

# Relativisztikus nehézion-ütközések elméleti és kísérleti vizsgálata a RHIC-nél: fókuszban a nem-centrális ütközések

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE: Csanád Máté



FIZIKA DOKTORI ISKOLA  
RÉSZECSKEFIZIKA DOKTORI PROGRAM

ISKOLAVEZETŐ: Dr. Horváth Zalán  
PROGRAMVEZETŐ: Dr. Csikor Ferenc  
TÉMAVEZETŐ: Dr. Kiss Ádám, egyetemi tanár  
SZAKMAI VEZETŐ: Dr. Csörgő Tamás, tudományos tanácsadó

Eötvös Lóránd Tudományegyetem  
Természettudományi Kar  
Budapest  
2007

# 1. Témakör

*„Egyszerűen nem tudunk még eleget az elemi részecskék fizikájáról ahhoz, hogy bármilyen pontossággal kiszámítsuk egy efféle [a világegyetem születésekor jelen lévő] egyveleg tulajdonságait. . . . Ezért mikroszkopikus fizikai tudatlanságunk fátyolként homályosítja el a mindenség kezdetére szegezett tekintetünket.”*

S. Weinberg, az első századmásodpercről [1]

A nehézion-fizikában jelen pillanatban a legfontosabb és legérdekesebb kérdéseket a RHIC-nél, a relativisztikus nehézion-ütköztetőnél lehet feltenni a természetnek. Itt fénysebességhez igen közeli sebességű nehézionokat ütköztetnek egymással. Ezekben az ütközésekben az anyag olyan állapota jön létre, amilyen a Világegyetem létrejöttkor, néhány mikromásodperccel a Nagy Bumm után uralkodott. Emiatt a nagyenergiás gyorsítóknak zajló nehézion-ütközéseket – a bennük uralkodó óriási energiasűrűség és hőmérséklet miatt – Kis Bummnak is nevezhetjük.

Amikor a felgyorsított nehézionok – melyek a Lorentz-kontrakció hatására két lapos korongnak tűnnek – és összeütköznek, a létrejött hatalmas energiasűrűségnek köszönhetően anyaguk a megszokottól egészen eltérően viselkedik: a protonok és a neutronok megolvadhatnak, egy új, utoljára a világegyetem születésekor jelen lévőhöz hasonló közeget és új részecskék seregét létrehozva. A nagy energiasűrűség miatt a nyomás is igen nagy, ez pedig azonnal szétveti az addig kis térfogatba koncentrált anyagot, amely tágulni és hűlni kezd, majd mire – különféle, jól ismert részecskék formájában – az ütközési pont köré rendezett detektorainkba ér, újra a megszokott formáját mutatja. Az észlelt részecskék fizikai jellemzőit (impulzusát, energiáját, tömegét, töltését . . .) megmérve, eloszlásukat vizsgálva érdemi információt kaphatunk arról, hogy milyen is volt az az anyag, amely közvetlenül az ütközés után létrejött.

Detektoraink segítségével így különféle kérdéseket tehetünk fel a természetnek. Az egyik legfontosabb kérdés például, hogy kiszabadulhatnak-e nukleon-börtönükből a protonok és neutronok építőkövei, a kvarkok és a gluonok, és ha igen, mekkora energiára van ehhez szükség, illetve hogyan viselkedik ez az anyag. A kísérletek megkezdése előtt sok modellben tételezték azt fel, hogy ez az anyag kvarkok és gluonok szabad gázaként viselkedik és plazma állapotban van, és elnevezték a keresett anyagot kvark-gluon-plazmának. A helyzet azonban ahhoz hasonlatos, amikor a spanyol király megbízásából Kolumbusz elindult, hogy megtalálja a tengeri utat India felé: mi sem lehetünk biztosak benne, hogy azt találjuk, amit keresünk.

A RHIC-nél tehát az anyag nagy nyomások és hőmérsékletek hatása alatt tanúsított vi-

selkedését vizsgáljuk. A létrejövő részecskék sokfélesége és széles energiatartományban való előfordulása miatt detektorok egész sorára van szükség, hogy megfelelő képet kapjunk az ütközés során végbemenő folyamatokról. A RHIC gyorsítógyűrűjében az egymással szemben keringő nehézionok pályája hat ponton keresztezi egymást. Négy kereszteződésben telepítettek kísérletet, más és más speciális adottságokkal, hogy a kérdések minél szélesebb körére kaphassunk választ. Én ezen kísérletek közül a PHENIX együttműködésben dolgoztam.

## 2. Alkalmazott módszerek

2003-ban csatlakoztam a RHIC PHENIX kísérletéhez az ELTE részéről. Ekkor vált a három magyar intézmény – a Debreceni Egyetem, az ELTE és az MTA KFKI RMKI – a PHENIX intézményes tagjává Csörgő Tamás vezetésével. Ezen intézmények kutatói és diákjai számára lehetővé vált a PHENIX kutatásaiba való bekapcsolódás. Az elméleti számításokat is 2003-tól végeztem a témavezetőm, Csörgő Tamás által vezetett csoportban.

Mindezen munkákhoz szerteágazó ismereteket kellett elsajátítanom. Az egzakt, analitikus módszerek közül a hidrodinamikai jellegű differenciálegyenletek megoldásával foglalkoztam. Elmélyedtem a nehézion-ütközésekben a hidrodinamikai folyamatok során létrejövő végállapotok kiszámításában, majd az ezekből megfigyelhető mennyiségek származtatásában. A kísérleti oldalon a megfigyelhető mennyiségeknek a detektált részecskék fizikai paramétereiből és ezek eloszlásaiból való analitikus kiszámítását tanultam meg és használtam. Konkrétan a Buda-Lund modellen dolgoztam, amely egzakt hidrodinamikai megoldásokon alapul, és az ütközés utáni hidrodinamikai tágulás végállapotának leírására törekszik. Ez a modell korábban sikerrel írta le a centrális ütközésekben az egyrészecske spektrumokat és a kétrészecske Bose-Einstein korrelációk eloszlásának szélességéből származó HBT sugarakat. Feladatomból volt a modell kiterjesztése a szemi-centrális és a periferiális nehézion-ütközések esetére.

A fenti feladatokhoz az analitikus („papír alapú”) számításokon kívül matematikai programcsomagok segítségét is igénybe vettem. Legtöbbet a Waterloo Maple Inc. Maple ® szoftvercsaládját használtam, segítségével az analitikus formula-manipuláción és egyenlet megoldáson kívül ábrakészítést, numerikus egyenlet- és differenciálegyenlet-megoldást és különféle animációk készítését is végezhettem.

Kísérleti és elméleti munkám megbízható és széles körű programozási alkalmazásokra is támaszkodott. Különböző szimulációs programcsomagokat (Pythiát, PISÁ-t, Therminatort és

HRC-t) használtam, a PHENIX Online Monitoring és Offline Computing szoftverrendszerét, a Concurrent Version System verziókövető rendszert, valamint különféle RHIC Computing Facility eszközöket (például a Condor és LSF feladatmegosztó rendszereket, vagy a szalagos háttértárak meghajtóit). Ábrakészítéshez a Maple <sup>®</sup> szoftveren kívül használtam ROOT-ot, Gnuplotot és a Systat Software Inc. SigmaPlot <sup>®</sup> szoftverét, illetve különféle Microsoft Office <sup>®</sup> termékeket.

Numerikus számításokra a fentiekén kívül sokféle szoftvert használtam, például a Gnu Scientific Library függvénykönyvtárakat, vagy a Minuit optimalizációs csomagot.

Szükség volt különféle programnyelvek elsajátítására is, leginkább a C++-ra, amely standard a PHENIX-en belül is. Az általam fejlesztett PHENIX szoftvereket és az elméleti számításainkhoz használt Buda-Lund programcsomagot is ezen a nyelven írtam és fejlesztettem. Egyes programozási feladatokhoz szükség volt a korábban standard Fortran megismerésére is. Használtam ezen kívül egyszerűbb nyelveket (Perl) illetve a különféle parancssori szkriptek szabályait (Bash, csh, tcsh). Végül (de nem utolsósorban), a munkák webes megjelenítéséhez és interfacek fejlesztéséhez elmélyedtem a HTML, JavaScript és PHP nyelvekben is.

## 3. Eredmények

### 3.1. A PHENIX ZDC/SMD megfigyelő szoftvere

A PHENIX-ben fő feladatomban a Zero Degree Calorimeter (ZDC) és a Shower Max Detector (SMD) megfigyelő szoftvereinek megírása, a PHENIX Online Monitoring szoftverrendszerbe való beillesztése, fejlesztése és karbantartása volt. Ez a szoftverrendszer arra szolgál, hogy az éppen ügyeletes kísérleti személyzet számára lehetővé teszi, hogy különösebb speciális ismeret nélkül el tudja dönteni, hogy az egyes detektorok megfelelően működnek-e.

A ZDC az atommagok ütközésben részt nem vevő, az ütközés után leszakadó részből jövő neutronokat detektálja: ezeket a gyorsító mágnesei nem térítik el, hanem egyenesen haladnak tovább a ZDC felé. A ZDC ezen kívül alkalmas az ütközés nyalábirányú pozíciójának meghatározására, a becsapódó neutronok időkülönbségéből származtatva. Az SMD, amely a ZDC-n belül van elhelyezve, a leszakadt neutronok, és ezáltal a nyaláb transzverz (nyalábirányra merőleges) síkban vett eloszlását méri. Én ezen diagnosztikai méréseket végeztem el és automatizáltam a kaloriméter segítségével, megoldottam az eredmények valós idejű megjelenítését illetve különféle adatbázisokban való tárolását. [c5-c14,d5]

### 3.2. A ZDC-hez kapcsolódó egyéb mérések/szimulációk

Kiszámítottam a különféle folyamatok révén a ZDC-be érkező neutronok várt energiaeioszlását RHIC és LHC energiák esetén Pythia szimulációval. Megmértem a PHENIX 200 GeV-es ultra-periferiális, azaz a mag-átmérőnél nagyobb impakt paraméterrel (magtávolsággal) lejátszódó arany-arany ütközéseiben inkohereus folyamatok során keletkező  $J/\Psi$  részecskék és koherens elektron-positron párok hatáskeresztmetszetét. Az eredmények összhangban vannak az elméleti jóslatokkal. [c1,d4]

### 3.3. Parciális koherencia keresése arany-arany ütközésekben

A PHENIX együttműködés keretein belül a 200 GeV-es arany-arany ütközésekben mértem a két- és háromrészecske korrelációs függvényeket. Ezeket Gauss, Lévy és Edgeworth eloszlásokból számolt korrelációs függvényekkel illeszttem, és ebből következtettem a forrás részleges koherens részének arányára ( $p_c$ ) és az ütközésekben létrejövő tűzgömb hidrodinamikával leírható magjának arányára ( $f_c$ ). Ismert ugyanis, hogy a két- és három-részecske korrelációs függvények nulla relatív impulzusnál vett értéke egyszerű kapcsolatban áll  $f_c$  és  $p_c$  értékével [2]. A PHENIX adatokon elvégzett analízisem eredményei szerint a tűzgömb magjának egy része koherensen viselkedhet ( $p_c > 0$ ), ebben az esetben azonban a mag aránya nagyobb, mint  $p_c = 0$  esetén. [c4,d1,d2]

### 3.4. Kétrészecske korrelációk mérése és analízise

Ismert [3], hogy a királis  $U_A(1)$  szimmetria helyreállása esetén az  $\eta'$  bozon (a kilencedik, leendő Goldstone-bozon) tömege lecsökken, keletkezési hatáskeresztmetszete jelentősen pedig megnő. Az így tömegesen keletkező  $\eta'$  bozonok pedig egy (igen hosszú élettartamú)  $\eta$  bozonon keresztül kis transzverz impulzusú pionokká bomlanak, megváltoztatva ezzel a kétrészecske korrelációs függvények erősségét alacsony transzverz impulzusú ( $p_t$ ) tartományban [4].

Ezért a PHENIX együttműködés keretein belül mértem a kétrészecske-korrelációs függvények erősségének  $p_t$  függését és ebből következtettem a királis szimmetria helyreállásra. Az eredmények nem zárják ki az  $\eta'$  bozon tömegcsökkenését. További adatok felvétele és analízise, valamint a kollaboráció jóváhagyása szükséges ahhoz, hogy az  $\eta'$  bozon módosított tömegére kísérleti, a kollaboráció által jóváhagyott állítást fogalmazhassunk meg. [c4,d1,d2]

### 3.5. A forrás Lévy-stabilitásának vizsgálata

Másodrendű fázisátalakulások során a folyamatokat kritikus exponensekkel jellemezzük. Ezek egyike a rendparaméter térbeli korrelációjának eloszlására jellemző, ezt hagyományosan  $\eta$ -val jelöljük. Ismert [5], hogy ez az exponens mérhető kétrészecske korrelációk vizsgálatával, és megmutatható, hogy  $\eta=\alpha$ , ahol  $\alpha$  a kétrészecske korrelációk Lévy-stabilitási indexe. Ismert továbbá [6], hogy a QCD univerzalitási osztálya a kritikus pontnál megegyezik a 3 dimenziós Ising modellekével. A korrelációs függvény kitevője ( $\eta$ ) igen kicsi ebben a modellben, méghozzá  $\eta = 0.03\pm 0.01$ . Nagy energiás nehézion-ütközésekben viszont véletlen külső terek lehetnek jelen, amelyek megváltoztatják az univerzalitási osztályt, és így megnövelhetik  $\eta$ -t. Az így kapott véletlen teres Ising modellek esetén  $\eta(=\alpha) = 0.50 \pm 0.05$ .

Ezért a PHENIX által mért korrelációs- és forrásfüggvények [7] alakját analizáltam, Lévy-eloszlásokkal vetettem össze. Azt találtam, hogy ez az  $\alpha$  exponens az  $1.4\pm 0.1$  értéket veszi fel, amely távol van mind a Gauss esetet jellemző  $\alpha=2$  értéktől, mint a másodrendű fázisátalakulás esetén fellépő  $\alpha=0.5$  esettől. Az analízis alapján tehát mindkét eset kizárható. [a2,c3,d3]

### 3.6. Buda-Lund modell ellipszoidálisan szimmetrikus tűzgömbökre

Általánosítottam a korábban tengelyesen szimmetrikus Buda-Lund modellt [8] ellipszoidálisan szimmetrikus táguláson átmenő tűzgömbökre. A modell paramétereit a spektrumokat és korrelációkat leíró értékeken tartottam, és csak az új szimmetria miatt fellépő paramétereket változtattam. Kis eltérést tapasztaltam a tengelyes szimmetriához képest. Az elliptikus folyásnak nevezett mennyiség rapiditásfüggésével korábban sok numerikus és egyéb hidrodinamikai számítás sem mutatott egyezést, a Buda-Lund modell keretein belül tett jóslat azonban sikerrel írta le ezeket az adatokat is.

Az ellipszoidális modellnek az elliptikus folyás mérésekkel való összevetésének eredményei megerősítették a korábban talált indirekt következtetést a kvarkok kiszabadulására, mivel a központi hőmérsékletre több standard hibán túli eltérést tapasztaltunk a kritikus hőmérséklettől,  $T > T_c \approx 170$  MeV. Végül megállapítottam, hogy az az ellipszoidális térfogat, ahol a hőmérséklet magasabb a kritikusnál, a teljes térfogat 1/8-ad része, az első becslések szerint körülbelül  $750 \text{ fm}^3$ . Fontos kiemelni azt is, hogy a maradék térfogat, ahonnan a részecskék 7/8-a származik, ennél jóval hidegebb, hadron gáz állapotban van, és körülbelül  $T_s \approx 105$  MeV-es felületi hőmérséklettel rendelkezik. [a4-a7]

### 3.7. A HBT sugarak rapiditásfüggésének skálázása

Kiszámítottam az általánosított Buda-Lund modellből a HBT sugarak transzverz impulzus és rapiditásfüggését. Megmutattam, hogy a RHIC kísérletben mért értékek megfelelnek a Buda-Lund modellen alapuló várakozásnak. Megmutattam továbbá, hogy a HBT sugarak rapiditástól és transzverz tömegtől való függése egyetlen skálaváltozón keresztül valósul meg, és javaslatot tettem ennek kísérleti vizsgálatára. [a3,b5]

### 3.8. Az elliptikus folyás univerzális skálázása a RHIC-nél

Megmutattam, hogy a Buda-Lund modell alapján az elliptikus folyásnak bármely fizikai paramétertől való függése csak egy skála-változón keresztül jelenik meg, azaz a Buda-Lund modell szerint – a hidrodinamikai folyamatokra jellemző módon – adategybeesés jelenik meg. Ezt a skálafüggést igazoltam a meglévő RHIC adatok vizsgálatával. Arra következtettem, hogy az alacsony impulzusú tartományban (1.0-1.5 GeV transzverz impulzusig) kvantitatívan érvényes a tökéletes folyadék kép a RHIC arany-arany ütközéseiben. Azt a következtetést is levontam, hogy a tökéletes folyadék kép a midrapiditástól távol is, hozzávetőlegesen  $\eta_{\text{nyaláb}} - 0.5$ -ig is kiterjeszhető. Végül igazoltam, hogy a fenti univerzális skálázásnak egy speciális esete figyelhető meg a PHENIX kísérletnél [a3,b3,b4,c2]

## 4. Következtetések

Összegzésként kijelenthetjük az elliptikus folyás mérésekre és az analitikus hidrodinamikai modellek sikerére alapozva, hogy a RHIC-nél megfigyelt relativisztikus arany-arany ütközésekben tökéletes folyadék jön létre. A hőmérsékletre és az energiasűrűsége telt becslések alapján levonhatjuk azt a következtetést is, hogy az anyag kvark szabadsági fokai szabadok. Ezen kívül az  $\eta'$  bozon tömegcsökkenésének jeleit is látjuk, ebből a királis szimmetria helyreállítására is találhatunk indikációt, azonban további kísérleti vizsgálatok szükségesek ahhoz, hogy más lehetséges magyarázatokat kizárhassunk. Összességében azt mondhatjuk, hogy a régi-új anyag több specifikus tulajdonságára is becslést adtunk vagy megmértük. Figyelembe véve a legfrissebb eredményeket [9], kijelenthetjük, hogy az ideális kvark és gluon gázt és fázisátmenetet feltételező modellek nincsenek összhangban a kísérleti tényekkel. A RHIC nagyenergiás ütközéseiben létrejövő anyag tehát nem szabad kvarkok és gluonok ideális gázaként, hanem sokkal inkább erősen kölcsönható kvarkok tökéletes folyadékaként viselkedik, amely egyfajta sima

átmenettel alakul ki a hadronikus anyagból. A témakör ismertetésében említett hasonlaltal élve, Kolumbusz már megérkezett az új kontinensre, és megértette, hogy a talpa alatt lévő föld nem a feltételezett India, hanem az Új Világ. [b1]

*„Mindegy, milyen szép az elmélet, mindegy, milyen okos, aki felállította, vagy hogy hogy hívják — ha ellentmond a kísérleteknek, akkor hibás.”*

R. P. Feynman, új törvények felfedezéséről [10]

## Hivatkozások

- [1] S. Weinberg, *The First Three Minutes* (Basic Books, New York, 1977).
- [2] T. Csörgő, Heavy Ion Phys. **15**, 1 (2002).
- [3] J. I. Kapusta, D. Kharzeev, and L. D. McLerran, Phys. Rev. **D53**, 5028 (1996).
- [4] S. E. Vance, T. Csörgő, and D. Kharzeev, Phys. Rev. Lett. **81**, 2205 (1998).
- [5] T. Csörgő, S. Hegyi, T. Novak, and W. A. Zajc, AIP Conf. Proc. **828**, 525 (2006).
- [6] K. Rajagopal and F. Wilczek, Nucl. Phys. **B399**, 395 (1993).
- [7] S. S. Adler *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 132301 (2007).
- [8] T. Csörgő and B. Lörstad, Phys. Rev. **C54**, 1390 (1996).
- [9] M. Riordan and W. A. Zajc, Sci. Am. **294N5**, 24 (2006).
- [10] Feynman videos, <http://heelspurs.com/zpics/feynman9.rm>.

## A téziseket alátámasztó saját munkák

### a. Referált folyóiratban megjelent cikkek

- [a1] **Accelerating solutions of perfect fluid hydrodynamics for initial energy density and life-time measurements in heavy ion collisions**  
T. Csörgő, M. I. Nagy and M. Csanád, nucl-th/0702043, To appear in Braz.J.Phys.
- [a2] **Anomalous diffusion of pions at RHIC**  
M. Csanád, T. Csörgő and M. Nagy, hep-ph/0702032, To appear in Braz.J.Phys.



- [a3] **Universal scaling of the rapidity dependent elliptic flow and the perfect fluid at RHIC**  
M. Csanád, T. Csörgő, B. Lörstad and A. Ster, Nucl. Phys. A **774**, 535 (2006)
- [a4] **Indication of quark deconfinement and evidence for a Hubble flow in 130 GeV and 200 GeV Au + Au collisions**  
M. Csanád, T. Csörgő, B. Lörstad and A. Ster, J. Phys. G **30**, S1079 (2004)
- [a5] **A hint at quark deconfinement in 200 GeV Au + Au data at RHIC**  
M. Csanád, T. Csörgő, B. Lörstad and A. Ster, Nukleonika **49**, S49-S55 (2004)
- [a6] **Buda-Lund hydro model and the elliptic flow at RHIC**  
M. Csanád, T. Csörgő and B. Lörstad, Nukleonika **49**, S45-S48 (2004)
- [a7] **An indication for deconfinement in Au + Au collisions at RHIC**  
M. Csanád, T. Csörgő, B. Lörstad and A. Ster, Acta Phys. Polon. B **35**, 191 (2004)
- [a8] **Buda-Lund hydro model for ellipsoidally symmetric fireballs and the elliptic flow at RHIC**  
M. Csanád, T. Csörgő and B. Lörstad, Nucl. Phys. A **742**, 80 (2004)

## **b. Egyéb cikkek**

- [b1] **From quark gluon plasma to a perfect fluid of quarks and beyond**  
M. Csanád, T. Csörgő, B. Lörstad, M. Nagy and A. Ster, nucl-th/0702045  
To be published in The Subnuclear Series - Vol. 44, Proceedings of the International School of Subnuclear Physics
- [b2] **A New Family of Simple Solutions of Perfect Fluid Hydrodynamics**  
T. Csörgő, M. I. Nagy and M. Csanád, nucl-th/0605070
- [b3] **Universal scaling of the elliptic flow at RHIC**  
M. Csanád, T. Csörgő, R. A. Lacey and B. Lörstad, nucl-th/0605044  
Proceedings of the 22nd Winter Workshop on Nuclear Dynamics
- [b4] **Universal scaling of the elliptic flow and the perfect hydro picture at RHIC**  
M. Csanád *et al.*, nucl-th/0512078
- [b5] **Understanding the rapidity dependence of the elliptic flow and the HBT radii at RHIC**

**c. A PHENIX együttműködésben írott cikkek**

- [c1] **Coherent photoproduction of J/psi and high-mass e+ e- pairs in ultra-peripheral Au + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}= 200$  GeV**  
D. d'Enterria *et al.* [PHENIX Collaboration], Submitted to Acta Phys. Slovakia
- [c2] **Scaling properties of azimuthal anisotropy in Au+Au and Cu+Cu collisions at  $\sqrt{s_{NN}}= 200$  GeV**  
A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration], Phys. Rev. Lett. **98**, 162301 (2007)
- [c3] **Evidence for a long-range component in the pion emission source in Au + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}= 200$  GeV**  
S. S. Adler *et al.* [PHENIX Collaboration], Phys. Rev. Lett. **98**, 132301 (2007)
- [c4] **Measurement and analysis of two- and three-particle correlations**  
M. Csanád *et al.* [PHENIX Collaboration], Nucl. Phys. A **774**, 611 (2006)
- [c5] **Systematics of identified hadron spectra at PHENIX**  
M. Csanád [PHENIX Collaboration], Fundamental Interactions: Proceedings of the 20th Lake Louise Winter Institute
- [c6] **Nuclear effects on hadron production in d + Au and p + p collisions at  $\sqrt{s_{NN}}= 200$  GeV**  
S. S. Adler *et al.* [PHENIX Collaboration], Phys. Rev. C **74**, 024904 (2006)
- [c7] **Jet structure from dihadron correlations in d + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}= 200$  GeV**  
S. S. Adler *et al.* [PHENIX Collaboration], Phys. Rev. C **73**, 054903 (2006)
- [c8] **J/psi production and nuclear effects for d + Au and p + p collisions at  $\sqrt{s_{NN}}= 200$  GeV**  
S. S. Adler *et al.* [PHENIX Collaboration], Phys. Rev. Lett. **96**, 012304 (2006)
- [c9] **Nuclear modification factors for hadrons at forward and backward rapidities in d + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}= 200$  GeV**  
S. S. Adler *et al.* [PHENIX Collaboration], Phys. Rev. Lett. **94**, 082302 (2005)
- [c10] **Saturation of azimuthal anisotropy in Au + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}= 62$  GeV - 200 GeV**

S. S. Adler *et al.* [PHENIX Collaboration], Phys. Rev. Lett. **94**, 232302 (2005)

[c11] **Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration**

K. Adcox *et al.* [PHENIX Collaboration], Nucl. Phys. A **757**, 184 (2005)

[c12] **Jet structure of baryon excess in Au + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV**

S. S. Adler *et al.* [PHENIX Collaboration], Phys. Rev. C **71**, 051902 (2005)

[c13] **Double helicity asymmetry in inclusive mid-rapidity  $\pi_0$  production for polarized p + p collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV**

S. S. Adler *et al.* [PHENIX Collaboration], Phys. Rev. Lett. **93**, 202002 (2004)

[c14] **Absence of suppression in particle production at large transverse momentum in  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV d + Au collisions**

S. S. Adler *et al.* [PHENIX Collaboration], Phys. Rev. Lett. **91**, 072303 (2003)

#### **d. PHENIX belső analízis jegyzetek**

[d1] **Two- and three-particle correlations analysis note**

PHENIX internal analysis note 404

[https://www.phenix.bnl.gov/WWW/p/forms/info/show\\_note.php?editkey=an404](https://www.phenix.bnl.gov/WWW/p/forms/info/show_note.php?editkey=an404)

[d2] **Addendum to the two- and three-particle correlations analysis note (about the error of the Coulomb-correction)**

PHENIX internal analysis note 436

[https://www.phenix.bnl.gov/WWW/p/forms/info/show\\_note.php?editkey=an436](https://www.phenix.bnl.gov/WWW/p/forms/info/show_note.php?editkey=an436)

[d3] **Analyzing heavy tails in pion source function**

PHENIX internal analysis note 527

[https://www.phenix.bnl.gov/WWW/p/forms/info/show\\_note.php?editkey=an527](https://www.phenix.bnl.gov/WWW/p/forms/info/show_note.php?editkey=an527)

[d4] **Analysis of incoherent  $J/\Psi$  production and coherent  $e^\pm$  continuum production in ultra-peripheral collisions**

PHENIX internal analysis note 593

[https://www.phenix.bnl.gov/WWW/p/forms/info/show\\_note.php?editkey=an593](https://www.phenix.bnl.gov/WWW/p/forms/info/show_note.php?editkey=an593)

[d5] **Online Monitoring System for the PHENIX ZDC and SMD**

PHENIX internal technical note 419

<https://www.phenix.bnl.gov/phenix/WWW/publish/csanad/zdc/note/>