

Válasz Dr. Jancsó Gábor bírálataira

Köszönöm Dr. Jancsó Gábornak a dolgozatom figyelmes átolvasását, a bírálat megírására fordított munkáját és támogató véleményét. Kérdéseire az alábbiakban válaszolok.

1. A részecske és nehézion ütközésekben megfigyelt újszerű korrelációk jelentősége szinte szükségszerűvé teszi, hogy ezeket más kísérleti eszközökkel (más szisztematikus hibalehetőségek) és adatválogatással, valamint nagyobb eseményhalmazzal is megerősítsék. Történtek-e lépések ebbe az irányba a RHIC és LHC más kollaborációi által?

Igen, ezeket a korrelációkat más kísérletekben is megfigyelték nehézion-ütközésekben és proton-atommag ütközésekben, azonban a CMS kísérlet az egyetlen, ahol nagy multiplicitású proton-proton ütközésekben is kimutattuk a jelenséget.

A RHIC gyorsítónál a PHENIX, STAR és PHOBOS kísérleteknek is vannak ide vonatkozó publikációik. A PHENIX és STAR kísérlet már 2005-ben publikált kétrészecske-korrelációs eredményeket Au+Au ütközésekben [1, 2], de a STAR csak a szűk, $|\Delta\eta| < 1.4$ tartományban tudta ezt vizsgálni, és a PHENIX nem vizsgálta a nagy η -különbséggel rendelkező párokat. A 2005-ös STAR cikkben sem a kétdimenziós korrelációs ábra, sem a *ridge* kifejezés még nem szerepel. Ez utóbbi jelenséget 2009-ben vizsgálta meg a PHOBOS sokkal nagyobb $|\Delta\eta| < 4$ tartományra kiterjesztve, márciusban beküldött cikkében [3]. A STAR kísérlet is újra foglalkozott a témával, fél évvel ezután beküldött cikkében [4], amelyben már szerepel a PHOBOS ábrájához hasonló kétdimenziós eloszlás is, amely a hegygerincet ábrázolja, valamint a "*ridge*" szó is.

Az LHC gyorsítónál a hegygerincnek elnevezett korrelációkat (centrális) nehézion-ütközésekben a CMS kísérlet publikálta először egy 2011 májusában beküldött cikkben [5]. Ezt 2012 januárjában követte a jelenség részletes centralitás-függésének vizsgálata [6]. Az ALICE kísérlet 2011 szeptemberében közölte saját, ide vonatkozó eredményeit az általa elérhető, CMS-hez képest jóval szűkebb pszeudorapiditás-tartományban, a kétrészecske-korrelációk Fourier-komponenseinek analízisével együtt [7]. Végül 2012 márciusában az ATLAS kísérlet is közölt ugyanebben a témában egy igen részletes elemzést [8].

A CMS kísérlet nagy multiplicitású proton-proton ütközésekben is felfedezett hasonló korrelációkat, melyet 2010 szeptemberében hozott nyilvánosságra [9], még a nehézion-program beindulása előtt. Ehhez egy igen speciális, nagy multiplicitású trigger használata volt szükséges, és hogy a luminozitás ne legyen túl nagy, pontosabban az egyidejűleg a CMS-ben ütköző protonok száma ne legyen néhánynál nagyobb. Ilyen trigger a többi kísérletnek nem állt rendelkezésére, és az LHC ilyen kis luminozitású működése sem tér vissza előre láthatóan huzamosabb ideig. Ezért ezeknek a méréseknek a megismétlése igen nehéz feladat a többi kísérlet számára.

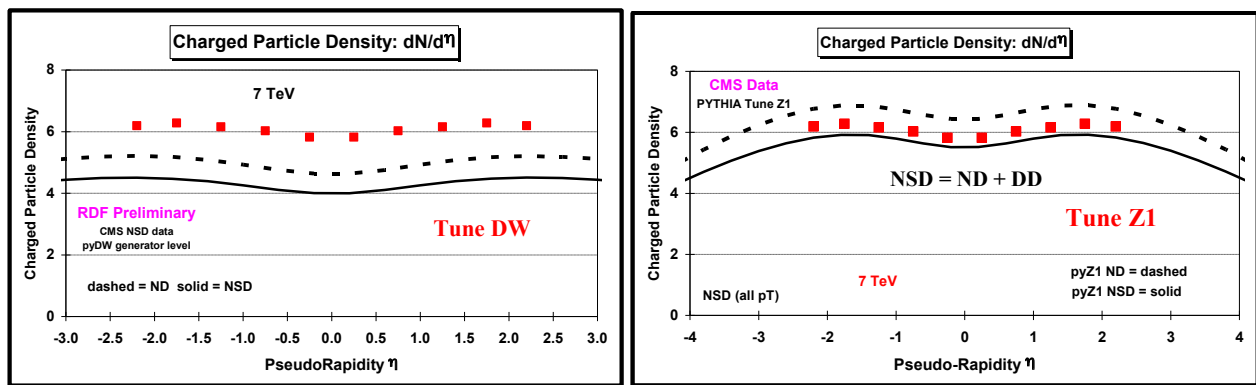
A dolgozat írása óta a CMS kísérletben proton-ólom ütközésekben is megfigyeltünk hasonló korrelációkat a 2012 szeptemberi tesztmérés során [10], amit októberben hoztunk nyilvánosságra. Ez volt korreláció első mérése az LHC proton-ólom ütközéseiben, és kiderült, hogy annak erőssége többszörösen meghaladja a proton-proton ütközésekben (azonos multiplicitás esetén) tapasztalt értéket, a legerősebb az 1 és 1.5 GeV/c közötti transzverzális impulzusú részecskék esetén, és a multiplicitással monoton módon (közel lineárisan) növekszik. Ez a megfigyelés az ALICE [11] és az ATLAS [12] kísérleteket is az adatok ilyen irányú kiértékelésére készítette, és 2012 decemberére mindkét kísérlet igazolta a hegygerinc-korrelációk létét proton-ólom ütközésekben. Az ALICE kísérlet a trigger részecskével azimutálisan átellenes oldalon is vizsgálta ezeket a korrelációkat a centrális és periférikus ütközések adatainak kivonásával. Ezt követően az ATLAS kísérlet az elliptikus folyás mértékét is vizsgálta a 2013 márciusi publikációjában [13]. Ezzel egyidőben a RHIC-nél végzett deutérium-arany ütközések analízise is nyilvánosságra került, melyben az elliptikus folyás mértékét (a kezdeti állapot excentricitásával normalva) a PHENIX kísérlet hasonlónak találta olyan különböző ütközések esetén is, mint a d+Au és az Au+Au ütközések, feltéve, hogy a végállapotban keletkezett részecskék számát azonos tartományra szorítjuk [14].

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a PHOBOS és CMS kísérlet úttörő szerepet játszott a kétrészecske-korrelációk területén. A PHOBOS kísérlet publikálta az első, igen nagy pszeudorapiditás-tartományra kiterjesztett eredmény, a CMS kísérlet pedig az LHC gyorsító Pb+Pb, p+p és p+Pb ütközései esetén is először publikált végleges formában hegygerinc-korrelációra vonatkozó eredményeket. A PHENIX, STAR, ALICE és ATLAS kísérletek mind kimutattak hasonló korrelációkat (kivéve a nagy multiplicitású proton-proton ütközések esetén), melyek nem hagynak kétséget afelől, hogy a jelenség létezik.

2. Eredményeinek jelentős része már több éves múlttal rendelkezik. Tud-e arról, hogy az értekezésben újak számító eredményeit felhasználták fenomenológiai modellek vagy Monte Carlo szimulációk "jobbítására"?

Az eredmények természetesen hozzájárultak különböző modellek és szimulációk pontosítására, a cikkekre kapott nagyszámú hivatkozások egy része éppen az ilyen fejleményekről számol be. Példaként a CMS kísérletben publikált első cikkeinket említeném meg [15, 16], amelyek a proton-proton ütközésekben keletkezett részecskék eloszlásairól szólnak, és amelyek összesen eddig 389 hivatkozást kaptak.

A PYTHIA nevű, széles körben használt Monte Carlo modell paramétereinek igazításával elérhető a különböző adatsorokkal való egyezés. Rick Field elemzéseiben megemlíti [17, 18], hogy a modell DW és Z1 nevű verziói az ütközések *underlying event* tulajdonságainak leírására lettek optimalizálva, de a fenti cikkekben közölt, ún. *minimum bias* eredményekkel összevetve igen jelentős különbségeket tapasztalunk (1. ábra). Ez azt mutatja, hogy a mérési eredményeink



1. ábra. A PYTHIA modell DW és Z1 verzióit az adatokkal összehasonlító ábra [17]-ből.

diszkriminálni tudnak a modellek különböző verziói között (a Z1 verzió lényegesen jobbnak bizonyul), melyeket aztán más kontextusban és adatkiértékelések során emiatt előnyben célszerű részesíteni.

Ugyanakkor, mint ahogy Peter Skands elemzésében megjegyzi [19], az LHC ezen első eredményeit és a Tevatron gyorsító adatait nem könnyű egységesen modellezni, mivel a részecskeloszlások ütközési energiától való függése illetve az LHC-ra adható jóslatok a PYTHIA modell alapján bizonytalanok. Ezért itt fontos szerepet kapnak az új mérési adatok.

Nem a PYTHIA modell az egyetlen, amelynek gondot okozott az LHC energiákon keletkező részecskék meglepően nagy száma. Bopp és Ranft cikkéből kiderül [20], hogy a *Dual Parton Model* egyik implementációja, a DPMJET-III szimulációs program is alulbecsülte ezeket az adatokat. Ennek időleges megoldására a szerzők olyan paramétereket vezettek be a modellben, amelyek függenek az ütközési energiától. Ezzel már kiváló egyezést sikerült elérniük az adatokkal. Végül elismerik, hogy a végleges megoldás az lenne, ha ez az energiafüggés egy természetes, beépített része lenne a modellnek, nem pedig kézzel kellene beállítani.

Bautista és szerzőtársai a húr-perkolációs modell keretében megmutatták [21], hogy a keletkezett részecskék számának függése az ütközési energiától egyetlen egységes keretben tárgyalható, és hasonló hatványfüggvény-viselkedést mutat proton-proton és nehézion-ütközésekben (a logaritmikus növekedést az adataink kizárták). Ezen modell paramétereinek az illesztése részben a fent hivatkozott eredményeimre történt (melyek a legnagyobb ütközési energiára vonatkoznak és ezért különösen fontosak), melyek így hozzájárultak a modell kvantitatív tételéhez.

Lykasov és szerzőtársai arra használták a fenti adatainkat [22], hogy a proton gluonjainak eloszlását illesztésükből kis k_T értékekre megállapítsák, amely a perturbatív QCD eredménytől különbözőnek adódott.

Werner és Liu [23] arra használták eredményeinket, különösen a transzverzális impulzus spektrumot, hogy a proton-proton ütközésekben hipotézisük szerint kialakuló kvark-gluon plazma

hidrodinamikai evolúciója által esetlegesen okozott változások mértékét kiszámítsák, a mért adatokkal összehasonlítsák, és további javaslatot tegyenek a hipotézis kísérleti ellenőrzésére.

Albacete és Dumitru is felhasználta az adatainkat arra, hogy a k_T -faktorizációnak és a futó csatolású Balitsky-Kovchegov gluon-eloszlás függvényeknek egy új numerikus implementációját összehasonlítsák velük [24].

Levin és Rezaeian megmutatták, hogy az ún. színesüveg-kondenzátum leírás jól működik a legelső, proton-proton ütközésekben keletkezett részecskék eloszlásáról szóló mérési adatokra [25]. Ez lehetőséget ad arra, hogy jóslatot készítsenek a csak később sorra kerülő nehézion-ütközésekben keletkezett részecskék eloszlására [26] .

Ostapchenko kiváló egyezést talált a 900, a 2360 és a 7000 GeV-es tömegközépponti energián ütköző protonok által keltett részecskék pszeudorapiditás-eloszlásai és az általa alkalmazott Reggeon térelmélet eredményei között [27].

Xin-Nian Wang és társai 2010/11-ben továbbfejlesztették a széles körben használt HIJING modellt [28], amelynek 2.0-ás változatát összevetették a mérési eredményekkel, köztük a CMS kísérlet szóban forgó első p+p ütközésekről szóló publikációival.

Ohsawa és szerzőtársai úgy írták le a részecske-eloszlásokat, mint több centrumból izotróp módon kibocsájtott részecskék összességét, mely centrumokból a saját tömegközépponti rendszerükben a Tsallis-eloszlás szerint történik a részecskekeltés [29]. Mindössze hat paraméterrel az adatok jó leírását kapták.

A fenti példák csak egy részét ölelik fel a kísérleti eredmények hatását és modellek optimalizálását, illetve modellek közötti diszkriminációt leíró publikációknak, de már ezekből is látható, hogy általában véve az eredmények széles körben járultak hozzá a modellek továbbfejlesztéséhez.

Végül ismét köszönetet szeretnék mondani bírálómnak dolgozatom alapos áttanulmányozásáért, és fáradozását dolgozatom elfogulatlan és kritikus bírálatának elkészítése érdekében. Köszönöm továbbá munkám pozitív értékelését, és kérem válaszaim szíves elfogadását.

Budapest, 2013. április 29.

dr. Veres Gábor

Hivatkozások

- [1] S.S. Adler et al. Dense-Medium Modifications to Jet-Induced Hadron Pair Distributions in Au+Au Collisions at $s(\text{NN})^{1/2} = 200\text{-GeV}$. *Phys.Rev.Lett.*, 97:052301, 2006, nucl-ex/0507004.
- [2] J. Adams et al. Distributions of charged hadrons associated with high transverse momentum particles in pp and Au + Au collisions at $s(\text{NN})^{1/2} = 200\text{-GeV}$. *Phys.Rev.Lett.*, 95:152301, 2005, nucl-ex/0501016.
- [3] B. Alver, G. I. Veres, et al. High transverse momentum triggered correlations over a large pseudorapidity acceptance in Au+Au collisions at $s(\text{NN})^{1/2} = 200\text{ GeV}$. *Phys.Rev.Lett.*, 104:062301, 2010, nucl-ex/0903.2811.
- [4] B.I. Abelev et al. Long range rapidity correlations and jet production in high energy nuclear collisions. *Phys.Rev.*, C80:064912, 2009, nucl-ex/0909.0191.
- [5] Serguei Chatrchyan, G. I. Veres, et al. Long-range and short-range dihadron angular correlations in central PbPb collisions at a nucleon-nucleon center of mass energy of 2.76 TeV. *JHEP*, 1107:076, 2011, nucl-ex/1105.2438.
- [6] Serguei Chatrchyan, G. I. Veres, et al. Centrality dependence of dihadron correlations and azimuthal anisotropy harmonics in PbPb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76\text{ TeV}$. *Eur.Phys.J.*, C72:2012, 2012, nucl-ex/1201.3158.
- [7] K. Aamodt et al. Harmonic decomposition of two-particle angular correlations in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76\text{ TeV}$. *Phys.Lett.*, B708:249–264, 2012, nucl-ex/1109.2501.
- [8] Georges Aad et al. Measurement of the azimuthal anisotropy for charged particle production in $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76\text{ TeV}$ lead-lead collisions with the ATLAS detector. *Phys.Rev.*, C86:014907, 2012, hep-ex/1203.3087.
- [9] Vardan Khachatryan, G. I. Veres, et al. Observation of Long-Range Near-Side Angular Correlations in Proton-Proton Collisions at the LHC. *JHEP*, 1009:091, 2010, hep-ex/1009.4122.
- [10] S. Chatrchyan, G. I. Veres, et al. Observation of long-range near-side angular correlations in proton-lead collisions at the LHC. *Phys.Lett.*, B718:795–814, 2013, nucl-ex/1210.5482.
- [11] Betty Abelev et al. Long-range angular correlations on the near and away side in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02\text{ TeV}$. *Phys.Lett.*, B719:29–41, 2013, nucl-ex/1212.2001.

- [12] Georges Aad et al. Observation of Associated Near-side and Away-side Long-range Correlations in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV Proton-lead Collisions with the ATLAS Detector. 2012, hep-ex/1212.5198.
- [13] Georges Aad et al. Measurement with the ATLAS detector of multi-particle azimuthal correlations in p+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV. 2013, hep-ex/1303.2084.
- [14] A. Adare et al. Quadrupole anisotropy in dihadron azimuthal correlations in central d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV. 2013, nucl-ex/1303.1794.
- [15] Vardan Khachatryan, G. I. Veres, et al. Transverse momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 2.36 TeV. *JHEP*, 1002:041, 2010, hep-ex/1002.0621.
- [16] Vardan Khachatryan, G. I. Veres, et al. Transverse-momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. *Phys.Rev.Lett.*, 105:022002, 2010, hep-ex/1005.3299.
- [17] Rick Field. Min-Bias and the Underlying Event at the LHC. 2012, hep-ph/1202.0901.
- [18] Rick Field. Min-Bias and the Underlying Event at the LHC. *Acta Phys.Polon.*, B42:2631–2656, 2011, hep-ph/1110.5530.
- [19] Peter Zeiler Skands. Tuning Monte Carlo Generators: The Perugia Tunes. *Phys.Rev.*, D82:074018, 2010, hep-ph/1005.3457.
- [20] F. Bopp and J. Ranft. Inclusive distributions in p-p collisions at LHC energies compared with an adjusted DPMJET-III model with chain fusion. pages 41–49, 2011, hep-ph/1110.6403.
- [21] Irais Bautista, Jose Guilherme Milhano, Carlos Pajares, and Jorge Dias de Deus. Multiplicity in pp and AA collisions: the same power law from energy-momentum constraints in string production. *Phys.Lett.*, B715:230–233, 2012, nucl-th/1204.1457.
- [22] G.I. Lykasov, V.A. Bednyakov, A.A. Grinyuk, M. Poghosyan, and A.G. Dolbilov. Gluon distribution in proton at soft and hard pp collisions. *Nucl.Phys.Proc.Suppl.*, 219-220:225–228, 2011, hep-ph/1109.1469.
- [23] Fu-Ming Liu and Klaus Werner. On QGP Formation in pp Collisions at 7 TeV. *J.Phys.*, G38:124183, 2011, hep-ph/1106.5909.
- [24] Javier L. Albacete and Adrian Dumitru. A model for gluon production in heavy-ion collisions at the LHC with rcBK unintegrated gluon densities. 2010, hep-ph/1011.5161.

- [25] Eugene Levin and Amir H. Rezaeian. Hadron production at the LHC: Any indication of new phenomena. *AIP Conf.Proc.*, 1350:243–253, 2011, hep-ph/1011.3591.
- [26] Eugene Levin and Amir H. Rezaeian. Hadron multiplicity in pp and AA collisions at LHC from the Color Glass Condensate. *Phys.Rev.*, D82:054003, 2010, hep-ph/1007.2430.
- [27] Sergey Ostapchenko. Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: I. QGSJET-II model. *Phys.Rev.*, D83:014018, 2011, hep-ph/1010.1869.
- [28] Wei-Tian Deng, Xin-Nian Wang, and Rong Xu. Hadron production in p+p, p+Pb, and Pb+Pb collisions with the HIJING 2.0 model at energies available at the CERN Large Hadron Collider. *Phys.Rev.*, C83:014915, 2011, hep-ph/1008.1841.
- [29] Akinori Ohsawa, Edison Hiroyuki Shibuya, and Masanobu Tamada. Description of (pseudo-)rapidity density and transverse momentum distributions in a wide energy range ($s^{*}(1/2) = 22.4\text{-GeV-}7000\text{-GeV}$). *Int.J.Mod.Phys.*, A27:1250043, 2012.