

# Új kiértékelési módszerek kifejlesztése és a kvantumszindimamika vizsgálata az LHC-n

OTKA K 81614, zárójelentés  
(2010. február – 2014. augusztus)

## 1. Bevezető

A zárójelentést két részre bontottuk. Az újonnan kifejlesztett kiértékelési módszerek ismertetése után azok alkalmazásait és az erősen kölcsönható anyaggal kapcsolatos új eredményeinket ismertetjük. Csak azokat a munkákat szerepeltetjük, melyek teljes egészében saját kutatáson alapulnak, vagy a személyes hozzájárulásunk jelentős és pontosan körülhatárolható<sup>1</sup>.

Az ábrákat – a forrás megjelölése mellett – az eredeti publikációkból vettük át, emiatt felirataik angol nyelvűek. Az elektronikus verzió szövegében a kék színű linkek a jelentés végén található hivatkozásokhoz, onnan pedig a megfelelő cikkekhez, analysis note-okhoz (internal reference) visznek.

## 2. Új kiértékelési módszerek

Azt hihetnénk, hogy a nagyenergiás fizika kiértékelési módszerei már régóta, a legapróbb részletekig kidolgozottak. Való igaz, hogy új, minőségileg más eljárások kidolgozása érdekében mélyebb, helyenként sok matematikát igénylő elgondolásokra lehet szükség. A gáztöltésű és a szilícium-alapú detektorok kiértékelésével, a töltött részecskék nyomkövetésével és azonosításával kapcsolatos új módszereket dolgoztunk ki, majd alkalmaztunk. A tárgyalt kiértékelési módszerek segítségével a CMS kísérlet [1] képessé vált széles impulzustartományban, illetve azonosított részecskékkel végzett mérések elvégzésére is, így jelentősen hozzá tud járulni az LHC-n folyó hadronfizikai kutatásokhoz.

### 2.1. Töltött részecskék nyomkövetése

A szilícium-alapú nyomkövető detektorok manapság minden nagyenergiás kísérletben megtalálhatók, érzékenyek, helyfelbontásuk nagyon jó, kiolvasásuk gyors.

---

<sup>1</sup> A CMS együttműködés – szerzőségeit igazoló – analysis note-jai belső használatra készültek, de a bírálók számára mindegyiket letölthetővé tettük a <http://www.rmki.kfki.hu/sikler/K81614/pdf/> címen.

**A kölcsönhatási pontok javított keresése** ♦ Sok fizikai analízis számára alapvető a kölcsönhatási pont (*vertex*) pontos ismerete. Nagyobb intenzitás esetén a jelenlegi – az egyes pályák nyalábközelségi pontjait felhasználó – vertex-keresők teljesítménye nem megfelelő. Fejlett matematikai módszerek alkalmazásával megmutattuk [2], hogy mind a hatások, mind a talált vertexek tisztasága jelentősen javítható. Az egyes rekonstruált részecskék gyors összevonó (agglomeratív) klaszterezéssel csoportosíthatók. Ez a kezdeti besorolás gaussos keverék modellel, valamint az ún. k-means eljárással finomítható. A javasolt eljárások főként nagyszámú átlapoló ütközés esetén jelentenek előrelépést az eddig alkalmazottakkal szemben, de már kis luminozítás mellett is hatékonyabbak. A fel nem ismert kölcsönhatási pontok száma a harmadára, a hamis vertexek száma az ötödére esett vissza, és ezrelék alatti a megosztott vertexek aránya. Az új vertex-kereső algoritmus futási ideje és az egyes pontatlanságokra való érzékenysége (háttér-részecskék, a koordináták hibájának felül-, illetve alulbecslése) is kedvező.

Az CMS kísérlet első, proton-proton ütközésekről szóló analízisében már ezt a vertex-kereső algoritmust használtuk. A módszert jónéhány CMS analízis alkalmazta és hivatkozta (köztük [3, 4, 5]). Az eljárások az AIDA projekt keretében egy kísérlet-független programcsomagban széles körben elérhetők és felhasználhatók [6].

## 2.2. Töltött részecskék energiavesztesége és alkalmazások

**Az energiaveszteség-ráta becslése lineáris kombinációval** ♦ Egy töltött részecske detektorban hagyott beütéseinek – az egyes energialeadásainak – mérésével a sebességfüggő  $dE/dx$  érték becsülhető. Az eddig széles körben alkalmazott levágott átlagolást (*truncated mean*) a súlyozott átlagok körében általánosítottuk [7]. Az optimalizált súlyok meglehetősen függetlenek a részecske impulzusától és az anyagvastagságtól, így a becslésben jól használhatók. A  $dE/dx$  felbontása akár 15%-kal is javulhat, ezért a súlyozott számtani és mértani közepek jobb részecske-szétválasztást tesznek lehetővé, mint a korábban alkalmazott módszerek, mind a szilícium-alapú, mind a gáztöltésű detektorokban.

További vizsgálatok azt mutatták, hogy a kapott súlyok szorosan kapcsolódnak az energiaveszteség-eloszlások alakjához, így lehetővé teszik a súlyok egyszerű meghatározását a mérési pontok számának függvényében. Több érdekes kapcsolatra is fény derült: bizonyos esetekben miért annyira sikeres a levágott átlagolás; mely esetekben javítható a súlyozott átlagolás maximum likelihood módszerekkel.

**Részecskeazonosítás a pályaillesztés jóságának mérőszámával** ♦ A részecskefizikában széles körben elterjedt a részecskepályák Kálmán-filterre alapuló illesztése. A többszörös Coulomb-szórás és az energiaveszteség ismert fizikája segítségével megmutattuk, hogy a szűrő  $\chi^2$  értéke felhasználható a töltött részecskék sebességének becslésére [8], így a nyomkövető detektorokat is használhatjuk töltött részecskék azonosítására. Mivel a szűrő  $\chi$  értéke ekvivalens a globális illesztés  $\chi$  értékével, az ismertetett módszer alkalmazható bármely más  $\chi^2$  minimalizáló pálya-illesztésre is, feltéve, hogy az megfelelően modellezi az energiaveszteséggel és szóródással kapcsolatos effektusokat. Az ismertetett megközelítés a detektor anyaga és a helyfelbontás pontos ismeretét feltételezi. A javasolt eljárás független a részecskék hagyományos, energiaveszteségre alapozott azonosításától.

A fizikai effektusok, majd a felbontás detektorjellemzőktől való függésének tárgyalása után az új módszert három LHC kísérletre (ATLAS, ALICE, CMS) alkalmazva megmutattuk, hogy jó  $\pi$ -K és a  $\pi$ -p szétválasztást kapunk a  $p < 0,9$  GeV/c illetve a  $p < 1,4$  GeV/c tartományokban. Általánosságban elmondható, hogy egy kísérlet érzékenysége a rendelkezésre álló jó minőségű mérési pontok számának, valamint a részecske impulzusának függvénye. A CMS kísérlet azonosított töltött hadronok eloszlásairól szóló analíziseiben az itt ismertetett eredmények fontos szerepet kaptak: felhasználásuk jelentősen javította az energiaveszteségen alapuló részecskeazonosítás tisztaságát [5, 9, 10].

**Egy analitikus energiaveszteség-modell kidolgozása, alkalmazásai** ♦ A töltött részecskék energiaveszteségét szilíciumban egy egyszerű analitikus parametrizációval közelítettük, melynek használatát több példán keresztül mutattuk be [11]. A javasolt modell kevés paraméterrel rendelkezik, a leadott energia eloszlása és a legvalószínűbb energiaveszteség közötti kapcsolatra épít. A szilícium-alapú detektorok érzékeny elemeiben (pixelek vagy csíkok) mért energialeadások segítségével a pályaszakaszok helyét és a leadott energiát – a korábbi módszerekhez képest – pontosabban és kisebb torzítással tudtuk megbecsülni. A küszöb alatti, valamint telítést okozó jeleket is megfelelően kezeltük. A parametrizációt sikeresen alkalmaztuk a részecskepályák energiaveszteség-rátájának meghatározására, valamint a detektorok erősítéseinek kalibrációjára, ismét a korábbi eljárásoknál jobb eredményekkel.

A CMS kísérlet azonosított töltött hadronokkal foglalkozó publikációiban az itt ismertetett módszereket alkalmaztuk [5, 9, 10]. Bemutattuk, hogy a javasolt energiaveszteség-parametrizáció nagyon jól működik valós adatokon is. A mért mennyiségek közti sokféle kapcsolat, kényszer, megmaradás kiaknázásával a CMS nyomkövető rendszere alkalmassá vált a különféle töltött hadronok hozamának kis bizonytalansággal való mérésére.

### 3. Kvantumszíndinamika vizsgálata az LHC-n

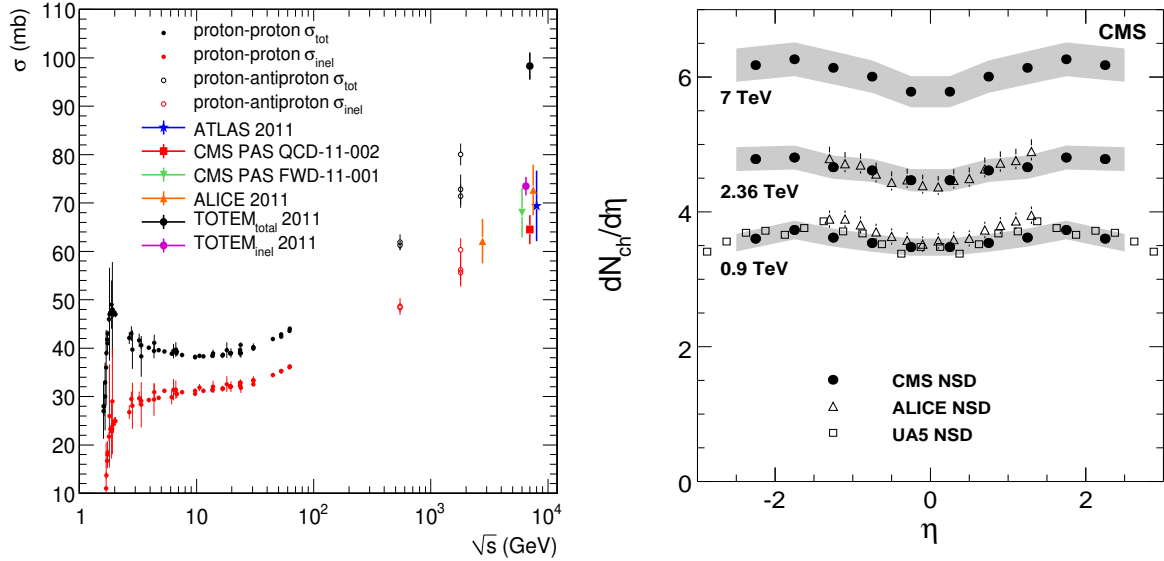
A négy alapvető kölcsönhatás közül a kvarkok között működő erők (kvantumszíndinamika, QCD) – különösen alacsony impulzusátadásnál – nehezen számolhatók. Ennek oka az, hogy a kölcsönhatás közvetítője, a gluon maga is töltött. Így a tudományterület fejlődését – a rácsszámolások mellett – a kísérletek legújabb eredményei irányítják.

A világ legnagyobb részecskegyorsítója – a Genf melletti Európai Részecskefizikai Laboratóriumban (CERN) felépült Nagy Hadronütköztető (LHC) – 2009 őszén kezdte meg működését: protonokat és nehezebb atommagokat gyorsít és ütköztet eddig soha nem látott energiákon. A CMS kísérlet keretében végzett kutatásaink célja a nukleonok valamint atommagok nagyenergiás ütközéseinek kísérleti vizsgálata, alapvető és magasabb szintű mérések elvégzése, elméleti elgondolások és ötletek tesztelése volt.

#### 3.1. Adatok felvétele

Csoportunk mindegyik LHC mérési időszakban aktív szerepet játszott. Részt vettünk

- 2010 novemberében és decemberében az első ólom-ólom ütközések adatainak felvételében, monitorozásában és kiértékelésében, a gyakori események tulajdonságai-



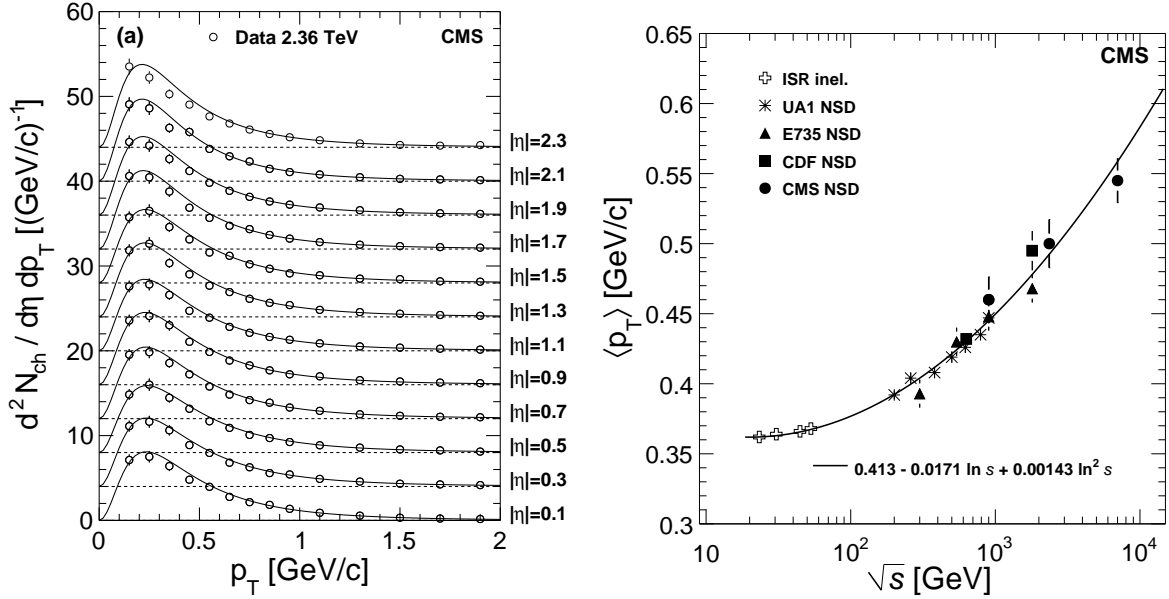
1. ábra. Balra: A p-p ütközések teljes és rugalmatlan hatáskeresztmetszeteinek összehasonlítása [15]. Jobbra: Töltött részecskék különféle tömegközépponti energiájú p-p ütközésekben mért pszeudorapiditás-eloszlása, összevetve korábbi mérések illetve más együttműködések adataival [4].

nak vizsgálatában. Nemcsak a szcintillátor-trigger (BSC), hanem a teljes első szintű trigger-rendszer beállításáért, a hatásfokok nyomon követéséért is a csoportunk volt a felelős;

- 2011 novemberében és decemberében az ólom-ólom ütközések felvételében és az eseményválogatás előkészítésében;
- 2012 szeptemberében elkészítettük az első proton-ólom ütközések [12] során alkalmazott trigger menüket, továbbá az eseményválogatás és más eseményjellemzők ellenőrzésével foglalkoztunk;
- 2013-as év elején a proton-ólom és a proton-proton ütközések adatainak felvételében. Ellenőriztük a felvett adatok minőségét, és meghatároztuk a rugalmatlan hadronikus ütközést tartalmazó események válogatási kritériumait különféle analízisek számára (pl. jet párok vizsgálata [13]). Mi feleltünk az ún. Magas Szintű Trigger (HLT) ütközések során történő futtatásáért és felügyeletéért. A munka sikerét a CMS együttműködés a „CMS Achievement Award” odaítélésével ismerte el [14].

### 3.2. Hatáskeresztmetszet

Meghatároztuk a  $\sqrt{s} = 7$  TeV energiájú proton-proton (p-p) szórás rugalmatlan hatáskeresztmetszetét egy egyszerű, eseményszámláláson alapuló módszerrel [15]. A munka során korai, alacsony átlapolású (*pile-up*) LHC adatokkal dolgoztunk. A mérés szüretlen (*zero bias*) triggerrel felvett, a Hadron Forward kaloriméterben beütést hagyó események számlálásán alapszik. Ez a válogatás érzékeny a teljes rugalmatlan hatáskeresztmetszet kb. 95%-ára. A hatáskeresztmetszeteket egy nagyon megengedő eseménykategóriára számítottuk ki, csak a kis tömegű diffraktív eseményeket kizárva. Ezen kívül becslést adunk



2. ábra. Balra: a 2,36 TeV-es p-p ütközésekben mért transzverzális impulzus ( $p_T$ ) eloszlások [3]. Jobbra: az átlagos  $p_T$  tömegközépponti energiától való függése [4].

a teljes rugalmatlan hatáskeresztmetszetre is (1-bal ábra). Hozzájárultunk az átlapoló ütközések mérését is felhasználó közös cikk elkészültéhez [16]. Az eredményeket a DIS2012 konferencián elsőként ismertettük [17].

A többi LHC kísérlettel (TOTEM, ATLAS, ALICE) összhangban azt találtuk, hogy a rugalmatlan hatáskeresztmetszet – a proton egyre kiterjedtebb gluonfelhőjének eredményeképpen – az ütközési energiával monoton nő. A különbözően definiált látható proton-proton hatáskeresztmetszeteket Monte Carlo eseménygenerátorok jóslataival hasonlítottuk össze. Annak ellenére, hogy a jóslatok abszolút normalizációja széles tartományon belül változik, az egyes pontok egymáshoz képesti általános tendenciáját a legtöbb modell jól leírja. A hatáskeresztmetszetek mérését a továbbiakban kiterjesztettük 8 TeV-es p-p valamint 5,02 TeV-es p-Pb ütközésekre is, hasonló módszerrel.

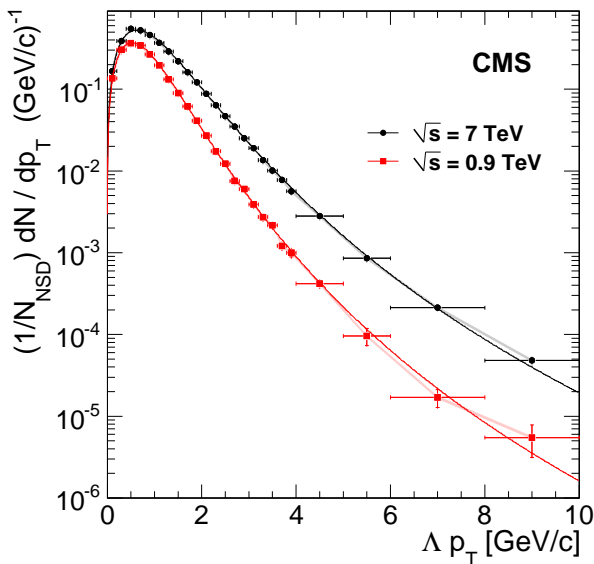
### 3.3. Hadronok eloszlásai, azonosított részecskék

**Töltött részecskék keltése p-p ütközésekben** ♦ Az LHC-nál a CMS detektorral először 2009 decemberében figyelhattunk meg proton-proton ütközéseket. A kísérlet első proton-proton ütközésekkel foglalkozó cikke  $\sqrt{s} = 0,9$  és 2,36 TeV-en [3] egyben az LHC első impulzuseloszlással foglalkozó, valamint az első rekordenergiás publikációja is, melyet néhány hónappal később a 7 TeV-es publikáció [4] követett. A három alkalmazott kiértékelési módszer közül kettőt (beütés-számolás és nyomkövetés) csoportunk dolgozta ki. A keletkezett töltött részecskék ( $\eta$  pszeudorapiditás,  $p_T$  transzverzális impulzus) binekben mért hozamát a nem egyszeresen diffraktív (*non single diffractive*, NSD) eseményekre korrigáltuk (1-jobb ábra). A töltött hadronok spektrumait a 0,1 – 4 GeV/c tartományban határoztuk meg. A kapott eredmények jól leírhatók a Tsallis-Pareto eloszlásokkal (2-bal ábra), pontosabban a Tsallis-entrópia maximalizálásából kapott q-exponenciálisokkal [18]. Az egyes bizonytalanságokat (esemény kiválasztás, akceptancia, beütés és nyomkövetés

hatásfoka, másodlagos hadronok részaránya, többszörös rekonstrukció, tévesztés,  $p_T$  integrálás) számba véve megbecsültük a mért eredmények várható szisztematikus hibáját.

A rapiditássűrűség ( $dN_{ch}/d\eta$ ) mérésében alkalmazott három kiértékelési módszer konzisztens eredményeket adott, ezzel is bizonyítva a nyomkövető rendszer kiváló teljesítményét és működésének részletes ismeretét. A kapott eredmények 0,9 TeV-en összhangban vannak korábbi proton-proton és proton-antiproton mérésekkel, továbbá megerősítik, hogy az ilyen energiájú p- $\bar{p}$  és p-p ütközésekben közel azonos mennyiségű hadron keletkezik. A 2,36 TeV-en és 7 TeV-en kapott hadronsűrűség a modellek által jóslotnál meredekebb energiafüggést mutat (2-jobb ábra).

Az eredményeket elsőként ismertethettük [19, 20, 21, 22]. A mérésekkel a p-p ütközésekben keltett részecskék tulajdonságainak tanulmányozását egy új energiatarományba terjesztettük ki. Az analízisek a hadronok kölcsönhatásait leírni próbáló modellek és eseménygenerátorok folyamatban levő tökéletesítéséhez fontos adatokkal szolgáltak, hozzájárulva a kis impulzusnál zajló folyamatok dinamikájának megértéséhez.



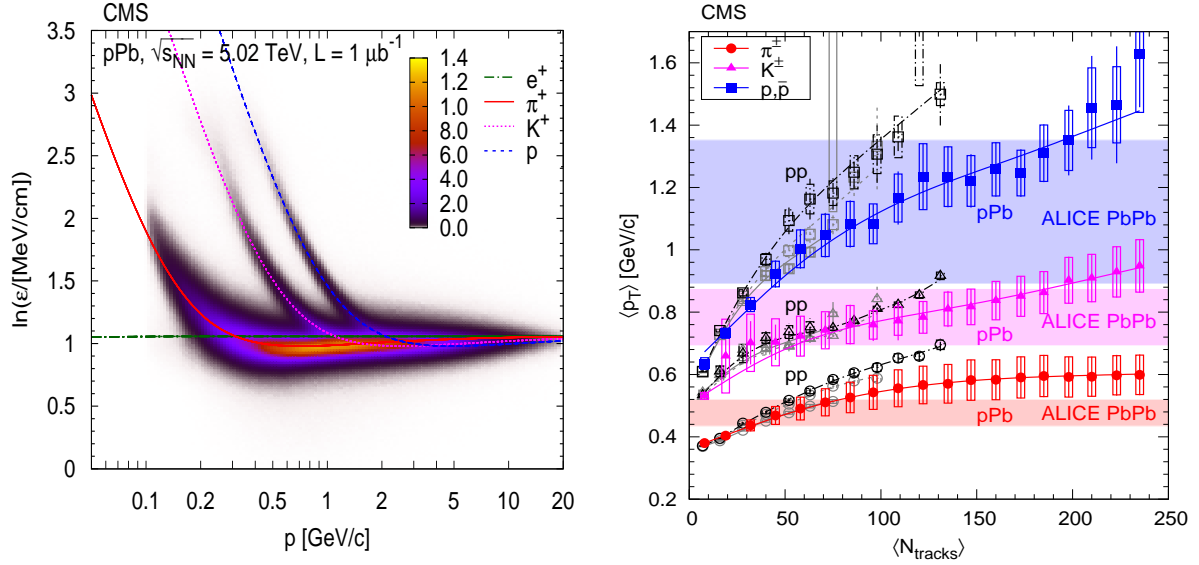
3. ábra. A 0,9 és 7 TeV-es p-p ütközésekben keltett  $\Delta$  részecskék transzverzális impulzusának eloszlása, egy Tsallis-Pareto illesztéssel összevetve [23].

eltérés a  $\Xi^-$ -esetén a legnagyobb, itt mintegy háromszor több részecskét látunk a modellvárakozáshoz képest. A részecskék spektruma jól illeszthető egy Tsallis-Pareto eloszlással. Az eredményeket a HCBM 2010 konferencián mutattuk be [24].

**Azonosított töltött részecskék keltése p-p ütközésekben** ♦ Megmértük p-p ütközésekben keletkezett töltött hadronok ( $\pi$ , K, p) eloszlásait  $\sqrt{s} = 0,9, 2,76$  és 7 TeV-es energiákon, a  $p_T \approx 0,1 - 1,7$  GeV/c transzverzális impulzus tartományban,  $|y| < 1$  rapiditásnál [5]. Az eseményeket egy kétoldali triggerrel válogattuk ki, amely a  $-3 < \eta < -5$  és a  $3 < \eta < 5$  pszeudorapiditás tartományokban követelt meg egyidejű hadronikus aktivitást. A töltött pionokat, kaonokat és protonokat a szilícium nyomkövetőben leadott energiájuk, valamint pályaillesztésük  $\chi^2$  értéke alapján tudtuk azonosítani (4-bal ábra). A

**Azonosított ritka részecskék keltése p-p ütközésekben** ♦ Részt vettünk a ritka kvarkokat tartalmazó részecskék ( $K_S^0$ ,  $\Lambda$ ,  $\Xi^-$ ) rapiditás- és transzverzális impulzus-

eloszlásainak mérésében 0,9 és 7 TeV-es p-p ütközésekben [23]. Az alkalmazott két mérési módszer közül a nagy hatásfokkal működő kiértékelést végeztük el, melynek során a fenti hosszú életidejű rezonanciákat a bomlási topológia alapján azonosítottuk (3. ábra). Eredményeink azt mutatták, hogy a ritka részecskék hozama a várakozásokhoz képest nagyobb, a mért részecskeszámok energiafüggése szintén meredekebb, mint azt vártuk. A folyamatokba mélyebb betekintést is kaptunk: a modellvárakozások (PYTHIA) és a mért eredmények közötti különbség nő, ahogy egyre nagyobb ritkaságú hadronokat vizsgálunk. Az

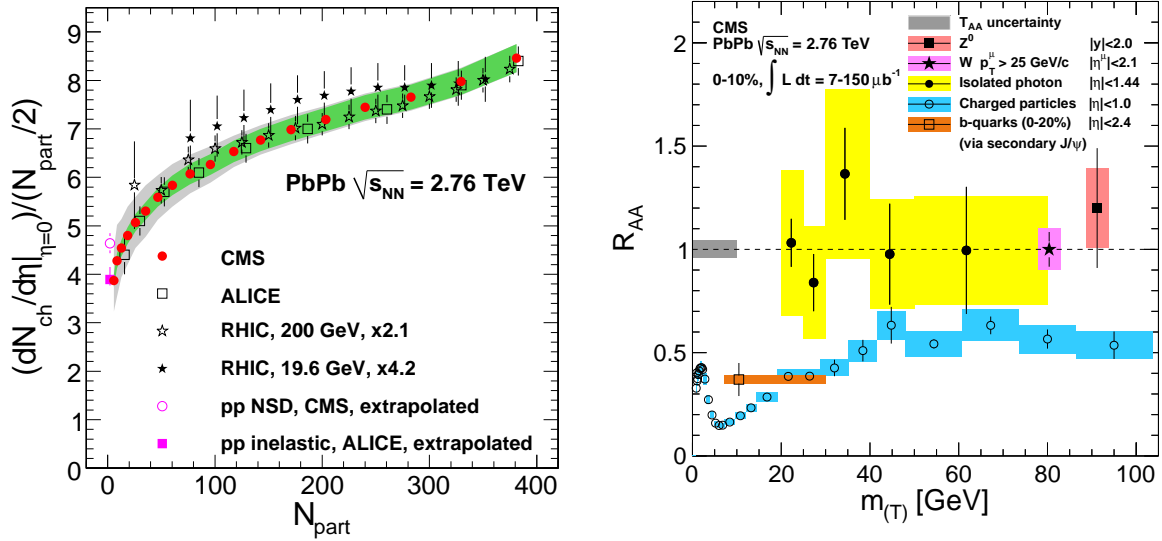


4. ábra. Balra: Az 5,02 TeV-es p-Pb ütközésekben keltett töltött részecskék  $\varepsilon$  legvalószínűbb differenciális energiavesztésének és a impulzusának viszonya [9]. A pionok, kaonok, protonok és elektronok elméleti görbéjét is bejelöltük. Jobbra: A különféle tömegközépponti energiájú p-p és p-Pb ütközésekben keletkező azonosított hadronok átlagos  $p_T$ -jének részecskeszámfüggése, összehasonlítva az ALICE kísérlet Pb-Pb adataival [9].

részecskék  $p_T$  spektruma Tsallis-Pareto eloszlásokkal jól leírható, hozamukat a PYTHIA6 és PYTHIA8 eseménygenerátorok többféle hangolásával hasonlítottuk össze. A pionok, kaonok és protonok átlagos  $p_T$ -je gyorsan nő a hadron tömegével és az eseményben mért töltött részecskék számával. Ez a növekedés nem függ az ütközés tömegközépponti energiájától. A protonok átlagos  $p_T$ -jének  $\sqrt{s}$ - és részecskeszám-függését a modellek nem tudják leírni.

A rapiditás-sűrűség és az átlagos transzverzális impulzus multiplicitás-függése arra utal, hogy LHC energiákon a részecskekeltés erősen korrelált az esemény részecskeszámával; sokkal inkább, mint az ütközés tömegközépponti energiájával. Ennek a felismerésnek egy közös, mélyebb oka is lehet: hadronok ütközéseiben a részecskekeltést az egyes partonok ütközésében rendelkezésre álló – ütközésről ütközésre változó mértékű – energia határozza meg. Az eredményeket elsőként, a DIS2012 konferencián ismertettük [25].

**Azonosított töltött részecskék keltése p-Pb ütközésekben** ♦ Megmértük a p-Pb ütközésekben keletkezett töltött hadronok ( $\pi$ , K, p) eloszlásait  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  TeV-es energián, a  $p_T \approx 0,1 - 1,7$  GeV/c transzverzális impulzus tartományban,  $|y| < 1$  rapiditásnál [9]. Az analízis a fentiekben ismertetett p-p kiértékeléshez nagyon hasonlóan zajlott. A részecskék  $p_T$  spektruma Tsallis-Pareto eloszlásokkal jól leírható, a pionok, kaonok és protonok átlagos  $p_T$ -je gyorsan nő a hadron tömegével és az eseményben mért töltött részecskék számával (4-jobb ábra). Ezeket a jellegzetességeket az EPOS szimuláció jól visszaadja, melyben szerepet játszhat, hogy a modell alkotói keltett részecskék kismértékű – talán már p-Pb ütközésekben fellépő – folyadék-viselkedését is figyelembe vették. A többi eseménygenerátor (AMPT, HIJING) meredekebb  $p_T$  eloszlást, valamint jelentősen különböző proton/pion arányt jósolt. A rapiditás-sűrűség és az átlagos transzverzális impulzus multiplicitás-függése arra utal, hogy LHC energiákon a részecskekeltés jellemzői



5. ábra. Balra: A 2,76 TeV-es Pb-Pb ütközések mért nukleonpáronkénti pszeudorapiditás függése az ütközésben részt vevő nukleonok számától, azok összehasonlítása kisebb tömegközépponti energiás, valamint p-p mérésekkel [30]. Jobbra: A 2,76 TeV-es centrális Pb-Pb ütközésekben megfigyelt töltött részecskék [31], Z- és W-bozonok  $R_{AA}$  nukleáris módosulási faktora a részecske (transzverzális) tömegének függvényében.

korrelált az esemény részecskeszámával; sokkal inkább, mint az ütközés tömegközépponti energiájával. Megegyező, kis részecskeszám mellett a p-p és p-Pb ütközések nagyon hasonlóak. Nagy részecskeszám esetén a p-p és p-Pb ütközések is nagyobb átlagos  $p_T$ -t adnak, mint a centrális Pb-Pb ütközésekben. Az eredményeket elsőként az IS2013 [26], majd az EPS HEP 2013 konferencián mutattuk be [27].

A gluontelítés [28] ötletét felhasználva könnyen megérthető a mért részecskespektrumok geometriai skálázása [29], mely szerint az invariáns  $d^2N/dy dp_T^2$  mennyiség csak  $\tau = p_T/Q_{sat}$  függvénye, ahol a telítési impulzus  $Q_{sat} = Q_0(p_T/\sqrt{s})^{-\lambda/2}$ . A feltevést mind a töltött, mind az azonosított hadronokra vonatkozó adataink igazolják.

### 3.4. Hadronok eloszlásai, nukleáris módosulási faktor

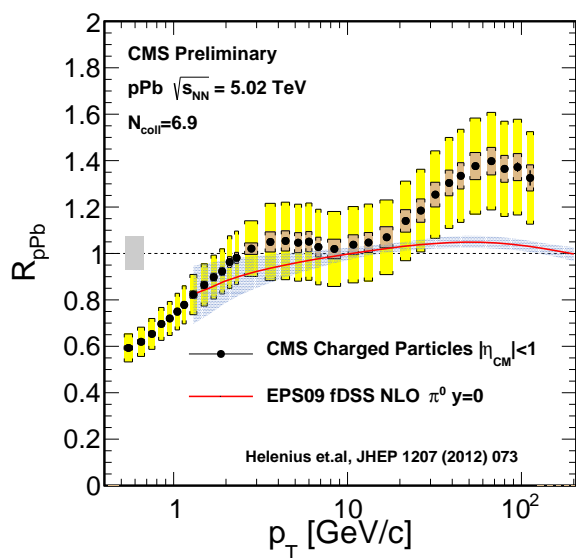
**Töltött részecskék keltése Pb-Pb ütközésekben** ♦ Meghatároztuk a töltött hadronok hozamának centralitásfüggését  $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$  TeV-es Pb-Pb ütközésekben [30]. A mérésben alkalmaztuk a korábban proton-proton ütközésekre kidolgozott, sikeres pixel-számlálás módszerét. A mért részecskeszám centralitásfüggése nagyon jó közelítéssel – skálafaktorok erejéig – megegyezik az alacsonyabb (RHIC) energiákon mért viselkedéssel. A periférikus Pb-Pb ütközésekben az egy nukleonpárra jutó részecskeszám kompatibilis a p-p ütközésekben mért értékekkel (5-bal ábra). A hadronsűrűség centralitásfüggése jól leírható egy partontelítési modellel, az ütközési energia függvényében megfigyelt változása pedig egy  $a + s_{NN}^n$  hatványfüggvénnyel illeszthető. A kapott adatok információval szolgálnak a proton és az atommag partonikus struktúrájáról és annak tömegközépponti energiától való függéséről. Az előzetes mérési eredményeket a Quark Matter 2011 konferencián mutattuk be [32].

Részt vettünk a töltött részecskék  $R_{AA}$  nukleáris módosulási tényezőjének mérésében



a fent említett Pb-Pb és p-p adatokat felhasználva [31]. Azt találtuk, hogy a közepes transzverzális impulzusú részecskékből (5 – 10 GeV/c) centrális Pb-Pb ütközésekben hétésszer kevesebb keletkezik, hozamuk „elnyomódik” a p-p ütközésekhez képest. Nagyobb  $p_T$  esetén az elnyomás kisebb, a 40 – 100 GeV/c tartományon  $R_{AA} \approx 0,5 - 0,6$ -ra nő, de a jelenség mindvégig megmarad (5-jobb ábra). A munka eredményeit a Hard Probes 2012 konferencián mutattuk be [33].

A várakozásoknak megfelelően az elnyomás az ütközés centralitásával nő, ugyanis a végállapotú rendszer egyre sűrűbb és egyre nagyobb lesz, így a keményen szórt partonok egyre nagyobb mennyiségű agyagon haladnak át, mielőtt hadronokba fragmentálódna. Az  $R_{AA}$  nagy  $p_T$ -ken látott emelkedése a nukleon-nukleon ütközésekből származó (*unquenched*) eloszlások laposodását tükrözheti, ha állandó relatív energiaveszteséget feltételezünk. Mindenesetre a pontos okok feltárásához még további mérések szükségesek.

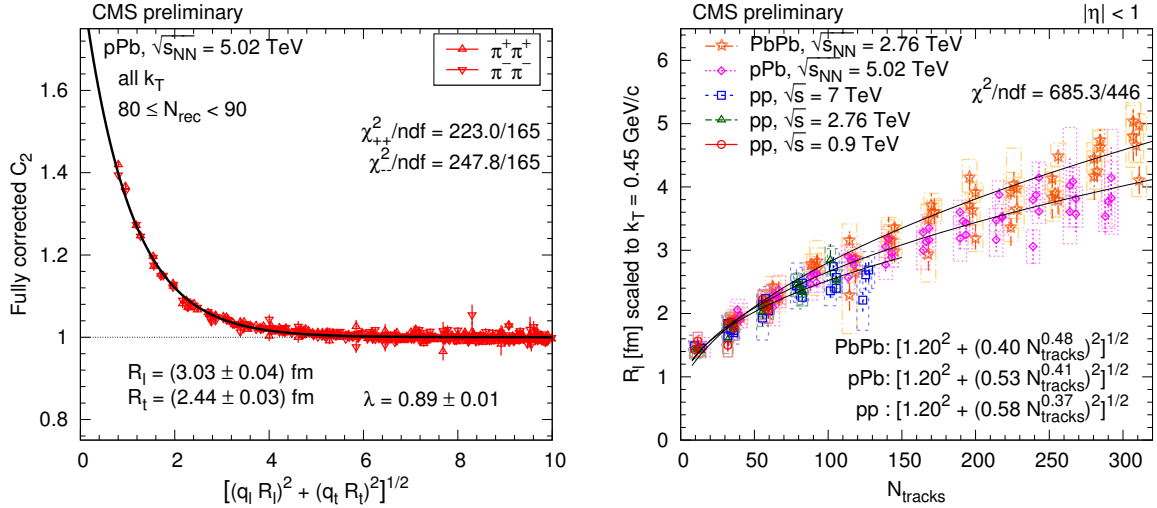


6. ábra. Az 5,02 TeV-es p-Pb ütközésekben keltett hadronok  $R_{AA}$  nukleáris módosulási faktora a részecske  $p_T$  transzverzális impulzusának függvényében [34], összehasonlítva egy – a maganyag partoneloszlás-függvényét használó – NLO számolással.

0,63, 1,8, and 1,96 TeV-es eloszlásait is. A kapott nukleáris módosulási faktor  $p_T \approx 4$  GeV/c-ig emelkedik, ahol eléri az 1-et (6. ábra). Utána 20 GeV/c-ig közel állandó, majd utána ismét növekedésbe kezd, elérve az 1.3 – 1.4-es értéket 70 GeV/c-nél. Különösen érdekes, hogy az 1 feletti értékek olyan  $p_T$  tartományban találhatóak, ahol modellek *anti-shadowing*-ot jósolnak ( $x = 0,02 - 0,2$  impulzushányad mellett). Ugyanakkor a módosulási faktor mért maximuma jóval magasabb, mint a maganyag partoneloszlás függvényeinek (nPDF) „anti”-árnyékolásából várnánk. (Ez utóbbi becslés a jelenleg rendelkezésre álló összes kemény szórás adat közös illesztéséből származik.) A friss eredményekről elsőként számoltunk be a Hard Probes 2013 konferencián [35].

**Töltött részecskék keltése p-Pb ütközésekben** ♦ Láttuk, hogy a nehézion-ütközésekben keltett forró és sűrű közegben a nagy transzverzális impulzusú részecskék hozama jelentősen kisebb, mint azt a megfelelő számú független nukleon-nukleon ütközés egymásra helyezéséből várnánk. Mi a helyzet az elemi p-p és a bonyolult Pb-Pb ütközési rendszerek között valahol félúton elhelyezkedő p-Pb ütközések esetén, ott is elnyomást látunk vagy valami mást?

Megmértük a töltött részecskék  $p_T$  spektrumát különböző kirepülési szögekre 5,02 TeV nukleonpáronkénti energiájú proton-ólom ütközésekben [34]. A proton-ólom nukleáris módosulási faktor ezen energián történő megállapításához (valódi adat hiányában) különböző interpolációs módszerek segítségével megalkottunk egy referencia proton-proton spektrumot. Itt felhasználtuk a korábbi 0,9, 2,76 és 7 TeV-es CMS adatokat, továbbá a CDF kísérlet



7. ábra. Balra: az 5,02 TeV-es p-Pb ütközésekben, egy adott részecskeszám- és impulzusosztályban mért kétrészecske korrelációs függvény pionokra [10]. Jobbra: a töltött pionok Bose-Einstein korrelációja alapján meghatározott nyalábirányú  $R_l$  sugarak az ütközések részecskeszámának függvényében, p-p, p-Pb és periférikus Pb-Pb ütközésekre. Az értékek transzverzális párimpulzus ( $k_T$ ) függését kiskáláztuk [10].

### 3.5. Kétrészecske-korrelációk

**Töltött részecskék szöghorrelációi p-Pb ütközésekben** ♦ Az eseményválogatás és más eseményjellemzők ellenőrzésével hozzájárultunk a kétrészecske-szöghorrelációk méréséhez  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  TeV-es p-Pb ütközésekben [36]. Az eredményeink megmutatták, hogy a nagy multiplicitású p-p ütközésekben kimutatott hosszútávú ( $2 < |\Delta\eta| < 4$ ,  $\Delta\phi \approx 0$ ) korrelációk – még nagyobb mértékben – megjelennek a nagy részecskeszámú p-Pb ütközésekben is. A korreláció erőssége a  $p_T = 1 - 1,5$  GeV/c tartományban maximális, közel arányos az eseményben keltett töltött részecskék számával.

Ez a felfedezés a nehézion-fizikai közösség érdeklődésének középpontjába került, és pontos eredete még magyarázatra vár. Egyes modellek szerint hosszútávú korrelációkat már elemi p-p és p-Pb ütközésekben is kaphatunk a rendszer kollektív, hidrodinamikával leírható kiterjedése során, eseményről eseményre fluktuáló kezdeti feltételek mellett [37]. A korrelációkból számolható elliptikus  $v_2$  és trianguláris  $v_3$  Fourier-együtthatók kompatibilisek a modell jóslataival. Ugyanakkor a megfigyelt hegygerincszerű struktúrát (*ridge*) az ún. *color-glass condensate* elméletben is megjósolták. Itt az effektust a kezdeti állapotban meglévő gluonok korrelációjával magyarázzák [38], mert a gluonok közel egyirányú (*collinear*) kibocsátása kis  $x$ -ekre telítődik. Bár a modell jellegében helyes korrelációs erősségeket ad, számszerű jóslatai egyelőre nem mutatnak jó egyezést az adatokkal.

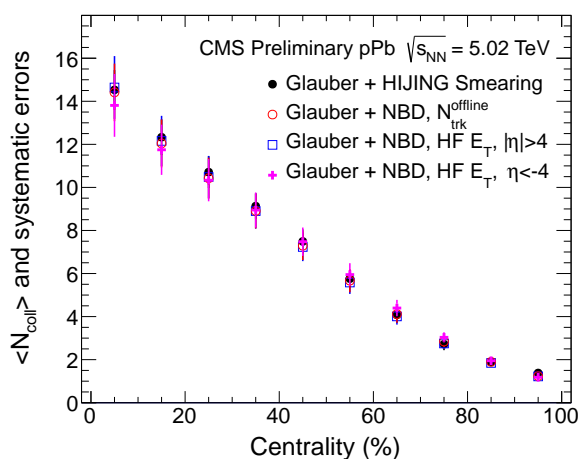
**Azonosított töltött részecskék kvantumkorrelációi p-p, p-Pb és Pb-Pb ütközésekben** ♦ Megmértük azonosított, kis impulzuskülönbségű hadronok korrelációit p-p ( $\sqrt{s} = 0,9, 2,76$  és  $7$  TeV), p-Pb ( $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  TeV) és periférikus Pb-Pb ütközésekben ( $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$  TeV) [10]. A töltött pionokat és kaonokat alacsony  $p_T$ -n,  $|\eta| < 1$  pszeudorapiditás esetén a szilícium nyomkövetőben leadott energiájuk alapján azonosítottuk. A kétrészecske korrelációs függvények a kvantumstatisztika (Bose-Einstein) mellett a Coulomb-kölcsönhatás hatásait mutatják, de a rezonanciák többtest bomlásainak és

a jetek fragmentációjának szerepét is jelzik. Az egy-, két- és háromdimenziós korrelációs függvények jellemzőit a részecskepár  $k_T$  transzverzális impulzusának, valamint az esemény részecskeszámának függvényében is vizsgáltuk. Az eloszlások a részecskepár relatív impulzusában kiválóan leírhatók egy exponenciális parametrizációval (7-bal ábra). Így adataink minden esetben egy Cauchy (Lorentz) eloszlású forrásra utalnak, szemben a nehézionfizikában gyakran alkalmazott gaussos eloszlásokkal. Az ütközési zóna karakterisztikus mérete, sugaraira 1 – 5 fm közötti értékeket kaptunk, ahol a legnagyobb méreteket a nagyon magas részecskeszámú p-Pb és Pb-Pb ütközésekben mértük. Az összes tanulmányozott ütközési rendszerre és részecskeszámra a sugarak növekvő  $k_T$ -vel csökkennek. A sugarak részecskeszám- és  $k_T$ -függése jól szétválasztható, faktorizálható. A három-dimenziós analízis alapján míg a Pb-Pb forrás gömbszerű, a p-p és p-Pb ütközési zóna a nyálábirányban megnyúlt ( $R_l > R_t$ , valamint  $R_l > R_s > R_o$ ). A különféle vizsgált ütközési rendszerek közötti eltérés leginkább az *out* irányban mutatkozik, ami kapcsolatban lehet a keltett rendszerek különböző időtartamával.

A p-p, p-Pb és periférikus Pb-Pb ütközések közti hasonlóságok egy közös kritikus hadronsűrűségre utalnak, hiszen az alkalmazott korrelációs technika a rendszer jellemző méretét méri abban a pillanatban, amikor az azt alkotó hadronok megszűntek egymással kölcsönhatni.

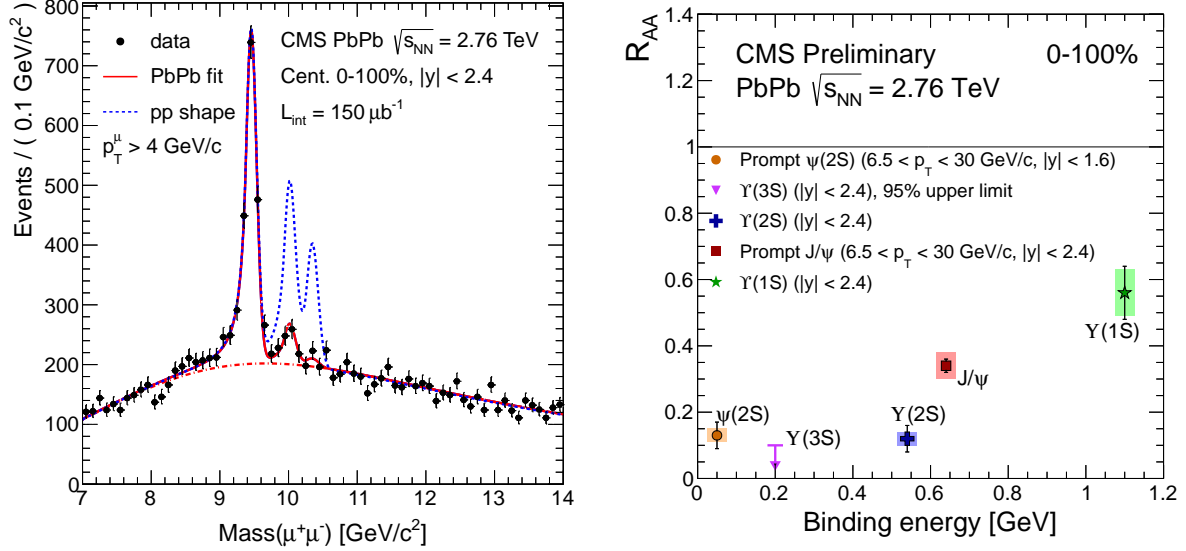
**Jet-részecske korrelációk Pb-Pb ütközésekben** ♦ Részt vettünk a jet-részecske korrelációk kiértékelésében Pb-Pb ütközésekben. Meghatároztuk a nyomkövetés hatásfokát, valamint a végső eredmények nyomkövetéssel kapcsolatos szisztematikus bizonytalanságait [39]. Azt kaptuk, hogy centrális nehézion-ütközésekben a jetek több alacsony impulzusú ( $p_T < 3 \text{ GeV}/c$ ) részecskét tartalmaznak, mint p-p kölcsönhatásban. Ugyanakkor periférikus ütközésekben a tartalmazott alacsony  $p_T$ -s részecskék száma mérési hibán belül megegyezik a p-p-ben mértekkel.

### 3.6. A p-Pb ütközések centralitása



8. ábra. A p-Pb ütközések centralitásának és a páronkénti ütközések számának kapcsolata, különféle kiértékelési módszerek esetén [40].

Szimulációk segítségével megvizsgáltuk a proton-ólom ütközések centralitásának – avagy a rugalmatlan proton-nukleon ütközések számának – mérési lehetőségeit [40, 41]. Ezen számok becslésére akkor van szükség, amikor a p-Pb ütközésekben mért mennyiségeket p-p vagy Pb-Pb eredményekhez akarjuk hasonlítani. Nehézion-ütközések esetén a részecskeszám vagy energia mérése egyaránt megfelelő, hiszen mindkettő monoton változik a centralitással, ugyanakkor a keltett részecskék nagy száma miatt egymással erősen korrelálnak. Ezzel szemben p-Pb ütközésekben a helyzet sokkal bonyolultabb: a fenti módszerek használatával – a keltett hadronok kis száma miatt



9. ábra. Balra: A 2,76 TeV-es Pb-Pb és p-p ütközésben detektált müonpárok invariáns tömeg eloszlása, az  $\Upsilon$  részecske és gerjesztései tömegtartományában [42]. A Pb-Pb (folytonos) és p-p illesztéseket (pontozott) is ábrázoltuk. Jobbra: A müonpárra bomló nehéz mezonok  $R_{AA}$  nukleáris módosulási faktora a kötési energia függvényében [42, 43].

– a centralitás-skála torzul (*bias*). Vizsgálataink azt mutatták, hogy a fragmentált ólommag irányába repülő keltett részecskék energiájának megmérésével a rugalmatlan proton-nukleon ütközések száma kis torzítással becsülhető. A megállapítás egy optimalizálás eredménye, ahol a részecske-energiák súlyai  $\eta$ -függőek voltak. A legjobb eredményeket olyan súlyokra kaptuk, melyek csak a CMS elülső hadron-kaloriméterének belső gyűrűjét ( $4 < \eta < 5$ ) veszik figyelembe. A résztvevő nukleonok száma és az impakt paraméter megfelelő átlagait, szórásait egy Glauber-modell segítségével számoltuk ki (8. ábra).

A felvett p-Pb adatokat kiértékeltek és kalibráltak, majd korrigáltak a detektor hatásfokára a fenti szimulációja alapján. Különböző Glauber modellek felhasználásával meghatároztuk az egy ütközésben résztvevő nukleonok átlagos számát.

### 3.7. Müonpárra bomló rezonanciák

A mezonok és bozonok leptonpárra való bomlása (vagy konverziója) a CMS detektorban tisztán észlelhető, hiszen a müonok és elektronok detektálása kiváló.

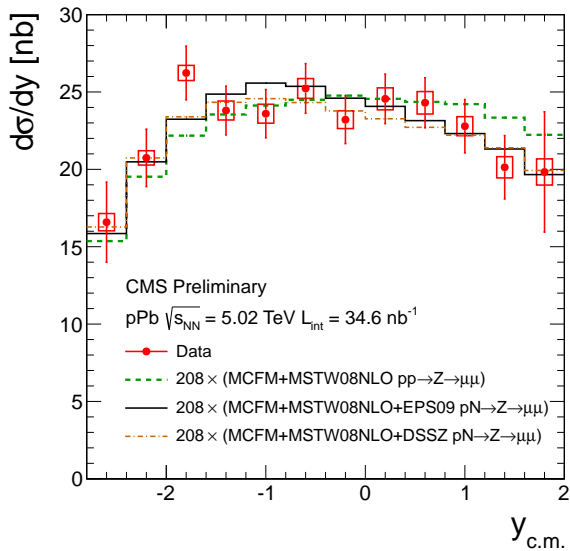
**Nehéz mezonok** ♦ A nehézion-ütközésekben keletkező magas hőmérsékletű közegben a kis kötési energiájú, gyengén kötött rezonanciák könnyen felbomlanak, amit az adott állapotok elnyomásaként észlelhetünk.

Részt vettünk a  $\Upsilon$  részecske ( $b\bar{b}$ ) és gerjesztett állapotai relatív és abszolút elnyomásának analízisében (9-bal ábra). Az  $\Upsilon(nS)$  részecske centralitásra átlagolt  $R_{AA}$  nukleáris módosulási faktora Pb-Pb ütközésekben  $0,56 \pm 0,08(stat) \pm 0,07(syst)$  az  $\Upsilon(1S)$ ,  $0,12 \pm 0,04(stat) \pm 0,02(syst)$  az  $\Upsilon(2S)$ , valamint 95% biztonsággal kisebb, mint 0,10 az  $\Upsilon(3S)$  állapotokra vonatkozóan [42]. A kapott eredmények jól mutatják az  $\Upsilon$  gerjesztett állapotainak fokozatos elnyomását, azok egymás utáni „megolvadását”. Ilyen értelemben a fenti

részecskék tanulmányozásával következtethetünk a forró és sűrű maganyag hőmérsékletére (9-jobb ábra).

**Elektrogyenge bozonok** ♦ Azt várjuk, hogy a gyengén kölcsönható bozonokra ( $W^\pm$ ,  $Z^0$ ) – a hadronokkal ellentétben – a nehézion-ütközésekben keletkező forró és sűrű közeg nincs jelentős hatással. Leptonos (elektronos vagy müonos) bomlásuk során a bomlástermékek erős kölcsönhatás nélkül hagyják el a keletkezett közeget, így az ütközés kezdeti állapotáról szolgáltatva információt.

Megmértük a  $Z$ -bozonok hatáskeresztmetszetét 2.76 TeV-es Pb-Pb és p-p ütközésekben, melyeket vezető rend feletti (*next-to-leading-order*, NLO) számolásokkal összehasonlítva jó egyezést találtunk [43]. A Pb-Pb eredményeket az ütközésben történt független nukleon-nukleon ütközések átlagos számával skálázva hasonlítottuk össze a p-p eredményekkel, és meghatároztuk a  $Z$ -bozonok  $R_{AA}$  nukleáris módosulási faktorát. Azt találtuk, hogy az  $R_{AA}$  átlagos értéke a müonos bomlási csatornában  $1,06 \pm 0,05(stat) \pm 0,11(syst)$ , amely jól egyezik az elektronos eredménnyel:  $1,02 \pm 0,08(stat) \pm 0,17(syst)$ . Így a  $Z$ -bozonok keltését a nehézion-ütközésekben keletkező erősen kölcsönható anyag jelentősen nem befolyásolja. A nukleáris módosulási faktor vizsgálata az események centralitásának függvényében azt mutatja, hogy a  $Z$ -bozonok keletkezési valószínűsége a független nukleon-nukleon ütközések számával skálázik. A  $Z$ -bozonok rapiditásának és transzverzális impulzusának függvényében mért  $R_{AA}$  nem mutat jelentős eltérést 1-től, tehát a lehetséges kezdeti állapotú effektusok a mérési hibákon belül vannak. Az eredményeket az IS2013 konferencián ismertettük [44].



10. ábra. Az 5,02 TeV-es p-Pb ütközésekben keltett  $Z$ -bozonok hatáskeresztmetszetének rapiditáseloszlása [45], összehasonlítva különféle modellszámolásokkal.

Meghatároztuk a  $Z$ -bozonok keltési valószínűségét p-Pb ütközésekben, szintén a bozonok müonpárra való bomlásának segítségével [45]. A mért eredményeket összehasonlítottuk különböző nukleáris partoneloszlás-függvények által jósolt elméleti hatáskeresztmetszetekkel. Azt találtuk, hogy első rendben – a Pb-Pb esethez hasonlóan – a  $Z$ -bozonok hozama a proton-nukleon ütközések számával arányos. A hatáskeresztmetszet rapiditásfüggése a hideg maganyag módosító hatására utaló jeleket mutat (10. ábra), de számszerű állításokhoz több adatra lenne szükségünk. Az eredményeink az atommagok partoneloszlás-függvényeinek további elméleti tanulmányozásához adnak támpontokat, a fázistér eddig elérhetetlen tartományában [12]. Az új eredményeket elsőként, a Quark Matter 2014 konferencián ismertettük [46].

## 4. Megbízatások, tisztségek

Siklér Ferenc a CMS együttműködés erős kölcsönhatással foglalkozó csoportját (QCD 2010-2011) vezette, majd a publikációs bizottságban véleményezte a referált folyóiratokba beküldött cikkeket (2012-). Veres Gábor előbb a nehézion (HIN, 2011-2012), majd a kisszögű szórássok mérésére specializálódott (FSQ, 2014-2015) csoportokat vezette [47, 48, 49, 50, 51], először CERN ösztöndíjasként, majd tudományos munkatársként. A fent említett három kiértékelő csoport mindegyikében sok publikáció, számos konferenciaelőadás és -cikk készítését felügyelték.

Krajczár Krisztián a HIN csoport spektrumokkal foglalkozó (2012-2013), valamint a szoftvertesztelési alcsoportját irányította (2013-), először MIT-, majd CERN ösztöndíjasként. Ezen felül a HIN csoport egyik, eseménykiválasztással foglalkozó felelőse (2013-). Zsigmond Anna a HIN csoport centralitás-analízissel és -szoftverrel foglalkozó alcsoportját vezette.

Sok CMS publikáció előkészítésében töltöttünk be belső bíráló bizottsági (tag vagy elnöki) szerepet. A CERN-ben nyári diákok és ösztöndíjasok dolgoztak a vezetésünkkel.

Az elmúlt években csoportunk minden aktív tagjai magasabb tudományos fokozatot szerzett:

Krajczár K	PhD (ELTE)	„Measurement of spectra of charged hadrons and weakly decaying strange particles at LHC energies with the CMS detector”, 2011
Zsigmond A	MSc (ELTE)	„A rugalmatlan proton-proton hatáskeresztmetszet mérése a CMS kísérletben”, 2012
Englert D	BSc (BME)	„Study of hadron resonances and their properties in p-Pb collisions at CMS”, 2013
Veres G	DSc/habil (MTA/ELTE)	„Az erős kölcsönhatás kísérleti vizsgálata elemi részecskék és nehéz atommagok ütközéseinek összehasonlításával”, 2013/2014
Siklér F	DSc (MTA)	„Új kiértékelési módszerek és alkalmazásuk az erős kölcsönhatás vizsgálatában”, 2014

## 5. Összefoglalás

A gáztöltésű és a szilícium-alapú detektorok kiértékelésével, a töltött részecskék nyomonkövetésével és azonosításával kapcsolatos új módszereket dolgoztunk ki, majd alkalmaztunk.

Az elemi proton-proton ütközésekben elért eredményeink nagyban hozzájárultak az erős kölcsönhatás leírására vállalkozó Monte Carlo modellek javításához, paramétereik igazításához. A leggyakrabban alkalmazott PYTHIA generátor esetében a következő változtatások voltak szükségesek: a részecskeszám energiával való gyorsabb skálázása; barionok, főként ritka barionok megnövekedett keltése; megnövelt barion-transzport a központi régióba; a ritkaság elnyomásának csökkentése; kisebb szín-összekapcsolás (*color reconnection*) az átlagos  $p_T$  részecskeszám-függésének leírására. Látszik, hogy a többféle, sok-sok paraméterrel dolgozó modell mellett a kapott adatok jó egyezést mutatnak egyszerű, a jelenségek egy megfelelő effektív, „köztes síkján” aktív leírásokkal (Tsallis-eloszlás, gluontelítés). Az események legfontosabb jellemzőit ( $dN/d\eta$  pseudorapiditás-sűrűség,  $\langle p_T \rangle$

átlagos transzverzális impulzus, a kölcsönhatási tartomány jellemző  $R_l, R_o, R_s$  korrelációs méretei) döntően az ütközésben keltett részecskék száma határozza meg. A kezdeti ütközési rendszer milyensége és a tömegközépponti energia hatása nagyon szerény. A látott viselkedés alapján kezdeti gluonsűrűség és a kritikus hadronsűrűség szerepe fontos.

Az ólom-ólom ütközésekben létrejövő kvark-gluon plazma vizsgálatában csoportunk munkája szintén alapvető fontosságú volt. A töltött hadronok keletkezése – korábbi kisebb energiájú mérésekkel összhangban – elnyomódik, és érdekes  $p_T$ -függést mutat. Nagy transzverzális impulzusnál az elnyomásának mértéke a keltett partonok közegben leadott energiájáról ad információt a különféle elméleti modellek számára. Az  $\Upsilon$  részecske különböző gerjesztett állapotainak – kötési energiától függő – fokozatos elnyomása a közeg hőmérsékletét jelzi. A forró és sűrű közegben módosult folyamatok megértéséhez elektrogyenge bozonok megfigyelése szolgálhat egyfajta referenciaként. Igazoltuk, hogy a  $Z$ -bozonok nukleáris módosulási faktora konzisztens 1-gyel, nem függ a rapiditástól, a transzverzális impulzustól vagy az esemény centralitásától.

A proton-ólom ütközések elsősorban szintén referenciaként szolgálnak. Segítségükkel a hideg maganyag (kezdeti állapot) hatásait tudjuk különválasztani a kvark-gluon plazma kialakulásának (végállapot) jeleitől. Ugyanakkor eredményeink azt mutatták, hogy a proton-ólom ütközések önmagukban is érdekesek. Az ütközések centralitásának, vagyis az ütközésben résztvevő nukleonok átlagos számának meghatározását különböző mód-szerekkel végeztük el. A töltött hadronok nukleáris módosulási faktora proton-ólom ütközésekben nem mutat elnyomást a nagy  $p_T$ -jú tartományban, de 20 GeV/ $c$  felett kis hozamtöbbletet találtunk, amit a jelenlegi nukleáris partoneloszlás-függvények (nPDF) nem tudnak leírni. Egy új nPDF parametrizáció meghatározásához – a töltött hadronok eloszlásai mellett – a  $Z$ -bozonok keltésének részletes mérésére volt szükség.

Az OTKA támogatásával végzett kutatás során született cikkekre eddig 1285 hivatkozás érkezett (inSpire).

Budapest, 2014. szeptember 30.

## Hivatkozások

- [1] CMS Collaboration, „The CMS experiment at the CERN LHC,” [JINST 3 \(2008\) S08004](#).
- [2] F. Siklér, „Study of clustering methods to improve primary vertex finding for collider detectors,” [Nucl. Instrum. Meth. A 621 \(2010\) 526–533](#), [arXiv:0911.2767 \[physics.ins-det\]](#).
- [3] CMS Collaboration, „Transverse momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at  $\sqrt{s} = 0.9$  and 2.36 TeV,” [JHEP 02 \(2010\) 041](#), [arXiv:1002.0621 \[hep-ex\]](#).  
Internal reference: I. Cali, T. J. Kim, Y. Kim, K. Krajczár, Y.-J. Lee, W. Li, C. Loizides, F. Ma, C. Roland, G. Roland, R. Rougny, F. Siklér, H. Snoek, G. Veres, E. Wenger, Y. Yilmaz, A. Yoon, „Transverse momentum and

- pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at  $\sqrt{s} = 900$  GeV and 2.36 TeV,” CMS AN 2009/182 (2010).
- [4] CMS Collaboration, „Transverse-momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV,” *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 022002, [arXiv:1005.3299 \[hep-ex\]](#).  
Internal reference: I. Cali, Y. Kim, K. Krajczár, Y.-J. Lee, W. Li, F. Ma, C. Roland, G. Roland, F. Siklér, G. Veres, E. Wenger, Y. Yilmaz, A. Yoon, „Transverse momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV,” CMS AN 2010/069 (2010).
- [5] CMS Collaboration, „Study of the inclusive production of charged pions, kaons, and protons in pp collisions at  $\sqrt{s} = 0.9, 2.76,$  and 7 TeV,” *Eur. Phys. J. C* **72** (2012) 2164, [arXiv:1207.4724 \[hep-ex\]](#).  
Internal reference: F. Siklér, „Spectra of charged hadrons in pp collisions at  $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$  and 7 TeV identified via tracker energy loss,” CMS AN 2010/143 (2011).
- [6] <http://code.google.com/p/bud-aida/>.
- [7] F. Siklér and S. Szeles, „Optimized estimation of energy loss rate for charged particles from energy deposit measurements in tracking detectors,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **687** (2012) 30–39, [arXiv:1111.2491 \[physics.data-an\]](#).
- [8] F. Siklér, „Particle identification with a track fit  $\chi^2$ ,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **620** (2010) 477–483, [arXiv:0911.2624 \[physics.ins-det\]](#).
- [9] CMS Collaboration, „Study of the production of charged pions, kaons, and protons in pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV,” *Eur. Phys. J. C* **74** (2014) 2847, [arXiv:1307.3442 \[hep-ex\]](#).  
Internal reference: F. Siklér, „Study of the inclusive production of charged pions, kaons, and protons in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV,” CMS AN 2012/404 (2013).
- [10] CMS Collaboration, „Femtoscopia with identified charged hadrons in pp, pPb, and peripheral PbPb collisions at LHC energies,” CMS PAS HIN-14-013 (2014) .  
Internal reference: F. Siklér, „Femtoscopia with identified charged hadrons in pp, pPb, and peripheral PbPb collisions at LHC energies,” CMS AN 2014/042 (2014).
- [11] F. Siklér, „A parametrisation of the energy loss distributions of charged particles and its applications for silicon detectors,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **691** (2012) 16–29, [arXiv:1111.3213 \[physics.data-an\]](#).
- [12] C. Salgado, J. Alvarez-Muniz, F. Arleo, N. Armesto, M. Botje, . . . , F. Siklér, *et al.*, „Proton-Nucleus Collisions at the LHC: Scientific Opportunities and Requirements,” *J. Phys. G* **39** (2012) 015010, [arXiv:1105.3919 \[hep-ph\]](#).
- [13] CMS Collaboration, „Studies of dijet transverse momentum balance and pseudorapidity distributions in pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV,” *Eur. Phys. J. C* **74** (2014) 2951, [arXiv:1401.4433 \[nucl-ex\]](#).



- Internal reference: M. Akbiyik, A. Barbieri, R. Chudasama, D. C. Gulhan, K. Jung, M. M. Varma, D. Velicanu, Y. Yilmaz, *A. J. Zsigmond*, *K. Krajczár*, P. Kurt, Y. S. Lai, Y.-J. Lee, Y. Mao, J. Robles, V. Zhukova, D. Dutta, P. K. Netrakanti, M. Nguyen, C. Roland, G. M. Roland, S. Salur, G. Stephans, *G. Veres*, B. Wyslouch, „Study of dijet momentum-balance and pseudorapidity distributions in pPb collisions at nucleon-nucleon center-of-mass energy = 5.02 TeV,” CMS AN 2012/473 (2013).
- [14] CMS Achievement award [Run Coordination], for *K. Krajczár*, „For his contribution to the CMS High Level Trigger during the p-Pb run in 2013,” <http://cms.web.cern.ch/content/achievement-awards-2013>.
- [15] CMS Collaboration, „Measurement of the inelastic pp cross section at  $\sqrt{s} = 7$  TeV,” CMS PAS QCD-11-002 (2011) .  
Internal reference: J. Gartner, *A. J. Zsigmond*, *G. Veres*, A. de Roeck, A. J. Bell, „Measurement of the inelastic pp cross section at  $\sqrt{s} = 7$  TeV,” CMS AN 2011/061.
- [16] CMS Collaboration, „Measurement of the inelastic proton-proton cross section at  $\sqrt{s} = 7$  TeV,” *Phys. Lett. B* 722 (2013) 5–27, [arXiv:1210.6718 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1210.6718).  
Internal reference: J. Gartner, *A. J. Zsigmond*, *G. Veres*, A. de Roeck, A. J. Bell, „Measurement of the inelastic pp cross section at  $\sqrt{s} = 7$  TeV,” CMS AN 2011/061. CMS AN 2011/104.
- [17] *A. J. Zsigmond* [CMS Collaboration], „Inelastic proton-proton cross section measurements in CMS at  $\sqrt{s} = 7$  TeV,” [arXiv:1205.3142 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1205.3142).  
<http://dx.doi.org/10.3204/DESY-PROC-2012-02/181>. Proceedings of the DIS 2012 Conference, Bonn.
- [18] T. S. Biró, G. Purcsel, and K. Ürmösy, „Non-Extensive Approach to Quark Matter,” *Eur. Phys. J. A* 40 (2009) 325–340, [arXiv:0812.2104 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/0812.2104).
- [19] *G. I. Veres* [CMS Collaboration], „Inclusive distributions of charged hadrons in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 0.9$  and 2.36 TeV,” [arXiv:1006.0948 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1006.0948). Presented at the Lake Louise Winter Institute, 2010.
- [20] *F. Siklér* [CMS Collaboration], „Highlights from CMS,” PoS DIS2010 (2010) 006. Proceedings of the DIS 2010 Conference, Florence.
- [21] *K. Krajczár* [CMS Collaboration], „QCD physics from CMS,” PoS DIS2010 (2010) 117. Proceedings of the DIS 2010 Conference, Florence.
- [22] CMS Collaboration Collaboration, „Measurements of hadron production at CMS,” *EPJ Web Conf.* 13 (2011) 03002. Proceedings of the HCBM 2010 Conference, Budapest.
- [23] CMS Collaboration, „Strange particle production in pp collisions at  $\sqrt{s} = 0.9$  and 7 TeV,” *JHEP* 05 (2011) 064, [arXiv:1102.4282 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1102.4282).  
Internal reference: *K. Krajczár*, „Spectra of identified neutral hadrons at 0.9 and 7 TeV using decay topology,” CMS AN 2010/144 (2011).

- [24] K. Krajczár [CMS Collaboration], „Spectra of weakly decaying identified particles at 0.9 TeV and 7 TeV with the CMS detector,” [EPJ Web Conf. 13 \(2011\) 03003](#). Proceedings of the HCBM 2010 Conference, Budapest.
- [25] F. Siklér [CMS Collaboration], „Spectra of charged pions, kaons, and protons identified via tracker energy loss from CMS,” <http://dx.doi.org/10.3204/DESY-PROC-2012-02/182>. Proceedings of the DIS 2012 Conference, Bonn.
- [26] F. Siklér [CMS Collaboration], „Identified particles in pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV measured with the CMS detector,” [Nucl. Phys. A 926 \(2014\) 128–135](#). Proceedings of the IS2013 Conference, Illa da Toxa.
- [27] K. Krajczár [CMS Collaboration], „Measurements of hadron production in pPb collisions in CMS,” PoS EPS-HEP2013 (2013) 181. Proceedings of the EPS HEP 2013 Conference, Stockholm.
- [28] L. D. McLerran and R. Venugopalan, „Computing quark and gluon distribution functions for very large nuclei,” [Phys. Rev. D 49 \(1994\) 2233–2241](#), [arXiv:hep-ph/9309289 \[hep-ph\]](#).
- [29] M. Praszalowicz, „Improved Geometrical Scaling at the LHC,” [Phys. Rev. Lett. 106 \(2011\) 142002](#), [arXiv:1101.0585 \[hep-ph\]](#).
- [30] CMS Collaboration, „Dependence on pseudorapidity and centrality of charged hadron production in PbPb collisions at a nucleon-nucleon centre-of-mass energy of 2.76 TeV,” [JHEP 08 \(2011\) 141](#), [arXiv:1107.4800 \[nucl-ex\]](#).  
Internal reference: Y.-J. Lee, K. Krajczár, G. Roland, G. Veres, E. Wenger, Y. Yilmaz, „Pseudorapidity distributions of charged hadrons produced in Pb+Pb collisions at  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV,” CMS [AN 2010/365](#).
- [31] CMS Collaboration, „Study of high- $p_T$  charged particle suppression in PbPb compared to pp collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV,” [Eur. Phys. J. C 72 \(2012\) 1945](#), [arXiv:1202.2554 \[nucl-ex\]](#).  
Internal reference: E. Wenger, A. Yoon, F. Ma, K. Krajczár, „Centrality dependence of charged particle transverse momentum spectra in PbPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV,” CMS [AN 2012/015](#) (2012).
- [32] K. Krajczár [CMS Collaboration], „Charged hadron multiplicity and transverse energy densities in Pb Pb collisions from CMS,” [J. Phys. G 38 \(2011\) 124041](#). Proceedings of Quark Matter 2011 Conference, Annecy.
- [33] K. Krajczár [CMS Collaboration], „Measurement of charged particle  $R_{AA}$  at high  $p_T$  in PbPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with CMS,” [Nucl. Phys. A 910-911 \(2013\) 339–342](#), [arXiv:1208.6218 \[nucl-ex\]](#). Proceedings of the Hard Probes 2012 Conference, Cagliari.
- [34] CMS Collaboration, „Charged particle nuclear modification factor and pseudorapidity asymmetry in pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with CMS,” CMS

- [PAS HIN-12-017](#) (2013) .  
Internal reference: E. Appelt, M. Sharma, S. Greene, Y.-J. Lee, *K. Krajczár*, „Transverse momentum and pseudorapidity dependence of charged particle production and nuclear modification factor in pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with CMS,” [CMS AN 2012/377](#) (2014).
- [35] CMS Collaboration, „Transverse momentum and pseudorapidity dependence of charged particle production and nuclear modification factor in proton-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with CMS,” [Nucl. Phys. A \(2014\) in press](#). Proceedings of the Hard Probes 2013 Conference, Cape Town.
- [36] CMS Collaboration, „Observation of long-range near-side angular correlations in proton-lead collisions at the LHC,” [Phys. Lett. B 718 \(2013\) 795–814](#), [arXiv:1210.5482 \[nucl-ex\]](#).  
Internal reference: Y.-J. Lee, A. Barbieri, I. Cali, D. C. Gulhan, Y. Kim, *K. Krajczár*, Y.-S. Lai, F. Ma, M. Madhav, C. Roland, G. Roland, G. Stephans, A. Strelnikov, D. Velicanu, Y. Yilmaz, V. Zhukova, K. Jung, F. Wang, L. Xu, W. Li, „Studies of two-particle correlations in pPb collisions at 5.02 TeV,” [CMS AN 2012/352](#) (2012).
- [37] P. Bozek, „Collective flow in p-Pb and d-Pd collisions at TeV energies,” [Phys. Rev. C 85 \(2012\) 014911](#), [arXiv:1112.0915 \[hep-ph\]](#).
- [38] K. Dusling and R. Venugopalan, „Evidence for BFKL and saturation dynamics from dihadron spectra at the LHC,” [Phys. Rev. D 87 \(2013\) 051502](#), [arXiv:1210.3890 \[hep-ph\]](#).
- [39] CMS Collaboration, „Detailed Characterization of Jets in Heavy Ion Collisions Using Jet Shapes and Jet Fragmentation Functions,” [CMS PAS HIN-12-013](#) (2012) .  
Internal reference: D. Dutta, D. Gulhan, Y. Kim, Y. Lai, Y.-J. Lee, *K. Krajczár* , P. Kurt, F. Ma, Y. Mao, J. Robles, C. Roland, S. Salur, D. Velicanu, J. Velkovska, G. Roland, G. Stephans, „Detailed characterization of jets in heavy ion collisions using jet shapes and jet-track correlations,” [CMS AN 2012/030](#).
- [40] CMS Collaboration, „Centrality determination for pPb data 2013,” [CMS DP 2013/034](#) (2013) .  
Internal reference: E. Appelt, S. M. Dogra, *F. Siklér*, S. Tuo, Q. Xu, *A. J. Zsigmond*, „Centrality determination for pPb data 2013,” [CMS AN 2013/060](#) (2013).
- [41] CMS Collaboration, „Centrality measurement in pPb collisions,” [CMS DP 2014/009](#) (2014) .  
Internal reference: E. Appelt, S. M. Dogra, *F. Siklér*, S. Tuo, Q. Xu, *A. J. Zsigmond*, „Centrality determination for pPb data 2013,” [CMS AN 2013/060](#) (2013).
- [42] CMS Collaboration, „Observation of sequential Upsilon suppression in PbPb collisions,” [Phys. Rev. Lett. 109 \(2012\) 222301](#), [arXiv:1208.2826 \[nucl-ex\]](#).

- Internal reference: Z. Hu, G. Rangel, V. Kumar, A. J. Zsigmond, A. Abdulsalam, M. Gardner, Y. Zheng, M. Jo, A. Belyaev, H. Kim, A. Florent; N. Leonardo, J. Anderson, M. De Mattia, T. Dahms, C. Mironov, D. Moon, L. Benhabib, R. G. de Cassagnac, M. de la B. Sanchez, I. Shipsey, P. Shukla, „Upsilon production in PbPb collisions,” CMS AN 2011/455 (2012).
- [43] CMS Collaboration, „Z boson production with the 2011 data in PbPb collisions,” CMS PAS HIN-13-004 (2013) .  
Internal reference: L. Benhabib, A. J. Zsigmond, M. Gardner, R. G. de Cassagnac, „Z boson production in PbPb heavy ion collisions with 2011 data,” CMS AN 2012/085 (2014).
- [44] A. J. Zsigmond [CMS Collaboration], „Electroweak bosons in heavy ion collisions in CMS,” Nucl. Phys. A 926 (2014) 34–40. Proceedings of the IS2013 Conference, Illa da Toxa.
- [45] CMS Collaboration, „Study of Z boson production in the muon decay channel in pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV,” CMS PAS HIN-14-003 (2014) .  
Internal refence: A. J. Zsigmond, „Study of Z boson production in the muon decay channel in pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV,” CMS AN 2013/310 (2014).
- [46] A. J. Zsigmond [CMS Collaboration], „Z and W boson production in pPb collisions with CMS,” Nucl. Phys. A (2014) in press. Proceedings of the Quark Matter 2014 Conference, Darmstadt.
- [47] G. I. Veres [CMS Collaboration], „Heavy-ion physics results from CMS,” Nuovo Cim. C035 (2012) 115–122. Proceedings of the 26th Les Rencontres de Physique de La Vallee d’Aoste, La Thuile, 2012.
- [48] G. I. Veres [CMS Collaboration], „Overview of results on jets from the CMS Collaboration,” Nucl. Phys. A 904-905 (2013) 146c–153c. Proceedings of the Quark Matter 2012 Conference, Washington D. C.
- [49] G. Veres [ATLAS and CMS Collaborations], „Heavy ions: jets and correlations,” PoS EPS-HEP2013 (2013) 143. Proceedings of the EPS HEP 2013 Conference, Stockholm.
- [50] G. I. Veres [ATLAS, CMS Collaboration], „Heavy ion results from ATLAS and CMS,” Nucl. Phys. Proc. Suppl. 245 (2013) 45–48. Proceedings of the Hadron Structure’13 Conference, Tatranské Matliare, 2013.
- [51] G. Veres [CMS Collaboration], „Heavy ion physics with the CMS experiment,” CMS CR 2013/123 (2013) . Proceedings of the 2nd FEPS International Conference on Primordial QCD Matter in LHC era, Cairo, 2013.