCOR kvark-koaleszcencia modell illetve további más modellek sikeres alkalmazása az h' mezonok tömegsökkentésének, valamint a királis UA(1) szimmetria helyreállítódásának magyarázatára, a mért korrelációs szignatúrák értelmezésére. Kutatásainkat tovább folytatjuk majd a QCD kritikus pontjának kísérleti meghatározása és a királis dinamika kísérleti tanulmányozásának céljával.

Kísérleti eredmények a PHENIX kollaboráció keretében:

A RHIC 200 GeV-es Au+Au ütközéseiben létrehozott új anyag kvarkok erősen kölcsönható, közel tökéletesen folyó folyadéka, melynek kezdeti hőmérséklete és energiasűrűsége jóval meghaladja a kvark-gluon plazma létrehozásához szükséges 170 MeV és 1 GeV/fm³ értékeket.

Kutatás témánk megpályázott címe a nehézion ütközésekben létrehozott új anyag tulajdonságainak a vizsgálata volt. Pályázatunk indulásakor ugyanis ismert volt már, hogy a RHIC 200 GeV-es Au+Au ütközéseiben új jelenség lép fel: a nagy transzverz impulzusú részecskék számaránya lecsökken a Glauber számítások és a p+p ütközésekben lejátszódó nagy transzverz impulzusú folyamatok számához képest. Ezt az eredményt a PHENIX kísérlet a Physical Review Lettersben címlapon megjelent publikációban közölte 2002-ben [z1], majd a teljes RHIC energián, 200 GeV nukleononkénti bombázó energián is megerősítette 2003-ban [z2]:

2003 során ellenpróbát végeztünk d+Au ütközésekkel, ahol megállapítottuk, hogy a nagy impulzusú részecskesugarak elnyomása a d+Au ütközésekben nem jelenik meg, tehát az Au+Au ütközésekben megfigyelt részecskesugarak elnyomása nem a kezdeti állapot módosulása miatt, azaz nem a struktúra függvények nukleáris modifikációjából következik, hanem egy új anyagforma létrejöttének a következménye.

Ezen korábbi eredmények alapján megállapíthattuk, hogy a RHIC 200 GeV-es Au+Au nehézion-reakcióiban új anyagforma jelenik meg, és pályázatunk célja ennek az anyagformának a tulajdonságainak a részletesebb jellemzése, kísérleti és elméleti meghatározása volt.

A PHENIX-en belüli aktivitásunk a budapesti PHENIX PC klaszter hardver bővítésére, diszkszerver beállítására, az adatfelvételben és az adatok feldolgozásában való részvételre koncentrált. Csörgő Tamás a PHENIX tudományos vezetőjének felkérésére tagja lett a QCD másodrendű

fázisátmenetéhez tartozó kritikus pont keresésének stratégiáját kidolgozó PHENIX Low Energy Task Force műhelynek, mely mintegy 100 oldalas, nem nyilvános belső anyagban készítette el a QCD kritikus pontjának meghatározására vonatkozó PHENIX stratégiát. Számos más PHENIX-es belső analízis jegyzetet készítettünk, és számos belső előadást tartottunk a PHENIX adatok elemzésével és a detektor üzemeltetésével, alrendszerének kalibrációjával kapcsolatosan.

A zárójelentéshez csatolt közleményjegyekben a 9-es számozású, Nucl. Phys. A-ban a pályázati időszak első évében, 2005-ben megjelent publikációban megállapítottuk, hogy **ez az új anyagforma szinte viszkozitás nélküli, tökéletes folyadékként viselkedik**. Erre a publikációnkra a mai napig **869 hivatkozás** született. A BNL a RHIC gyorsítónál működő mind a négy kísérlet: a BRAHMS, a PHENIX, a PHOBOS és a STAR összefoglaló cikkeinek elfogadása után sajtótájékoztatót adott ki az új halmazállapot, a szinte elhanyagolhatóan kicsi kinematikai viszkozitással áramló, közel tökéletes folyadék felfedezéséről, melyet szinte minden mérvadó tudományos ismeretterjesztő fórum átvett. **Eredményünket az Amerikai Fizikai Intézet (American Institute of Physics, AIP) a 2005-ös év legfontosabb eredményeként emelte ki az egész fizika területén (AIP Top Physics Story 2005).**

A különféle hadronok számarányának, valamint a hadronok impulzuseloszlásainak meghatározása alapján ennek a tökéletes folyadéknak a hőmérsékletére mintegy 170 MeV-es kémiai és 140 MeV-es kinetikus kifagyási hőmérsékleti érték adódott [9].

2010 februárjában az USA Brookhaveni Nemzeti Kutató Intézete újabb sajtótájékoztatót tartott, melynek fő témája a kvark-gluon plazma előállításához szükséges hőmérsékletek, a $T \geq 300$ MeV-es hőmérsékleti tartomány elérésének publikációja volt. Ennek alapja a PHENIX kísérletnek a jelen Zárójelentés „közlemények” rovatában a 131. sz. publikációja, mely a direkt fotonok spektrumát határozza meg, $T = 224 \pm 19 \pm 19$ MeV értékben. Ehhez a publikációhoz a PHENIX elektromágneses kaloriméterek (PbGl, PbSc) valamint a repülési idő spektrométer (TOF) valós adatokon történt repülési idő kalibrációjának elvégzésével járultunk hozzá. A 131. publikáció eredményeire melyet hivatkozott a „Nature News” illetve az American Institute of Physics „Inside Science” elektronikus archívuma is, ami az AIP „Top physics story” megújult formájának is tekinthető. **Noha ez a közlemény friss, 2010 elején közölte a Physical Review Letters, a zárójelentés leadásáig ez a munka 59 hivatkozást kapott.** Ezekkel a **direkt foton spektrumokra vonatkozó PHENIX-es mérési adatainkkal csak olyan hidrodinamikai számítások egyeztethetőek össze, amelyben a táguló anyag kezdeti hőmérséklete legalább 300 MeV értékű volt [131].** Ennek a számnak az a jelentősége, hogy ismert, hogy nulla hőmérsékleten a hadronok száma közel exponenciálisan emelkedik a tömeggel, a növekedést a Hagedorn hőmérséklet, $T_H \sim 170$ MeV kvantifikálja. Ha a kezdeti hőmérséklet a $T \geq 300$ MeV-es tartományban van, akkor az általunk ismert hadronok bázisán divergáló állapotösszegeket kapunk, **azaz ilyen magas kezdeti hőmérsékleteken a hadronok helyett más szabadsági fokok alkotta anyagforma jön létre.**

Kiemelt figyelmet fordítottunk az elliptikus folyás skálaviselkedésének analízisére. A PHENIX kísérletben új skálaváltozót bevezetve igazoltuk, hogy a tökéletes folyadék hidrodinamika egzakt megoldásainak jóslata teljesül a RHIC Au+Au és Cu+Cu ütközéseiben. A hadronokat alkotó vegyérték kvarkok számával átskálázva a transzverz kinetikus energia nevű skálaváltozót, olyan új skálaváltozót vezettünk be, amelynek segítségével a hidrodinamikai és az átmeneti 2-5 GeV-es transzverz impulzus tartományban közös skálaviselkedés lép fel. Az elliptikus folyás kvarkszámok szerinti skálázásának felismerésével részletesen kimutattuk [48, 49, 83, 84, 118], hogy a tökéletes folyadék kvark szabadsági fokokkal rendelkezik, ugyanis a hadronokat alkotó kvarkok számával átskálázva a részecskék transzverz kinetikus energiáját valamint elliptikus folyási paraméterét, adategybeesést, univerzális skálaviselkedést kapunk.

Nem-extenzív termodinamikai modellek és a Tsallis eloszlás alkalmazásai a nagyenergiás fizikában:

Kutatásaink kezdetén, még 2005 során megmutattuk, hogy a nehézion reakciókban keletkező constituens kvarkok effektív tömegeloszlásának figyelembevételével biztosítható az energia megmaradás a coaleszcencia hadronizációs folyamatban [1]. Ezen felül a keletkező hadronok impulzuseloszlásai rendellenességére is jó magyarázatot kaptunk [12,13]. Kidolgoztunk egy nem extenzív Boltzmann egyenleten alapuló hadronizációt leíró modellt [14].

2006-ban a nagyenergiás nehézionfizika statisztikus modelljeit továbbfejlesztettük a korábbi években kialakított nézőpont szerint [16]. A kvarkanyag tulajdonságainak vizsgálatát folytattuk a hatványeloszlást generáló parton ütközési modellben, amely a Boltzmann egyenlet nem-extenzív energia-kompozíciós általánosításán alapul [17,18]. Új eredményünk **a termikus kiegyenlítődés bemutatása a kinetikus modell keretei között a különböző nem-extenzivitási paraméterekkel leírt alrendszerek között** [19].

A kvarkanyag termodinamikáját a kvázirészecske modell folytonos tömegeloszlású változatában tanulmányoztuk. Számunkra is váratlan módon **a rács-QCD állapotegyenleti adatok egy tömegugrás (legalacsonyabb kinematikai tömeg) jelenlétét szuggerálják analízisünk alapján** [16,18]. Eredményünk alátámasztására alkalmaztuk az általános Markov egyenlőtlenséget a kis tömegek jelenlétének valószínűségi felső korlátot szabva a hőmérséklet – nyomás görbe alapján [16]. A tömegugrás és az állapotegyenlet kapcsolata különösen érdekes a színbezáras és a Witten és Jaffe által javasolt, a Yang-Mills elméletekben megjelenő dinamikus tömegugrás (mass gap) lehetséges kapcsolata miatt [17,18].

A rács QCD szimulációk által szolgáltatott állapotegyenletet tömegeloszlással rendelkező kvarkanyag képen interpretáltuk. Az adatok illesztésével **meghatároztuk a tömeges kvázirészecskék tömegeloszlását, melynek nagy tömegekre hatványfüggvény alakját igazoltuk, és valószínűsítettük, hogy kis tömegek esetében pedig létezik egy tömeg küszöb, mely alatti gerjesztések kizártak** [67].

A hadronizáció alatti entrópia-növekedést megvizsgáltuk. A nehézion-ütközésekben mért elliptikus folyási és HBT sugárparaméter adatok gyors hadronizációra utalnak, amely viszont a kvark-koaleszcencia képen értelmezhető. Ennek realitását azonban többen kétségbe vonták, mivel **a kvarkok koaleszcenciája entrópia csökkenéshez is vezethet, amely ellentétes lehet a termodinamika alapelveivel, kivéve, ha a koaleszcencia alatti időszakban robbanásszerűen tágul is ez a forró és erősen kölcsönható anyag**. Megvizsgáltuk a jelenleg ismert legpontosabb rács QCD számítások által jósolt állapotegyenleteket, az entrópia megmaradás szempontjából [52]. Megmutattuk, hogy ezek a rács QCD adatok, és a termodinamikai alapelvek, az entrópia megmaradása vagy nem növekedése összefér az adiabatikus tágulás lehetőségével. Ha ideális gáz képen értelmezzük a rács-QCD állapotegyenletét, akkor ezen gázok szabadsági fokainak a száma éppen egy 2 és 3 közötti arányban csökken a tágulás során, amely arány pontosan megfelel annak, amekkora csökkenést a kvark-koaleszcencia képe alapján várhatunk [68].

A szokásostól eltérő, ún. nem-extenzív termodinamika alapjául szolgáló entrópia-képletek és kanonikus energia-eloszlások kialakulását magyarázó új elvet tártunk fel: **matematikai levezetéssel bebizonyítottuk, hogy az absztrakt kompozíciós szabályok sokszoros ismétlésük során olyan aszimptotikus szabállyal lesznek egyenértékűek, amelyek asszociatívák és kommutatívák**. Ez lehetővé teszi egy formális logaritmus explicit megalkotását a szabály alapján, s ezzel az általános

entrópia-sűrűség, valamint egyensúlyi energia-eloszlások meghatározását. Eredményeinket alkalmaztuk a nagyenergiás részecskék hatványfarkú energia-eloszlásainak modellezésére. **Eredményeink** összefüggnek a csatolt stohasztikus folyamatok stacionárius eloszlásának Born-Oppenheimer közelítésével, s így **széles körben, pl. pénzüpiaci modellfolyamatokra is, alkalmazhatók [103].**

Új eredményeink a relativisztikus hidrodinamikában:

Fontos új elméleti eredményünk volt 2006 során **a relativisztikus hidrodinamika új megoldáscsaládjainak feltárása.** Ennek segítségével kimutattuk, hogy a Bjorken formula legalább egy kettes faktossal alábecsli a RHIC Au+Au nehézion ütközéseinek kezdeti szakaszában kialakult energiasűrűséget, mivel nem veszi figyelembe a longitudinális tágulás során végzett munkát. Ez a munkavégzés relativisztikus gyorsulást okoz a longitudinális irányban. A korrekció nagyságát tovább növeli az, ha az állapotegyenlet realiztikus: ha az átlagos hangsebesség PHENIX által meghatározott $c_s \sim 0.33$ értékét is figyelembe vesszük, **a 200 GeV-es Au+Au reakciókban a $\tau = 1$ fm/c sajátidőre becsült kezdeti energia-sűrűség értéke $15 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ [65,81,82]. Ez az érték háromszorosa a Bjorken-becsülés alapján kapott $\epsilon_{Bj} \sim 5 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ kezdeti energiasűrűségnek, és több mint egy nagyságrenddel meghaladja a rács-QCD számítások alapján várható, a hadronikus anyag megolvasztásához szükséges kritikus $\epsilon_c \sim 1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ értéket.** Ez olyan magas szám, amelyet korábban csak az LHC nehézion-ütközéseinek kezdeti szakaszában vártak. Hasonló elvi okok miatt a Makhlin-Sinyukov formulával becsült átlagos kifagyási idő is ténylegesen rövidebb a reakció valódi kifagyási idejénél, ez a kifagyási időre vonatkozó korrekció mintegy 20 %-os [65, 92, 93].

A másodrendű (Israel-Stewart típusú) hidrodinamika származtatására kidolgoztunk egy termodinamikai ansatzot, amely a belső energia relativisztikus rendszerekben való különválasztásának egy speciális módját követi [101]. A hőáram és a viszkozitás relaxációs egyenletei levezethetők ennek alapján, s ezek kauzálisnak s homogén stabilnak bizonyultak. Ez egy jelentős előrelépés az ad hoc Israel-Stewart elmélettel szemben. A nehézionfizikai elméleti modellek a kvarkanyag és a hadronikus felhő tágulásának leírására gyakran alkalmaznak hidrodinamikai modelleket. **A RHIC kísérleti adatok azt mutatják, hogy az elméletileg lehetséges legalacsonyabb viszkozitás érték közelében levő alacsony viszkozitást kell feltételezni a kvark-gluon plazmában.**

Új elméleti eredményeink a részecske-korrelációs és a femtoszkópiai kutatásaink területén:

Összefoglaló tanulmányt publikáltunk a Hanbury Brown – Twiss (HBT) korrelációk kutatásának első 50 éve alkalmából [39]. Megjósoltuk, hogy a HBT korrelációs függvények alapja a QCD kritikus pontjának közelében Lévy típusúvá válik, és a karakterisztikus Lévy stabilitási index megegyezik majd a kritikus pont korrelációs exponensével [41]. Összefoglaltuk az általunk Budapesten megrendezett Quark Matter 2005- 18th International Conference on Ultrarelativistic Nuclear Collisions konferencia legfontosabb eredményeit [40], melynek során először jelezhattük a hadronikus állapotokon túlmutató, kvarkszámok szerinti skálázás fontosságát, a kvarkanyag egyik fontos tulajdonságát.

Javasoltuk, hogy **a kritikus opaleszcenciát mint módszert alkalmazzuk a QCD kritikus pontjának meghatározására indított kísérleti programban a kritikus pont lokalizálására,** és ehhez egyesítsük a nukleáris modifikációs faktor által mért intenzitás csökkenést és a HBT sugarak által mért geometriai távolságot egy kísérletileg is jól alkalmazható opacitás definícióban [53, 122].

Megvizsgáltuk a préselt előre-hátra részecske-antirészecske korrelációkat és megállapítottuk, hogy a hadronok közegbeli tömegmódosulásának ezt a jelét várhatóan sem a tűzgömb tágulása, sem pedig a tömegmódosulás frakcionális térfogatban való jelenléte nem nyomja el teljesen, habár a szignál várható nagyságát mindkét effektus lényegesen csökkentheti [37,38]. Fontos elméleti eredményünk volt, hogy megmutattuk: **a hadronok forró, erősen kölcsönható anyagban fellépő tömegmódosulása által okozott, ellentett impulzusú részecske-antirészecske párok között fellépő korreláció a hadronikus szabadsági fokok megszűnésével, a kvark szabadsági fokok megjelenésével egyszerre tűnik el, ezért a hadron-kvarkanyag átmenet szignatúrájaként használható** [64]. Kísérleti fizikai szempontból lényeges érzékenységi vizsgálatokat végeztünk a hadronok közegbeli tömegmódosulásának jeleként várt préselt állapotokból fakadó előre-hátra részecske-antirészecske korrelációkra.

Tovább folytattuk a Buda-Lund hidrodinamikai modell kutatását, publikáltuk az elliptikus folyási paraméterek és **az azimutálisan érzékeny HBT sugarak** közötti összefüggéseket [80, 82, 83]. Megjósoltuk, hogy a kaonok HBT sugarai pontosak követik a pionok HBT sugarai által meghatározott skálagörbét [82].

A multiplicitás eloszlások és a Bose-Einstein korrelációk között új kapcsolatokat határoztunk meg a A. Mekjinnak, a Rutgers egyetem kutatójának vezetésével [50, 77].

A hidrodinamikai modellek keretein túlmutató **hadron-kaszád modell számításokat végeztünk** a Hadron Rezonancia Kaszád vagy Humanic's Resonance Cascade (HRC) modell segítségével. Megmutattuk, hogy a modell jóslatai (azaz a forráseloszlás hatványfüggvényszerű lecsengése, lecsengést jellemző hatványkitevő centralitástól és impulzustartománytól való függetlensége, a kitevő hatáskeresztmetszet szerinti rendezettsége az **anomális diffúzió** segítségével értelmezhető, ez alapján megjósoltuk, hogy **a kaon forráseloszlás hatványfüggvény szerint legcsengő része jelentősebb lesz, mint a pionok hasonló forráseloszlásának a lecsengő része** [54]. Rámutattunk arra is, hogy az anomális diffúzió nem változtatja meg a forrásfüggvényt jellemző HBT sugarak értékét, és a forrásfüggvény kis távolságokon való viselkedését [54]. Ezen **elméleti jóslatainkat a PHENIX kísérlet kaon-korrelációs mérései igazolták** [115].

Kimutattuk, hogy **az e+e- ütközésekben a Bose-Einstein korrelációk lényegesen különböznek a hadron-hadron vagy a nehézion-ütközésekben fellépő korrelációtól**: míg a hadronikus és nehézion-ütközésekben a Bose-Einstein szimmetrizáció csak pozitív korrelációkat okoz, az elektron-positron annihilációkban negatív korrelációk is fellépnek közepes, 1 GeV körüli relatív impulzus skálákon, amelyek mintegy kiegyenlítik a kis ($Q < 0.5$ GeV) relatív impulzusskálákon fellépő pozitív korrelációkat [66]. Tehát az elektron-positron annihilációkban a Bose-Einstein szimmetrizáció hatása gyakorlatilag közelebbi relatív impulzusskálákra helyezi az azonos pionpárokat, ezáltal nem csak pozitív definit korrelációkat, hanem bizonyos relatív impulzus skálákon antikorrelációkat is okozhat [132]. Módszertadtunk az elektron-positron annihilációkban a részecskekeltés téridőbeli lefolyásának helyreállítására [95].

A publikált STAR és PHENIX korrelációs függvények $\lambda(m_i)$ intercept paraméterének részletes elemzéséből arra következtettünk, hogy **a RHIC 200 GeV-es Au+Au ütközéseiben az η' mezonok jelentős, legalább 200 MeV-es tömegcsökkenést szenvednek el, ami az ütközésekben a királis dinamikáról, azaz az $U_A(1)$ szimmetria helyreállításáról hordoz alapvető információkat**. Eredményünk volt az egyetlen magyar „flash” plenáris előadás a Knoxville-i (TN, USA) Quark Matter 2009 konferencián [119,120,123]. Ezen megfigyelések összhangban vannak a PHENIX kollaboráció direkt foton és dilepton spektrumaival [131,132] melyeknek részletesebb elemzése további kutatásaink

tárgyát képezik, túlmutatnak a lezárt OTKA pályázat jelentésbe foglalható keretein.

Konferencia és tudományos iskola szervező tevékenység:

A kutatási időszak első évében, 2005-ben rendeztük meg Budapesten szakterületünk világkonferenciáját, a Quark Matter 2005: 18th International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus collisions címmel. A konferenciának Csörgő Tamás társelnöke, Lévai Péter pedig elnöke volt. A konferencia nyitóelőadója az a Roy J. Glauber volt, aki 2005-ben fizikai Nobel díjat nyert, látogatását Csörgő Tamás szervezte. Ő volt a felelős a rendezvény rendezési jogának elnyeréséért és a szervezés amerikai anyagi támogatásának megszervezéséért is. Ez a konferencia igen nagy szakmai sikert hozott, mintegy 600 résztvevő jött el 5 kontinens 31 országából.

Tizennégy további jelentős nemzetközi tudományos konferenciának voltunk tanácsadói (International Advisory Committee tagok), négynek szervezői (session convener). Nevezetesen Csörgő Tamás az ISMD (International Symposium on Multiparticle Dynamics konferencia sorozat International Advisory Committee tagja 2005, 2006, 2007, 2008 és 2009-es években, a WPCF: Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy konferenciasorozat International Advisory Committee tagja 2005, 2006, 2007, 2008 és 2009-es években. Bíró Tamás a Strangeness in Quark Matter konferencia sorozat International Advisory Committee tagja a 2006, 2007, 2008 és 2009-es években. A hagyományoknak megfelelően, minden évben nagy sikerrel rendeztük meg a Zimányi Nehézionfizikai Téli Iskolát, összesen öt alkalommal a kutatási időszak alatt, részletesebben a <http://zimanyischool.kfki.hu/> honlapon láthatjuk ezeknek a rendezvényeknek a programjait. Az utóbbi években ezen iskolán mintegy 60 fő vesz részt évente, közülük mintegy 20 fő általában diák, a részvétel pedig nemzetközi.

Zimányi professzor úr, a jelen OTKA téma korábbi témavezetője emlékére megrendeztük a Zimányi 75 Memorial Workshopot, 75. születésnapja tiszteletére rendezett emlékkonferenciát 2007-ben, melyen 46 döntően külföldi, vezető beosztású kutató vett részt, Zimányi József kortársai, tisztelői és tanítványai valamint tanítványainak tanítványai is.

Rendszeresen adtunk elő számos nemzetközi konferencián, meghívott előadásokat, kollokviumokat, szemináriumokat tartva, a kutatási téma vezető kutatói gyakorlatilag havonta tartottak ilyen előadásokat, a fiatalabb kutatótársaink pedig évente két-három ilyen előadást tartottak átlagosan, de ezeket nem részletezzük. Ki szeretném mégis emelni, hogy a WPCF 2009 konferencián a CERN-ben csoportunk tagjai 6 különböző, kísérleti és elméleti témájú előadást tartottak, mely előadások nagy számaránya jól fémjelzi csoportunk működésének nemzetközi elismertségét.

Kiegészítő hivatkozások:

A zárójelentés kontextusában fontos, de nem a jelen OTKA téma kutatásaihoz tartozó publikációink (a jelen téma publikációit a Zárójelentés Közlemények rovata tartalmazza)

[z0] Quark Matter 2005 konferencia archívuma:
<http://qm2005.kfki.hu/>

[z1] K. Adcox et al, PHENIX Collaboration,
Suppression of hadrons with large transverse momentum in central Au+Au collisions at $s(NN)^{1/2} = 130\text{-GeV}$.
Phys. Rev. Lett. 88:022301,2002.
<http://arxiv.org/abs/nucl-ex/0109003>
(536 hivatkozás)

[z2] S. S. Adler et al, PHENIX Collaboration,
Suppressed π^0 production at large transverse momentum in central Au+ Au collisions at $S(NN)^{1/2} = 200\text{ GeV}$.
Phys.Rev.Lett.91:072301,2003.
<http://arxiv.org/abs/nucl-ex/0304022>
(416 hivatkozás)

[z3] S. S. Adler et al, PHENIX Collaboration,
Absence of suppression in particle production at large transverse momentum in $S(NN)^{1/2} = 200\text{-GeV}$ d + Au collisions.
Phys.Rev.Lett.91:072303,2003.
<http://arxiv.org/abs/nucl-ex/0306021>
(327 hivatkozás)

[z4] American Institute of Physics, *Top Physics Story 2005:*
<http://www.aip.org/pnu/2005/split/757-1.html>

[z5] „*Quark Soup*” press release, Brookhaven National Laboratory, USA, 2010 február 15:
Az American Physical Society 2010-es ülésével kapcsolatos cikkek, sajtóanyagok:
<http://www.phenix.bnl.gov/QuarkSoup.html>

[z6] A PHENIX kísérleten belüli aktivitásunkról részletesebben beszámol a
<http://phenix.elte.hu/> honlap.

[z7] A Magyar Tudományos Akadémia híre *a forró kvarkleves felfedezéséről a RHIC Au+Au kísérleteiben:*
http://www.mta.hu/index.php?id=634&no_cache=1&backPid=390&tt_news=120816&cHash=34a46b4ddc

[z8] *A Zimányi Nehézion-fizikai Téli Iskolák honlapja:*
<http://zimanyischool.kfki.hu/>