

# Első mérések a CMS detektorral

NKTH-OTKA H07-B 74296, zárójelentés

Az elért eredményeket két részre osztottam. Mivel az LHC indulása több, mint egy évet csúszott, alkalmam nyílt a CMS kísérlet által inspirált, de általában a kísérleti részecskefizikában alkalmazható új adatkéértékelési módszerek kifejlesztésére, illetve a meglévők továbbgondolására. Az 1. részben ezeket az új módszereket, vizsgálatokat mutatom be. Ezt követi az LHC-n a CMS kísérlet keretében 2009 decemberében elindult hadronfizikai program előkészítéséhez, megalapozásához végzett munka, és az elért eredmények részletes bemutatása (2. rész). A zárójelentés a munka hatásaival, összegzésével folytatódik (3. rész), és a hivatkozások jegyzékével zárul. A szövegbeli referenciák javarészt a projekt keretében készült saját publikációkra mutatnak.

## 1. Kiértékelési módszerek

### 1.1. Töltött részecskék nyomkövetése (kis $p_T$ , kis tévesztés)

A CMS kísérletben a töltött részecskék nyomainak (track) rögzítését szilícium-pixelekkel és -csíkokkal végezzük. A nyomkövető szoftver kis  $p_T$ -n és kis tévesztéssel működő részeit továbbfejlesztettem, jellemzőit szimulált proton-proton és Pb-Pb ütközésekben is vizsgáltam [1, 2]. Végeredményben  $p_T > 150$  MeV/ $c$  esetén mintegy 80-90%-os akceptancia és hatások érhető el, a rekonstruált részecskék  $p_T$  felbontása pedig 2% körül alakul.

### 1.2. Javított kölcsönhatási pont keresés ütközőnyalábos detektorokra

Sok fizikai analízis számára alapvető a kölcsönhatási pont (vertex) pontos ismerete. Nagyobb intenzitás esetén a jelenlegi – az egyes trajektóriák nyalábközelségi pontjait ( $z$ ) felhasználó – vertex-keresők teljesítménye nem megfelelő. Fejlett matematikai módszerek alkalmazásával mind a hatások, mint a talált vertexek tisztasága jelentősen javítható. Az egyes rekonstruált részecskék  $z$  értékük szerint csoportosíthatók: gyors agglomeratív klaszterezés a  $d_{ij}^2 = (z_i - z_j)^2 / (\sigma_i^2 + \sigma_j^2)$  távolságuk alapján. Ez a kezdeti besorolás Gauss-os keverék modellel, valamint az ún. k-means eljárással finomítható. A javasolt eljárások főként nagyszámú átlapoló ütközések esetén jelentenek előrelépést az eddig alkalmazottakkal szemben, de már kis luminozitás mellett is hatásosabbak. A fel nem ismert kölcsönhatási pontok száma a harmadára, a hibás (fake) vertexek száma az ötödére esett vissza, nagyon kevés a megosztott (split) vertexek száma. Az új vertexkereső futási idejét és az egyes pontatlanságokra való érzékenységét (háttér-részecskék, a  $z$  koordináta hibájának felül-, illetve alulbecslése, stb) is részletesen tanulmányoztam.

Az eredményeket ismertető cikket [3] a Nucl Inst Meth A folyóiratba küldtem, a bírálat megérkezett, a javított verzió a szerkesztőnél, a megjelenés hamarosan várható. Az CMS kísérlet első, proton-proton ütközésekről szóló analízisében [4] is ezt a vertex kereső algoritmust használtuk, a publikáció a fenti tanulmányomat a 15. helyen hivatkozta.

### 1.3. Szilícium alapú detektor beütéseinek javított kiértékelése

Az egyes szilícium pixelekben és csíkokon mért töltés segítségével az áthaladó töltött részecske leadott energiája megbecsülhető. A módszer – amely nem csak a klaszterek egydimenziós vetületeit, hanem a teljes kétdimenziós információt használja – egy egyszerű, de pontos energiavesztés-modellen, valamint egy log-likelihood típusú gyors minimalizáláson alapszik. A küszöb alatti, valamint a telítésben levő csatornák is megfelelően feldolgozhatók, ezáltal a dinamikus terjedelem megnő. A modellezés számottevő javítja a részecske-trajektóriák maradékhibáit is (residual).

Az előzetes eredményekről előadás keretében már beszámoltam [5], az azokat ismertető cikk előkészületben.

### 1.4. Töltött részecskék fajlagos energiavesztés-becslésének javítása

Egy töltött részecske detektorban leadott beütéseinek – az egyes energialeadásainak – mérésével a sebességfüggő  $dE/dx$  érték becsülhető. Az ezidáig széles körben alkalmazott, a mért és növekvő sorba rendezett  $\Delta E/\Delta x$  számok levágott átlagolásán alapuló módszer javítható és általánosítható a lineáris becslések körében, amellyel a mérés felbontása akár 15%-kal is javítható. Az eljárás lényege az, hogy az egyes energiavesztéseket sorba rendezzük, majd pontos mikroszkópikus szimuláció segítségével meghatározzuk az optimális súlyokat, amelyek minimalizálják a lineáris kombináció átlagának szórását. Szakdolgozóm (Szeles Sándor, V. fiz, ELTE TTK) ezzel a közös munkánkkal a 2009-es OTDK konferencián második díjat kapott.

A módszert még tovább általánosítottam a súlyozott hatványátlagok (ideértve a mértani közepek) körében. A számítások gáz- és félevezető anyagú detektorok esetében is elvégeztem. Az eredményekről szeminárium keretében már beszámoltam [6], az azokat ismertető cikk előkészületben.

### 1.5. Kis impulzusú töltött részecskék azonosítása a track-illesztés $\chi^2$ értékével

A részecskefizikában széles körben elterjedt a részecskenyomok Kalman-filterre alapuló illesztése. A többszörös Coulomb-szórás és az energiavesztés ismert fizikáját felhasználva, a filter  $\chi^2$  értéke felhasználható a töltött részecske sebességének becslésére. A javasolt eljárás független a részecskék hagyományos, energiavesztésre alapozott azonosításától. A fizikai effektusok, majd a felbontás detektorjellemzőktől való függésének tárgyalása után az új módszert három LHC kísérletre (Atlas, Alice, CMS) alkalmazva megmutattam, hogy jó  $\pi$ -K és  $\pi$ -p szétválasztást kapunk a  $p < 0,9$  illetve  $1,4$  GeV/c tartományban.

Az eredményeket ismertető cikket [7] a Nucl Inst Meth A folyóiratba küldtem, a bíráló megérkezett, a javított verzió a szerkesztőnél, a megjelenés hamarosan várható. A preprint alapján meghívást kaptam a RICH2010 (7th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors) konferencia alternatív részecskeazonosítási módszereket bemutató szekciójába.

## 2. Proton-proton mérések 0,9 és 2,36 TeV-en

A tényleges méréseket 2009 nyarán és őszén két próbakiértékelési kampány előzte meg, ahol szimulált adatokat kellett valós adatként használva minél gyorsabban feldolgozni (CSA08 Challenge [8], "October exercise"). A majdani cikkeket is előre elkészítettük ("paper exercise" [9], valamint lásd még [10, 11]).

Az LHC-nál a CMS detektorral először 2009 decemberében figyelhettünk meg proton-proton ütközéseket. A  $4 < |\eta| < 4.5$  irányokban, mindkét oldalon elhelyezett szcintillátor falakkal az inelasztikus ütközések mintegy 80%-át, az első két órás periódusban 40 ezer 0.9 TeV-es, majd két héttel később 10 ezer 2.36 TeV-es ütközést rögzítettünk. Ezek alkották az analízis által használt "minimum bias" adathalmazt.

A gyors kiértékelés során ellenőriztem a CMS kísérlet szilícium alapú nyomkövető rendszerének akceptanciáját, a trajektória-építés hatásfokát. A tracken levő betüések száma mind a pixel-, mind a csík detektorok esetén szimuláció alapján várt eloszlásnak megfelelően alakult. Ez egyrészt azt mutatta, hogy a nyomkeresés során alkalmazott klaszteralak-szűrő nem dobott el feleslegesen beütéseket, másrészt azt is jelezte, hogy a detektorok hatásfoka közel 100%.

Az előzetes szimulációk segítségével, majd a szintén rendelkezésre álló "zero bias" (véletlen trigger) adatok alapján meghatároztam a triggerelő szcintillátor detektor hatásfokát, a mért eseményenkénti track multiplicitás függvényében. Mivel a forward hadron kaloriméter jobb jel/zaj mutatóval rendelkezett, végül ezen detektorok kétoldali koincidenziáját használtuk offline triggerként. Ez utóbbi segítségével a keletkezett töltött részecskék ( $\eta, p_T$ ) binekben mért hozamát a nem egyszeresen diffraktív (non single diffractive) eseményekre korrigáltam.

A töltött hadronok  $d^2N/d\eta dp_T$  spektrumait 0,1 - 4 GeV/c tartományban, 0.2 széles  $\eta$  binekben határoztam meg. Az eloszlások jól leírhatók a Tsallis eloszlással, ahol a következő faktorizációt feltételeztem:

$$E \frac{d^3N}{dp^3} = \frac{1}{2\pi p_T} \frac{E}{p} \frac{d^2N}{d\eta dp_T} = C(n, T, m) \frac{dN_{ch}}{dy} \left(1 + \frac{E_T}{nT}\right)^{-n}, \quad (1)$$

ahol  $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$ ,  $y = \frac{1}{2} \ln \frac{E+p_z}{E-p_z}$ ,  $E_T = \sqrt{m^2 + p_T^2} - m$ ,  $m$  a töltött pion tömege.

Ezután  $p_T$ -re integrálva a  $dN/d\eta$  értékeket kaptam meg,  $\eta$  függvényében, mindkét vizsgált energián.

Az egyes bizonytalanságokat (esemény kiválasztás, akceptancia, beütés és nyomkövetés hatásfoka, másodlagos hadronok részaránya, többszörös rekonstrukció, tévesztés,  $p_T$  integrálás) számba véve megbecsültem a mért eredmények várható szisztematikus hibáját, amely a hozamokra 4%, az átlagos transzverz impulzusra pedig 2,8%-nak adódott.

## 2.1. Az eredmények [4]

A töltött hadronok átlagos transzverz impulzusa a  $|\eta| < 2,4$  tartományban

- $\langle p_T \rangle = 0.46 \pm 0.01$  (stat.)  $\pm 0.01$  (syst.) GeV/c (0,9 TeV-en)
- $\langle p_T \rangle = 0.50 \pm 0.01$  (stat.)  $\pm 0.01$  (syst.) GeV/c (2,36 TeV-en).

A nyomkövetést alkalmazó módszeremet (full track) még két másik, független eljárással is ellenőriztük (cluster counting, pixel tracklets), és jó egyezést találtunk. A töltött hadronok pszeudorapiditás-sűrűsége a központi régióban ( $|\eta| < 0.5$ )

- $dN_{ch}/d\eta = 3.48 \pm 0.02$  (stat.)  $\pm 0.13$  (syst.) (0,9 TeV-en)
- $dN_{ch}/d\eta = 4.47 \pm 0.04$  (stat.)  $\pm 0.16$  (syst.) (2,36 TeV-en).

A kapott eredmények 0,9 TeV-en összhangban vannak korábbi mérésekkel és megerősítik, hogy a proton-antiproton és a proton-proton ütközésekben közel azonos mennyiségű hadron keletkezik. A 2,36-TeV-en kapott hadronsűrűség a modellek által jósoltnál meredekebb energiafüggésre utal.

Az analízist a kollaboráció 2010. január 13-án fogadta el. Az esemény programja, valamint előadásom a következő linkeken elérhető: címlap, előadás (38-51. oldal).

### 3. Az eredmények hatása

Összefoglalva a CMS kísérlet képessé vált széles impulzustartományban, azonosított részecskékkal végzett fizikára is, így jelentősen hozzá fog járulni az LHC-n folyó hadronfizikai kutatásokhoz.

Az új kiértékelési módszerek segítségével aktívan tudtam a CMS kísérlet fizikai programját alakítani. A részeredményeket először a detektor és analízis csoportok találkozóin ismertettem (<http://indico.cern.ch>), az aktuális időszakban összesen 80 előadást tartottam. A munka elismeréseként a két évig voltam a CMS kísérlet kis- $p_T$ -s QCD alcsoportjának egyik vezetője (2008-2009), majd a 2010-2011 évekre a CMS QCD analízis csoport vezetőjének (convenor) választottak.

A kísérlet első proton-proton ütközésekkel foglalkozó cikke [4] – amely egyben az LHC *első impulzuseloszlással* foglalkozó, valamint az *első rekordenergiás* publikációja is – Magyarországon [12, 13] és külföldön is nagy sajtónyilvánosságot kapott [14].

A munka 2010-ben az azonosított részecskék eloszlásának, valamint eseményenkénti számeloszlásának meghatározásával folytatódik, egy hosszabb publikációval, amely tartalmazni fogja 0,9 TeV-s, 2,36 TeV-es és a márciusban várható 7 TeV-es mérések kiértékelését is.

### Hivatkozások

- [1] F. Sikler, „Soft physics capabilities of CMS in p-p and Pb-Pb,” *J. Phys.* **G35** (2008) 104150, [arXiv:0805.0809](https://arxiv.org/abs/0805.0809) [nucl-ex].
- [2] F. Siklér and K. Krajczár, „CMS: minimum bias studies,” *DESY-PROC-2009-06* (2009) 91–95.  
<http://www-library.desy.de/preparch/desy/proc/proc09-06.pdf#page=96>.
- [3] F. Sikler, „Improved primary vertex finding for collider detectors,” [arXiv:0911.2767](https://arxiv.org/abs/0911.2767) [physics.ins-det].
- [4] 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](https://arxiv.org/abs/1002.0621) [hep-ex].
- [5] F. Siklér, „Pixel és csík szilíciumdetektorok hely- és energiamérésének optimalizálása,” 2009.  
[https://twiki.cern.ch/twiki/pub/Main/FerencSikler/javorkut\\_sikler.pdf](https://twiki.cern.ch/twiki/pub/Main/FerencSikler/javorkut_sikler.pdf).
- [6] F. Siklér, „Új részecskeazonosítási módszerek nyomkövető detektorokkal,” 2009.  
[https://twiki.cern.ch/twiki/pub/Main/FerencSikler/elft\\_Apr15.pdf#page=4](https://twiki.cern.ch/twiki/pub/Main/FerencSikler/elft_Apr15.pdf#page=4).
- [7] F. Sikler, „New method of particle identification with tracker detectors,” [arXiv:0911.2624](https://arxiv.org/abs/0911.2624) [physics.ins-det].
- [8] F. Siklér and K. Krajczár, „The 2008 CMS Computing, Software and Analysis Challenge, section on Hadron Spectra,” *CMS IN-2008/044* (2008) section 5.2.  
[http://twiki.cern.ch/twiki/pub/Main/FerencSikler/IN2008\\_044.pdf#page=51](http://twiki.cern.ch/twiki/pub/Main/FerencSikler/IN2008_044.pdf#page=51).

- [9] F. Siklér [CMS Collaboration], „Transverse momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV,” *CMS PAS QCD-2009/008*.  
<https://twiki.cern.ch/twiki/pub/Main/FerencSikler/QCD-09-008-pas-v2.pdf>.
- [10] F. Sikler, „Towards the measurement of charged hadron spectra in CMS,” *PoS HIGHPTLHC* (2008) 011.  
[http://pos.sissa.it//archive/conferences/076/011/HIGH-pTLHC\\_011.pdf](http://pos.sissa.it//archive/conferences/076/011/HIGH-pTLHC_011.pdf).
- [11] F. Sikler, „First physics with hadrons and the underlying event at CMS,” *PoS 2008LHC* (2009) 037.  
[http://pos.sissa.it//archive/conferences/055/037/2008LHC\\_037.pdf](http://pos.sissa.it//archive/conferences/055/037/2008LHC_037.pdf).
- [12] Stöckert, Gábor, „Magyarok publikálták először az LHC rekordját.” World wide web electronic publication, 2010. [http://index.hu/tudomany/2010/02/03/magyarok\\_publicaltak\\_eloszor\\_az\\_lhc\\_rekordjat/](http://index.hu/tudomany/2010/02/03/magyarok_publicaltak_eloszor_az_lhc_rekordjat/).
- [13] Simon, Tamás, „Világelső magyar eredmény a CERN-ből.” World wide web electronic publication, 2010. <http://www.origo.hu/tudomany/20100203-cern-lhc-magyarok-az-also-publicacio-236-teven-a-cmstol.html>.
- [14] Trafton, Anne, „Record-breaking collisions.” World wide web electronic publication, 2010. <http://web.mit.edu/newsoffice/2010/lhc-results-0205.html>.