

dc_245_11

Új kiértékelési módszerek és alkalmazásuk az erős kölcsönhatás vizsgálatában

MTA doktori értekezés tézisei

Siklér Ferenc

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont,
Részecske- és Magfizikai Intézet, Budapest

2012. szeptember

dc_245_11

1. Bevezető

A részecskefizika olyan kérdésekkel foglalkozik, melyek alapvető fontosságúak a természet és összefüggései megértése szempontjából. Miből áll a világ, melyek az anyag elemi építőkövei, milyenek a közöttük működő kölcsönhatások? A kísérletek az α , β és γ sugarak felfedezésével kezdődtek a múlt század elején, majd az első részecskék azonosítása (proton, elektron, neutron) következett, a kvantummechanika kidolgozásával párhuzamosan. Kezdetben a kozmikus sugárzás és a radioaktív anyagok, később a reaktorok, majd főképp a részecskegyorsítók váltak a kísérletek forrásaivá. Hatásukra egyszeriben megnőtt az ismert elemi részek száma. Rendszerezésükhöz, megértésükhöz az első támpontot a szimmetriák vizsgálata szolgáltatta. A szimmetriákon alapuló mértékelméletek azután sikeresen leírták az elektromágneses, valamint gyenge kölcsönhatásokat, majd egyesítve az elektrogyenge erőt. Hasonló keretbe sikerült foglalni az erős kölcsönhatást (*quantum chromodynamics*, QCD), amely éppen erősen kölcsönható volta miatt megnehezíti elméleti megismerését: matematikai módszereink kevésbé pontos, csak közelítő megoldásokat adnak.

A fenti három kölcsönhatást pillanatnyi ismereteink szerint a Standard Modell írja le a legjobban. Eszerint az anyag alapvető részecskéi a feles spinű kvarkok és leptonok, melyeket egyenként három párba, generációkba rendezhetünk. A neutrínók kivételével töltöttek, részt vesznek az elektrogyenge kölcsönhatásban. A kvarkokat a leptonoktól leginkább az különbözteti meg, hogy a (tört) elektromos töltésen kívül színtöltéssel is rendelkeznek, így erősen is kölcsönhatnak. Mindennapi világunkat főként az első generáció építi fel: az u és d kvark kötött állapotai az atommagban levő protonok és neutronok, körülöttük az atom egyes energiaszintjein pedig az elektronok ülnek. A részecskék között az erőket egész spinű részecskék közvetítik. Ezek az elektromágnesesség fotonja, az elektrogyenge elmélet nehéz $W^\pm$ és Z^0 bozonjai (innen a kis hatótávolság), valamint az erős kölcsönhatás gluonja, amely maga is töltéssel bír. A felvázolt kép a – leptonok tömegével is kapcsolatos – Higgs-részecske megtalálásával lett teljes, bár bizonyossággal csak további mérések után nyilatkozhatunk. A részecskék szintjén leggyengébb kölcsönhatás, a gravitáció, ebbe a sémába egyelőre nem illik bele.

Az elektrogyenge elmélet már jól mutatta napjaink legerősebb irányzatát, amely az anyag alapvető kölcsönhatásainak egyesítésére törekszik. Ennek alapját a csatolási állandók energiafüggése adja, melyek extrapolációja arra utal, hogy egy bizonyos igen magas energiánál ($\approx 10^{16}$ GeV) az első három kölcsönhatás erőssége megegyezik. Ekkora energiasűrűség legutoljára az Ősrobbanáskor jöhetett létre. A Nagy Bumm után 10^{-5} s-mal – amikor az átlaghőmérséklet 10^{13} K volt – a kvarkok és gluonok kötött állapotokat, hadronokat alkottak. Ez a kvarkbezárás pillanata, a hadronizáció. A kötési energiáknak megfelelő energiasűrűségeen aztán létrejöttek az atommagok, atomok, molekulák.

Azt hihetnénk, hogy a nagyenergiás fizika kiértékelési módszerei már régóta, a leg-

apróbb részletekig ismertek. Való igaz, hogy új, minőségileg más eljárások kidolgozása érdekében mélyebb, helyenként sok matematikát igénylő elgondolásokra van szükség. A disszertációban a gáztöltésű és a szilícium-alapú detektorok kiértékelésével, a töltött részecskék nyomkövetésével és azonosításával kapcsolatos új módszereket mutatom be. Az ismertetett eljárások azonnal alkalmazást is nyernek az erős kölcsönhatás tanulmányozásában.

Bár több kísérleti együttműködésnek is tagja – és több, mint 300 cikk társszerzője – vagyok, a disszertációba csak azokat a munkákat foglaltam bele, melyek teljes mértékben saját kutatáson alapulnak, vagy a személyes hozzájárulásom jelentős és pontosan körülhatárolható.

2. A kutatások előzményei

Hadronfizika SPS energián ♦ Sok kísérlet célja a szabad kvarkokból és gluonokból álló plazma (*quark-gluon plasma*) létrehozása és vizsgálata. Mivel a gluon maga is töltött, két kölcsönható kvark távolításával a köztük levő erő egyre nő, lehetetlenné téve a kvarkpár szétvágását, a színes „húr” elszakítását. Ha az energiasűrűség egy bizonyos értéket meghalad, a húron egy kvark-antikvark pár keletkezik, ezért végeredményben csak újabb kvarkpárokat kapunk. Így a kölcsönhatás a kvarkokat bezárja a hadronokba, bár azok a hadronok belsejében a kis méretek miatt gyakorlatilag szabadon mozoghatnak.

Véges hőmérsékletű számítások rácson egy új fázisú QCD anyag, szabad kvarkokból és gluonokból álló „leves” létezését, fázisátmenetet jósoltak, 1-2 GeV/fm³ kritikus energiasűrűséggel. Az újfajta anyag előállítására legjobb lehetőségünk nagy energiájú nehézion ütközésekben van. Az utóbbi évtizedekben jelentős eredményeket értek el a BNL AGS, a CERN SPS és a BNL RHIC gyorsítójánál elvégzett kísérletekkel. Mivel az új anyag létrejöttéről, tulajdonságairól csak közvetett információt szerezhetünk, olyan jeleket kell keresnünk, melyek segítségével egyértelműen választhatunk a kvark-gluon plazmát tartalmazó és más, alternatív (hadronikus) leírások, magyarázatok között. A CERN SPS esetén ezek a lehetséges jelek a közvetlen fotonok hozamának enyhe növekedése; a vektormezonok tömegspektrumának kiszélesedése, elkenődése; nehéz mezonok rendellenes elnyomása; a ritkaság erőteljes növekedése; a folyás (*flow*) megfigyelése voltak.

Az erős kölcsönhatás p-p ütközésekben LHC energián ♦ A világ legnagyobb részecskegyorsítója, a Genf melletti Európai Részecskefizikai Laboratóriumban (CERN) található. A Nagy Hadronütköztető (LHC) 2009 őszén kezdte meg működését: protonokat és atommagokat gyorsít eddig soha nem látott energiákra, majd ütközteti őket. A kapott adatok lehetővé tették a standard modell még hiányzó részecskéjének megtalálását (Higgs), de az anyag újabb szimmetriáinak felfedezése még várat magára.

A p-p ütközések többsége puha (*soft*), vagyis a proton partonikus összetevői általában

nem vesznek részt kemény szórásban. A nagy p_T -s régióval szemben, melyet a perturbatív QCD ír le, a puha ütközésekben a részecskék keltését különféle ütközési folyamatok segítségével modellezzük: rugalmas szórás, rugalmatlan egyszeresen diffraktív (SD), duplán diffraktív disszociáció (DD), továbbá nem diffraktív (ND) szórások.

A proton-proton kölcsönhatás vizsgálata hosszú múltra tekint vissza. A CERN-es ISR-en, majd az $Sp\bar{p}S$ -en az $\sqrt{s} = 200, 546$ és 900 GeV-es méréseket (UA1, UA5) a Fermilabban a Tevatronon végzett megfigyelések követték $630, 900$ és 1800 GeV energián (CDF). A keletkezett részecskék számának (n) eloszlása skálatulajdonságokat mutatott. Az $\langle n \rangle P_n$ mennyiség a skálázott multiplicitás $n/\langle n \rangle$ függvényében univerzálisnak bizonyult, a tömegközépponti energiától függetlenül. A mért eredményeket jól lehetett illeszteni negatív binomiális eloszlásokkal. A megfigyelt viselkedés nagyobb energián sérül, egy újabb komponens jelenik meg, amely arra utalhat, hogy a bejövő protonokat alkotó partonok nem csak egy, hanem több kölcsönhatásban vesznek részt. Egyes modellek az LHC energiára a többszörös ütközések még nagyobb részarányát jósolják.

A keletkezett részecskék transzverzális impulzus spektruma kis p_T -re Boltzmann-típusú eloszlással írható le, a nagy p_T -jú rész pedig hatványviselkedést mutat. Bár az elemi proton-proton ütközéseknél furcsának tűnhet, az előbbi exponenciális függést egyensúlyi termodinamikával szokták magyarázni, az utóbbi lassú lecsengést perturbatív QCD számolásokból értik meg. A spektrum lefutása egységesen leírható Tsallis-típusú eloszlásokkal is, melyek nemextenzív termodinamikára utalhatnak. Érdekes megfigyelés, hogy a keletkezett részecskék átlagos transzverzális impulzusa a multiplicitással nő, amely a mind nagyobb számban keltett minijetekkel hozható kapcsolatba. A keletkezett részecskék longitudinális eloszlása (η) szintén skálázik, a nyalábrészecskék pszeudorapiditásához képest univerzális viselkedést mutat (*limiting fragmentation*).

A mérések fontos adatokat szolgáltatottak a proton-proton kölcsönhatásban keletkezett hadronok számának, átlagos p_T -jüknek, multiplicitás eloszlásuknak energiafüggéséről. Ezek mindegyikére rendelkezünk különféle modelleken alapuló elméleti jóslatokkal, de az eddigi legnagyobb energiájú mérés mintegy egy nagyságrenddel maradt el az LHC csúcsergiája mögött. Így ez a nagy lépés elegendő lehet az egymással versengő modellek közötti döntéshez is.

Az LHC-n kapott adatok önmagukban is érdekesek a proton-proton kölcsönhatás megértése szempontjából, több energián ($0,9, 2,36, 2,76$ és 7 TeV), de fontosak a nehéz, nagy mérési pontosságot igénylő mérések megalapozására is. A dN_{ch}/dp_T és $dN_{ch}/d\eta$ eloszlások, $\sqrt{s}$ függésük mérése alapvető a hadronkeltési mechanizmusok megértése, valamint a puha és kemény szórások egymáshoz képesti szerepének tisztázása érdekében. Ezek a mérések az LHC-n különösen fontosak, hiszen a nagy luminozítás mellett az érdekesebb ritka események mintegy 20–25, közel egyidejű minimum bias ütközésbe vannak beágyazva. A p-p eredmények a Pb-Pb ütközések kiértékeléséhez is hasznosak, hiszen a forró és sűrű maganyag tanulmányozása során egyfajta viszonyítási pontként, referenciaként szolgálnak.

3. Célkitűzések

SPS ♦ Az NA49 kísérlet nyomkövető algoritmusát alapvetően nagy nyomsűrűségű nehézion-ütközések kiértékelésére tervezték. A kapott pályák tisztasága érdekében a nyomkövetés hatásfoka nem volt optimális. Mivel p-p és p-A ütközésekben a részecskesűrűség sokkal kisebb, megvizsgáltam az eljárás minden lépését. Munkám célja az NA49 kísérlet nyomkövető- és kiértékelő-rendszerének javítása, új ötletek alkalmazása, valamint a részecskék energiaveszteségen alapuló azonosításának kidolgozása, hozamuk megmérése volt. A végső eloszlások, ábrák elkészítésével, és azok bemutatásával, fontos részem volt a kísérlet nagy visszhangot kiváltó első eredményeiben. Az NA49 kísérlet első fontos eredményei megnyitották az utat a forró és sűrű maganyag új állapotának részletes tanulmányozása felé, az adatok az erősen kölcsönható anyag kutatásának máig fontos elemei. Az itt, a gáztöltésű detektorokkal megszerzett tudás és tapasztalatok a későbbi – sokkal nagyobb léptékű – vállalkozásaim során alapvető fontosságúnak bizonyultak.

LHC ♦ A szilícium-alapú nyomkövető detektorok manapság minden nagyenergiás kísérletben megtalálhatók, érzékenyek, helyfelbontásuk nagyon jó, kiolvasásuk gyors. A CMS kísérletben a töltött részecskék nyomainak rögzítését szilícium-pixelekkel és -csíkokkal végezzük. A részecskenyomok felismerése általában beütéshármasok (vagy -párok) keresésével indul. A kísérletet főként a standard modell elektrogyenge szektorának megismerésére, valamint a feltételezett szuperszimmetria felfedezésére építették és optimalizálták. A korábban használatos nyomkövető módszer csak a $p_T > 1 \text{ GeV}/c$ tartományban működött, tehát a hadronütközésekben keltett részecskéknek csak töredékét rekonstruálta, hiszen p_T eloszlásuk maximuma jóval $0,5 \text{ GeV}/c$ alatt van.

Ahhoz, hogy egyáltalán elkezdhessünk hadronfizikával foglalkozni, a következő programot, tervet vázoltam fel, melyet maradéktalanul sikerült megvalósítanom:

- kis impulzusú nyomkövetés, az elérhető minimális p_T -ig,
- alacsony tévesztésű nyomkövetés,
- a kölcsönhatási pontok javított keresése,
- az energiaveszteség-ráta becslése lineáris kombinációval,
- részecskeazonosítás a pálya-illesztés jóságának mérőszámával,
- analitikus energiaveszteség modell kidolgozása.

Az eredményeket mind önálló cikkek dokumentálják, melyek alkalmazásait – köztük a CMS kísérlet első publikációit, valamint egy teljesen önálló analízist – is bemutatom a dolgozatban.

4. Új tudományos eredmények

1. Azonosított részecskék keltésének vizsgálata SPS energián

Az algoritmus több ponton is javításra szorult: kis impulzusú pályák újraillesztése, kettétört pályák egyesítése, a nem hozzárendelt pontok pályához csatolása, átfedő klaszterek eltávolítása, a mért és a lehetséges pontok összehasonlításával a hamis pályák számának csökkentése. A javított nyomkövetés az NA61/SHINE kísérletek nyomkövető algoritmusának ma is szerves része, alkalmazásával több cikk született.

A mag-mag és hadron-nukleon ütközésekre kidolgoztam a Bethe-Bloch függvény tapasztalati paraméterei, majd az energiavesztés-spektrumok automatizált illesztését. Meghatároztam az azonosított töltött hadronok hozamát a detektor teljes akceptanciájában, $\sqrt{s_{NN}} = 17 \text{ GeV}$ nukleon-nukleon tömegközépponti energián. Az ólom-ólom ütközésben mért adatok fontos következményekkel jártak a barionok megállása és ritka kvarkot tartalmazó részecskék részarányának növekedése területén. A vizsgált fizikai mennyiségek p-p-től a p-A ütközéseken át a periférikus és központi Pb-Pb ütközésekig lassú, egyenletes változást mutatnak: longitudinális eloszlások, transzverzális spektrumok alakjai, részecskehozamok, ritkaság feldúsulása, antiprotonok hozama. A kirajzolódó kép az AGS energiákon megfigyelthez hasonló. Az elvégzett munka eredményeit összefoglaló előadásom, valamint az utána megjelent cikk [1] a 2000-es CERN-i bejelentés (*New State of Matter*, az anyag új állapota) egyik fontos referenciája, a három említett NA49 eredmény egyike.

A különféle ütközési rendszerek összehasonlítása érdekes eltéréseket mutat mind a résztvevő nukleonok számán, mind az átlagos ütközési számon alapuló skálázási feltevésektől. A kapott részecskearányok a kölcsönhatási régió vastagságán alapuló új, érdekes skálázását elsőként javasoltam és mutattam be [2, 3]. A kis magok ütközéseivel elvégzett mérések segítenek betölteni az elemi p-p és a Pb-Pb ütközések közötti űrt. Már a félig központi C-C ütközések is a ritkaság növekedését mutatják.

2. Kis impulzusú és alacsony tévesztésű nyomkövetés a CMS kísérletben

Kidolgoztam egy ötletes, geometriai alapokon nyugvó módszert, amely a beütés-hármasok keresését kis tartományra szűkíti le, így a detektor akceptanciája az elméletileg lehetséges minimális p_T közelébe ($0,075 \text{ GeV}/c$) csökkenthető: 0,1, 0,2 és $0,3 \text{ GeV}/c$ -ig terjed pionokra, kaonokra és protonokra. Átlagosan 80–90%-os akceptanciát és hatásfokot érhetünk el.

Kis impulzusnál a megnövekedett többszörös Coulomb-szórás megnehezíti az egyes szilícium-rétegek beütéseinek részecskepályákba rendezését, sok lesz a hamis nyom. Ebben segít az a felismerés, hogy a rétegekben kialakult beütés-klaszter alakja, mérete híven tükrözi a részecske áthaladásának irányát. Ezzel a módszerrel a tévesztés aránya egy nagyságrenddel csökkenthető és 1% alá vihető. Az egyedülálló,

alacsony- és magas átlapolású p-p ütközések esetén a részarány kisebb, mint 2%, rendre 0,13, 0,20 és 0,35 GeV/ c alatt. A hibásan rekonstruált pályák részaránya még Pb-Pb kölcsönhatásban, $p_T > 400$ MeV/ c esetén is az 5%-os szint alatt tartható. Az ismertett eljárások széles körben alkalmazhatók, a 0,1 GeV/ c -ig terjedő hatásosság lehetővé teszi a részecske-eloszlások és -hozamok mérését (inkluzív fizika).

Az új módszereket először egy belső analízis-jegyzetben ismertettem [4], majd több későbbi cikkben is bemutattam [5, 6, 7, 8, 9, 10]. A CMS kísérlet első, proton-proton ütközésekről szóló analízisében ezt az algoritmust használtam, a módszert eddig összesen négy CMS analízis alkalmazta, (köztük [11, 12, 13]). A beütések alakjának szűrése a kísérlet standard nyomkövető algoritmusába is beépült. A CMS kísérlet képessé vált széles impulzustartományban, töltött részecskékkel végzett fizikára is, így jelentősen hozzá tudott járulni az LHC-n folyó hadronfizikai kutatásokhoz.

3. 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 megmutattam [14], hogy mind a hatások, mint 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 ütközések esetén jelentenek előrelépést az eddig alkalmazottakkal szemben, de már kis luminozítás mellett is hatásosabbak. A fel nem ismert kölcsönhatási pontok száma a harmadára, a hamis vertexek száma az ötödére esett vissza, nagyon kevés a megosztott vertexek száma. Az új vertex-kereső 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 eddig összesen öt CMS analízis alkalmazta és hivatkozta (köztük [11, 12, 13]). Az eljárások az AIDA projekt keretében egy kísérlet-független programcsomagban széles körben elérhetők és felhasználhatók.

4. Töltött részecskék keltésének vizsgálata LHC energián

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 [11, 15] egyben az LHC *első impulzuseloszlással* foglalkozó, valamint az *első rekordenergiás* publikációja is, melyet néhány hónappal később a 7 TeV-es publikáció [12, 16] követett. A tényleges méréseket részletes felkészülési időszakok, próbakiértékelési kampányok előzték meg [8, 9, 17, 18, 19, 20]. A munkában

a vertexek keresésével, valamint – a töltött részecskék nyomkövetésén keresztül – a p_T spektrumok mérésével, majd integrálásuk után az η eloszlások meghatározásával vettem részt. Nem egyszerűen diffraktív kölcsönhatások esetén a töltött hadronok átlagos transzverzális impulzusa $0,46 \pm 0,01$ (stat.) $\pm 0,01$ (syst.) GeV/c 0,9 TeV-en, $0,50 \pm 0,01$ (stat.) $\pm 0,01$ (syst.) GeV/c 2,36 TeV-en, valamint $0,545 \pm 0,005$ (stat.) $\pm 0,015$ (syst.) GeV/c 7 TeV-en. A $dN_{ch}/d\eta$ 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 p- $\bar{p}$ és p-p mérésekkel és megerősítik, hogy a proton-antiproton és a proton-proton ütközésekben közel azonos mennyiségű hadron keletkezik. A 2,36 TeV-en és 7 TeV-en kapott hadronsűrűség a modellek által jósoltnál meredekebb energiafüggésre utal. A DIS 2010 konferencián a kísérlet plenáris előadását tartottam [21], az új eredményekről így az elsők között számolhattam be, melyek Magyarországon és külföldön is nagy sajtónyilvánosságot kaptak. A mérésekkel a p-p ütközésekben keltett részecskék tulajdonságainak tanulmányozását egy új energiatartományba terjesztettem 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.

5. 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 általánosítottam [22]. Az optimalizált súlyok meglehetősen függetlenek a részecske impulzusától és az anyagvastagságtól, így a becslésben jól használhatók. A kapott felbontás akár 15%-kal is javulhat, ezért a súlyozott számtani és mértani közepek jobb részecske-szétválasztást tesznek lehetővé, mind a szilícium-alapú, mind a gáz-töltésű 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.

6. Részecskeazonosítás a pálya-illesztés jóságának mérőszámával

A részecskefizikában széles körben elterjedt a részecskepályák Kalman-filterre alapuló illesztése. A többszörös Coulomb-szórás és az energiaveszteség ismert fizikája segítségével megmutattam, hogy a szűrő χ^2 értéke felhasználható a töltött részecskék sebességének becslésére [23], így a nyomkövető detektorokat is használhatjuk

töltött részecskék azonosítására. Mivel a szűrő χ értéke ekvivalens a globális illesztés χ értékével, az ismertetett módszer alkalmazható bármely más χ^2 minimalizáló pálya-illesztésre is, feltéve, hogy az megfelelően modellezi az energiaveszteséggel és szóródással kapcsolatos effektusokat. Az ismertetett megközelítés a detektor anyagának 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 megmutattam, hogy jó π -K és a π -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 munkát a RICH2010 konferencia alternatív részecskeazonosítási módszerekkel foglalkozó szekciójában mutattam be [24]. A CMS kísérlet azonosított töltött hadronok eloszlásairól szóló analízisében az itt ismertetett eredmények fontos szerepet kaptak: felhasználásuk jelentősen javította az energiaveszteségen alapuló részecskeazonosítást tisztaságát [13].

7. Egy analitikus energiaveszteség-modell kidolgozása, alkalmazásai

A töltött részecskék energiaveszteségét szilíciumban egy egyszerű analitikus parametrizációval közelítettem, melynek használatát több példán keresztül mutattam be [25]. 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 tudtam megbecsülni. A küszöb alatti, valamint telítést okozó jeleket is megfelelően kezeltük. A parametrizációt sikeresen alkalmaztam a részecskepályák energiaveszteség-rátájának meghatározására, valamint a detektorok erősítéseinek kalibrációjára, ismét a korábbi eljárásoknál jobb eredményekkel.

A CMS kísérlet egyetlen, azonosított töltött hadronokkal foglalkozó publikációjában az itt ismertetett módszereket alkalmaztam [13, 26]. Bemutattam, 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. Az eljárások az AIDA projekt keretében egy kísérlet-független programcsomagban széles körben elérhetők és felhasználhatók.

8. Azonosított részecskék keltésének vizsgálata LHC energián

Ebben a nagyszabású, teljesen önálló munkámban [13, 26] a p-p ütközésekben keltett azonosított töltött hadronok spektrumainak mérését mutattam be $\sqrt{s} = 0,9$,

2,76 és 7 TeV-es energiákon, a $p_T \approx 0,1\text{--}1,7 \text{ GeV}/c$ transzverzális impulzus tartományban, $|y| < 1$ rapiditásnál. Az eseményeket egy kétoldali triggerrel válogattam 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 χ^2 értéke alapján tudtam azonosítani. A teljesen korrigált elsődleges részecskék p_T spektrumát és integrált hozamukat a PYTHIA6 és PYTHIA8 eseménygenerátorok többféle tune-jával hasonlítottam 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. Az adatok lehetővé tesznek olyan differenciális vizsgálatokat is, mint a multiplicitás- és energiafüggés tanulmányozása, melyek segítségével a hadronkeltéssel foglalkozó modellek paraméterei tovább szűkíthetők, ezzel közelebb jutva az alapvető QCD folyamatok jobb megértéséhez.

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 energia határozza meg. Az eredményeket elsőként ismertettem a DIS 2012 konferencián [27].

5. Az eredmények értelmezései és hatása

SPS ♦ Összefoglalva úgy tűnik, hogy $\sqrt{s_{NN}} = 17 \text{ GeV}$ -es mag-mag ütközésekben a ritkaság feldúsulása nem köthető egyértelműen egy új, szabad színtöltésekkel rendelkező anyag kialakulásához. Az effektus részben már a nagy részecskeszámú elemibb, valamint kis atommagok ütközéseiben is megfigyelhető. A keltett kvarkok és gluonok rekombinációja, valamint a ritkaság megmaradása egyaránt egyszerű, hagyományos, más feltételezéseket nem feltétlenül igénylő magyarázatokkal szolgál.

LHC ♦ TeV-es energiákon ($\sqrt{s} = 0,9, 2,36, 2,76$ és 7 TeV) a p-p ütközésben keltett részecskék transzverzális impulzusspektrumának illesztésére a – Tsallis-entrópia maximalizálásából kapott – q-exponenciális egy változatát használtam. Ezen függvények sikere talán abban rejlik, hogy alkalmasak fraktálszerkezetű, valamint kaotikus jellegű dinamikai rendszerek leírására. Esetünkben, az egy proton-proton ütközés során keltett részecskék a rendelkezésre eső fázisteret véletlenszerűen, nagyon rövid idő alatt töltik be, így nincs lehetőségük a kanonikus rendszerekre jellemző viselkedés kialakítására.

Az eredmények nagyban hozzájárultak az erős kölcsönhatás leírására vállalkozó Mon-

te Carlo modellek javításához, paramétereik igazításához. A leggyakrabban alkalmazott PYTHIA generátor esetében következő változtatások voltak szükségesek: a részecskeszám energiával való gyorsabb skálázása; barionok, főként ritka barionok megnövekedett keltése (az új paraméterek még éppen kompatibilisek a LEP által megengedett tartománnyal); megnövelt barion-transzport a központi régióba; a ritkaság elnyomásának csökkentése („popcorn” mezonok esetén); kisebb szín-összekapcsolás (*color reconnection*) az átlagos p_T részecskeszám-függésének leírására.

A gluon szaturáció ötletét felhasználva könnyen megérthető a mért részecskespektrumok geometriai skálázása, mely szerint az invariáns $d^2N/dy dp_T^2$ mennyiség csak $\tau = p_T/Q_{\text{sat}}$ függvénye, ahol a telítési (szaturációs) impulzus $Q_{\text{sat}} = Q_0(p_T/\sqrt{s})^{-\lambda/2}$. A feltevést azonosítatlan töltött hadronokra vonatkozó adataink igazolják. Azonosított hadronok esetén a $p_T \rightarrow m_T$ helyettesítéssel megmutattam, hogy a skálázó mennyiség a $\tau = m_T^{2+\lambda}/(Q_0^2\sqrt{s}^\lambda)$ lesz. Az adatokat felhasználva azt kaptam, hogy $\lambda = 0.12$ választás mellett a τ változóban a pionok, kaonok és protonok spektruma, eloszlásuk alakja nagyon hasonló, a tömegközépponti energiától függetlenül, így egy – az összes mérési eredményünket leíró – univerzális görbét kapunk.

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, gluon szaturáció). A kísérletező számára talán ezek a dolgozat legfontosabb következtetései. Meglátásom szerint valóban megértettük a nehezen leírható erős kölcsönhatás bizonyos részleteit.

A megkezdett munka még korántsem zárult le, hiszen a – disszertációban is érintett – hadron-mag ütközések kísérleti vizsgálata LHC energiákon csak 2013-ban indul: ott is egyre több kérdés vár megválaszolásra. A jövőbeni adatok kiértékelésében az itt leírt módszerek ismét fontos szerepet fognak játszani.

6. Tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [1] F. Siklér *et al.*, „Hadron production in nuclear collisions from the NA49 experiment at 158 GeV/c/A,” Nucl. Phys. A 661 (1999) 45–54.
- [2] F. Siklér [NA49 Collaboration], „Baryon stopping: A link between elementary p+p interactions and controlled-centrality p+A and A+A collisions,”. Proceedings of the 30th International Conference on High-Energy Physics (ICHEP 2000), 27 Jul - 2 Aug 2000: Osaka, Japan.
- [3] F. Siklér [NA49 Collaboration], „Recent NA49 results on Pb+Pb collisions at CERN SPS,” arXiv:hep-ex/0102004 [hep-ex]. Proceedings of the 30th International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD 2000), 9-15 Oct 2000: Tihany, Hungary.

- [4] F. Siklér, „Reconstruction of low p_T charged particles with the pixel detector,” CMS AN 2006/100 .
- [5] F. Siklér, „Low p_T hadronic physics with CMS,” Int. J. Mod. Phys. E 16 (2007) 1819–1825, [arXiv:physics/0702193](#).
- [6] CMS Collaboration, „CMS physics technical design report: Addendum on high density QCD with heavy ions,” J. Phys. G 34 (2007) 2307–2455.
- [7] F. Siklér, „High Density QCD Physics with Heavy Ions in CMS,” [arXiv:0705.3538 \[nucl-ex\]](#). Proceedings of the 42nd Rencontres de Moriond on QCD and Hadronic Interactions, 17-24 Mar 2007: La Thuile, Italy.
- [8] F. Siklér and K. Krajczár, „Measurement of charged hadron spectra in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 14$ TeV,” CMS AN 2007/021, CMS PAS QCD-07-001 .
- [9] F. Siklér, „Towards the measurement of charged hadron spectra in CMS,” PoS HIGHPTLHC (2008) 011.
- [10] F. Siklér, „Soft physics capabilities of CMS in p-p and Pb-Pb,” J. Phys. G 35 (2008) 104150, [arXiv:0805.0809 \[nucl-ex\]](#).
- [11] 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 \[hep-ex\]](#).
- [12] 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 \[hep-ex\]](#).
- [13] 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 \[hep-ex\]](#).
- [14] 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 \[physics.ins-det\]](#).
- [15] 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, and 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 (2009) .

- [16] 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, and A. Yoon, „Transverse momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV,” CMS AN 2010/069 (2010) .
- [17] F. Siklér, „Soft probes of high density QCD physics with CMS,” J. Phys. G 35 (2008) 044045, [arXiv:0710.1874 \[nucl-ex\]](#).
- [18] F. Siklér, „First physics with hadrons and the underlying event at CMS,” PoS 2008LHC (2009) 037.
- [19] F. Siklér and K. Krajczár, „CMS: minimum bias studies,” DESY-PROC-2009-06 (2009) 91–95.
- [20] F. Siklér [CMS Collaboration], „Transverse momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV,” CMS PAPER QCD-09-008 .
- [21] F. Siklér [CMS Collaboration], „Highlights from CMS,” PoS DIS2010 (2010) 006.
- [22] 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 \[physics.data-an\]](#).
- [23] F. Siklér, „Particle identification with a track fit χ^2 ,” Nucl. Instrum. Meth. A 620 (2010) 477–483, [arXiv:0911.2624 \[physics.ins-det\]](#).
- [24] F. Siklér, „Particle identification with a track fit χ^2 ,” Nucl. Instrum. Meth. A 639 (2011) 256–259.
- [25] 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 \[physics.data-an\]](#).
- [26] 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) .
- [27] F. Siklér, „Spectra of Charged Pions, Kaons, and Protons Identified via Tracker Energy Loss from CMS,”. <https://cdsweb.cern.ch/record/1457412>. CMS CR-2012/059.

dc_245_11

dc_245_11