



Fragmentáció vizsgálata nehéz- és könnyű kvarkok mérésein keresztül az ALICE kísérletben

Varga Zoltán

Ph.D. Tézisfüzet

Témavezető: Dr. Vértesi Róbert

Részecske- és Magfizikai Intézet

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont

Konzulens: Dr. Szunyogh László

Elméleti Fizika Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Fizikai Tudományok Doktori Iskola

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest

2024

Bevezetés

Mikromásodpercekkel az ősrobbanás után az univerzumot rendkívül forró és sűrű, közel fénysebességgel mozgó részecskék keveréke töltötte ki. Ez az anyag főképp kvarkokból és gluonokból állt, amelyek között az erős kölcsönhatás hat. Hagyományos körülmények között a kvarkok hadronokba vannak zárva. Szélsőséges hőmérsékletek és sűrűségek esetén azonban a kvarkok és a gluonok kiszabadulhatnak a hadronokból, létrehozva az úgynevezett kvark-gluon plazmát (QGP).

Hogy létrehozzuk az anyag azon extrém állapotát, amely a korai univerzumban létezett, részecskegyorsítókat használunk protonok, ill. nehézionok, például arany vagy ólom atommagok ütköztetésére. A nehézion-ütközések során két ilyen atommagban több száz proton és neutron ütközik össze, és egy parányi tűzgömböt hoznak létre, amelyben minden beleolvad a kvark-gluon plazmába. A tűzgömb ezután hűlni kezd, és az egyes kvarkok és gluonok (összefoglaló néven partonok) újraegyesülnek közönséges anyaggá, amely azután minden irányba szétrepül, amíg a részecskék el nem érik a detektorainkat. Az ütközés végállapota sokféle részecskét tartalmaz, mint például pionok és kaonok, amelyek kvark-antikvark párból álló mezonok; vagy protonok és neutronok, amelyek három kvarkot tartalmazó barionok. Még antiprotonok és antineutronok is keletkezhetnek, amelyek akár hélium atom nehézségű antiatomokba is egyesülhetnek.

Bár a nehézion-ütközések femtoszkopikus skálán zajlanak le, a nagyenergiás fizikában gyakran nagy rendszereknek nevezik őket, részben mert az ütközés során létrejött rendszer térfogata elég nagy ahhoz, hogy kvark-gluon plazma alakuljon ki. Ezzel szemben a protonok (vagy antiprotonok) ütközési rendszereit kis rendszereknek nevezzük. A proton-proton ütközésekben a nehézion-ütközésekkel ellentétben nincs jelen a maganyag hatása, ezért ezek referenciaként szolgálnak a nehézion-ütközésekhez, míg a protonok nehézionokkal való ütközése a hideg nukleáris anyag hatásainak tanulmányozására szolgálhat. Az utóbbi időben azonban a kis rendszerek olyan ütközései, ahol a végállapotú részecskék száma magas, intenzív vizsgálatok tárgyát képezik. A Nagy Hadronütköztető (LHC) elindulásával olyan jelenségeket figyeltek meg, amelyek a kvark-gluon plazma jelenlétére utalhatnak, annak ellenére, hogy nem várható a kvark-gluon plazma jelentős térfogatban való kialakulása a kis ütközési rendszerekben. Ezen megfigyelések közé tartoznak a kollektív jelenségek, mint például a kis azimutszög-különbségnél megjelenő hosszú távú korrelációk és a végállapotú részecskék azimutális eloszlásának aszimmetriája, más néven elliptikus folyás. Egy lehetséges magyarázat az, hogy a kvark-gluon plazma kis térfogatban létrejöhet a kis rendszerek ütközéseinek egy részében. Azonban vannak alternatív magyarázatok is ezekre a megfigyelt jelenségekre, amelyek nem feltételezik a kvark-gluon plazmát. A proton-proton ütközésekben megfigyelt radiális folyás megérthető például a sokparton-kölcsönhatások segítségével.

Célkitűzések

Ezen dolgozat célja a nehéz- és könnyűkvark-jetek fragmentációs és hadronizációs tulajdonságainak vizsgálata nagyenergiájú proton-proton ütközésekben, annak érdekében, hogy a kis rendszerekben kollektív viselkedéshez vezető részecskeképződési mechanizmusokat megvilágítsuk.

Az egyik fő kutatási terület ezen cél eléréséhez a jetek vizsgálata. A jetek szerkezetének (impulzusprofiljának) jellemzése segítségével kerestem nem triviális kvantumszindinamikai hatások okozta módosulásokat. Továbbá megvizsgáltam a multiplicitás (azaz a töltött végállapotú részecskék számának) eloszlását a jetek transzverzális impulzusának függvényében. A legújabb eredmények alapján a multiplicitáseloszlások a Koba-Nielsen-Olesen (KNO) skálázáshoz hasonló viselkedést mutatnak, ami a jetek fragmentációjára vonatkozó fontos tanulságokkal szolgál. Tanulmányaimban a KNO-szerű skálázást kerestem a nehéz kvark jetek szimulációjával, valamint az ALICE kísérletben elsőként végeztem el a jetek részecskeszám eloszlásának impulzusfüggő mérését is.

A dolgozatom másik fő témája, szintén a jetek fragmentációjához kapcsolódóan, a nehéz kvark hadronok proton-proton ütközésekben történő hadroprodukciónak megértése az LHC ütközési energiáin. A hadronok hatáskeresztmetszetét a faktorizációs tétel segítségével lehet kiszámítani, amely feltételezi, hogy a fragmentációs függvények univerzálisak különböző ütközési rendszerekre. Az olyan kísérleti eredmények, mint a charm barionok hozamának nem várt növekménye proton-proton ütközésekben, megkérdőjelezzik ezt a feltételezést. Egy olyan modellt használtam, amely színhúrok újrarendezését tartalmazza a vezető rendű közelítésen túl (angol rövidítése CR-BLC), hogy magyarázatot találjak a charm tartalmú barionok növekményére, és új megfigyelhető mennyiségeket javasoltam a jövőbeli kísérleti mérésekhez. Az ütközéseket különböző esemény-aktivitást leíró mennyiségekkel jellemeztem, amelyek lehetővé teszik a vezető QCD folyamatok és a háttéresemény közötti kapcsolat vizsgálatát. Kutatásomat elsősorban a proton-proton ütközések kemény és lágy tartományai határterületének megértése motiválja, ami még nem teljesen feltérképezett terület.

Módszerek

A jetek szerkezetének analízise, a nehéz kvark jetek KNO-jellegű skálázásának mérése, valamint a charm-barion megnövekedett produkciójának elemzése mind az általam PYTHIA 8 Monte Carlo eseménygenerátorral létrehozott adatokon alapul. A PYTHIA 8 eseménygenerátort széles körben alkalmazzák a részecskefizikában, mivel pontosan írja le a nagyenergiás proton-proton ütközéseket. Képes mind kemény, mind lágy kölcsönhatások, kezdeti és végállapotú partonzáporok, jetfragmentáció és sokparton-kölcsönhatások (MPI) generálására. Az MPI keretrendszere az úgynevezett színújrarendezési mechanizmusokra támaszkodik, amelyek átrendezik a kvarkok és gluonok közötti színhúrokat a hadronizáció során. Végezetül fontos megemlíteni, hogy a PYTHIA 8 képes megfelelően modellezni a részecskeszám eloszlásokat is.

Az ALICE detektor egy a nehézion-ütközések tanulmányozására épült, számos aldetektort tartalmazó összetett rendszer. A dolgozat szempontjából releváns főbb alrendszerek a következők. Az ALICE fő nyomkövető eszköze az időprojekciós kamra (TPC), egy gázzal töltött detektor, amely fajlagos energiavesztés alapján azonosítja a részecskéket és meghatározza azok impulzusát. A belső nyomkövető rendszer (ITS) szilícium detektorokból áll. Az ITS részt vesz a részecskék nyomkövetésében,

valamint kulcsszerepet játszik a nehéz kvarkot tartalmazó hadronok azonosításában is a másodlagos bomlási vertex helyének meghatározása segítségével. A részecskék repülési idejét mérő (TOF) detektor időzítési információkat nyújt. Az elektromágneses kaloriméter (EMCal) méri az elektromágneses részecskék (elektronok és fotonok) energiáját. A triggerjelet a V0A és V0C szcintillátorok biztosítják, amelyek az előre- illetve hátraszórás tartományban vannak elhelyezve.

Az ALICE együttműködés megmérte a nehéz kvarkokat tartalmazó hadronok bomlásából keletkező elektronok töltött hadronokkal való szögkorrelációit pp és p–A ütközésekben. A FONLL perturbatív kvantumszíndinamikai modellt felhasználva meghatároztam a charm és beauty kvarkokból jövő elektronok hozamát és becslést adtam a korrelációs csúcsokhoz való járulékokra. Kiterjedt szimulációkat végeztem a PYTHIA 8 használatával, hogy összehasonlítsam az azimutális korrelációs eloszlások azonos és átellenes oldali korrelációs csúcsait pp és p–Pb ütközésekben a modellem előrejelzéseivel. A korrelációs struktúrákat egy konstans és két von Mises függvény összegével illesztettem. Ebből meghatároztam a háttér és az azonos illetve átellenes oldali csúcsokat. Mivel a PYTHIA 8 önmagában nem képes a nehéz atommagok ütközéseinek szimulálására, a PYTHIA 8-ban implementált Angantyr modellt használtam, amely több nukleon-nukleon ütközést kombinálva képes szimulálni proton-atommag (p–A), illetve atommag-atommag (A–A) ütközéseket.

Az ALICE 2016-2018 között gyűjtött adatait elemezve megmértem a jetek részecskeszám eloszlásait azok transzverzális impulzusának függvényében, és vizsgáltam a jetek KNO-jellegű skálázását. Ezen mennyiségek kiszámítását az ALICE keretrendszer segítségével végeztem el, saját analíziskódom hozzáadásával. A kinyert részecskeszám-eloszlásokat detektorhatásokra korrigáltam a RooUnfold csomaggal végzett Bayes-féle dekonvolúciós eljárással.

Új tudományos eredmények

A dolgozatban a könnyű és nehéz kvarkok fragmentációjának vizsgálatára irányuló kutatásaimat mutatom be. Vizsgáltam a jetek szerkezetét, a részecskeszám-eloszlások jet-impulzussal való skálázását, ezen kívül a nehéz kvarkok bomlásaiból származó elektronoknak hadronokkal való azimutális korrelációit, valamint a charm barionok hozamnövekedését az ütközések eseményaktivitásának függvényében. Az alábbi tézispontokban összefoglalom az egyes témákhoz kapcsolódó hozzájárulásaimat.

1. Jetek alakjának és fragmentációjának részecskeszám függése

Elemeztem a jetek differenciális és integrális szerkezetét, valamint azok részecskeszám-eloszlástól való függését PYTHIA eseménygenerátorral szimulált proton-proton ütközésekben. A multiplicitástól való függés méréseiben előforduló torzítások minimalizálása érdekében két arány hányadosából álló mennyiséget vezettem be és kimutattam, hogy a jetek alakja jelentősen függ a multiplicitástól, és ez felhasználható modellek validálására a bevezetett mennyiségek kísérleti adatokban való megméréseivel.

A jetszerkezet multiplicitásfüggésének vizsgálatával bevezettem egy karakterisztikus jetméret-jellemzőt, ami különböző partonsűrűség-függvények, jetrekonstrukciós algoritmusok és multiplicitás osztályok választása esetén sem módosult jelentősen. A jetméret-jellemzőnek a jetek impulzusától való függése egy Lorentz-boost görbét követ, ami arra utalhat, hogy ez a jetnek egy belső tulajdonsága, és jellemző a partonzápor téridő-evolúciójára egy adott impulzusnál [1, 2, 3].

2. Jetszerkezetek skálázási tulajdonságai elméletben és az ALICE kísérletben

A Koba-Nielsen-Olesen (KNO) skálázási hipotézis az eseménymultiplicitásokhoz kapcsolódó fontos kísérleti megfigyelés, amely kimondja, hogy az eseménymultiplicitás eloszlások mind egyetlen univerzális skálázási görbére redukálhatók. A legújabb fenomenológiai tanulmányok arra utalnak, hogy hasonló skálázás érvényesülhet jeteken belül is, ha a jetmultiplicitást a jet transzverzális impulzusának függvényében vizsgáljuk. Monte Carlo eseménygenerátorokkal megvizsgáltam a KNO-jellegű skálázást pp ütközésekben, $\sqrt{s} = 13$ TeV energián szimulált nehézkvark-jetekben. Megállapítottam, hogy a KNO-jellegű skálázás teljesül és partonszintű kölcsönhatásokból ered. Az eredmények által motiválva az ALICE kísérletben $\sqrt{s} = 13$ TeV energián elsőként mértem meg a jetek multiplicitás-eloszlását a transzverzális impulzusuk függvényében pp ütközésekben, ami lehetővé tette a KNO-szerű skálázás tulajdonságainak kvantitatív meghatározását is. Ezen mérés segítheti a jetek fragmentációs tulajdonságaink további megértését [4, 5].

3. Nehézkvark-hadronok bomlásából származó elektronok azimutális korrelációja az ALICE kísérletben

A nagyenergiájú hadron ütközésekben a nehéz kvarkok (charm és beauty) főként partonok kemény ütközéses folyamatai során keletkeznek. A nehéz kvarkokat tartalmazó hadronok bomlásából keletkező részecskék kétrészecske-szöghatárolási mérései lehetővé teszik a partonzápor és fragmentáció jellemzését. Az ALICE együttműködés megmérte a nehéz kvarkot tartalmazó hadronokból eredő elektronok töltött hadronokkal való azimutális korrelációs eloszlásait pp és p-Pb ütközésekben $\sqrt{s} = 5.02$ TeV energián. A fő hozzájárulásom az analízishez részletes szimulációk elkészítése volt, amelyek összehasonlítási alapot adtak a pp és p-Pb ütközésekben mért azonos és átellenes oldali korrelációs csúcsok értelmezéséhez. Ez lehetővé tette a charm- és beauty-kvarkok keletkezési, fragmentációs és hadronizációs folyamatai modelljének ellenőrzését, amelyek hatással vannak az elemzésben vizsgált megfigyelhető mennyiségekre. Továbbá meghatároztam a charm és beauty kvarkokból jövő elektronok hozamát a FONLL perturbatív kvantumszíndinamikai modellt felhasználva és becslést adtam a korrelációs csúcsokhoz való járulékokra. A korrelációs struktúrákat egy konstans és két von Mises függvény összegével illesztettem. Ebből meghatároztam a háttér és az azonos illetve átellenes oldali csúcsokat. Megállapítottuk, hogy a korrelációs függvények azonos és átellenes oldali korrelációs csúcsainak alakulása hasonló pp és p-Pb ütközésekben az összes vizsgált kinematikai tartományban. Ez arra utal, hogy a nehéz kvarkok fragmentációjának és hadronizációjának hideg nukleáris hatások miatti módosulása nem állapítható meg az aktuális mérések pontosságán belül [6].

4. Charm barionok növekménye és a háttéreseemény szerepe

A perturbatív kvantumszíndinamikai (pQCD) számítások sikeresen alkalmazhatóak a nehéz kvarkokat tartalmazó mezonok keletkezésének leírásában az LHC különböző ütközési energiáin. A megszokott leírás a faktorizációs megközelítésen alapul, amelyben a nehéz kvark-hadronok keletkezési hatáskeresztmetszete a hadronütközések partonsűrűség-függvényeinek (PDF), a kemény ütközési folyamat keresztmetszetének, valamint a nehéz kvarkok fragmentációs függvényeinek konvolúciójaként számolható ki. Azonban a CERN LHC legújabb kísérleti eredményei a charm barionok hozamának váratlan növekményét mutatják az elektron-pozitron ütköztetéseken alapuló, faktorizációs megközelítéssel számolt jóslatokhoz képest. A PYTHIA 8 Monte Carlo eseménygenerátorban implementáltam a CR-BLC modellt, amely a színhúrok újrarendezését tartalmazza vezető renden túl, és kísérleti módszereket javasoltam a charm barion növekmény forrásának vizsgálatára az eseményaktivitási jellemzők használatán keresztül. Arra a következtetésre jutottam, hogy a vizsgált modellosztályban a Λ_c^+ növekmény a háttéreseménnyel kapcsolatos, és nem függ jelentősen a jetekben végbemenő folyamatoktól [7, 8].

5. Gerjesztett charm állapotok és strange kvarkot tartalmazó charm barionállapotok növekménye

A Λ_c^+ barionhozamok növekményének vizsgálatára vonatkozó tanulmányokat kiterjesztettem több különböző gerjesztett charm barionra, és vizsgáltam a különböző izospin- és strange kvarkot tartalmazó charm barionok keletkezését, majd összehasonlítottam mind a charm D^0 mezonokkal, mind a Λ_c^+ barionokkal pp ütközésekben az LHC energiáin. Kimutattam, hogy a charm barionállapotok izospinje jelentős hatással van a keletkezési mintázatra. Az általam javasolt megfigyelhető mennyiségek segítségével a jövőbeli nagy statisztikájú kísérleti adatok segítségével képesek lehetünk különbséget tenni a strange- és charm-tartalmú hadronok különböző keletkezési mechanizmusai között [9, 10].

Publikációk

- [1] Varga, Z.; Vértesi, R.; Gábor Barnaföldi, G. Modification of jet structure in high-multiplicity pp collisions due to multiple-parton interactions and observing a multiplicity-independent characteristic jet size. Adv. High Energy Phys. **2019**, 2019, 6731362.
- [2] Varga, Z.; Vértesi, R.; Barnaföldi, G. G. Jet Structure Studies in Small Systems. Universe **2019**, 5, 132.
- [3] Varga, Z.; Vértesi, R.; Barnaföldi, G. G. Multiplicity Dependence of the Jet Structures in pp Collisions at LHC Energies. MDPI Proc. **2019**, 10, 3.
- [4] Varga, Z.; Vértesi, R. The Partonic Origin of Multiplicity Scaling in Heavy and Light Flavor Jets. Symmetry **2022**, 14, 1379.
- [5] Varga, Z. Jet momentum dependence of jet multiplicity in pp collisions at 13 TeV. ALICE Analysis Note **2024**,
- [6] Acharya, S.; others (ALICE Collaboration), Azimuthal correlations of heavy-flavor hadron decay electrons with charged particles in pp and p–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Eur. Phys. J. C **2023**, 83, 741.
- [7] Varga, Z.; Vértesi, R. The role of the underlying event in the Λ_c^+ enhancement in high-energy pp collisions. J. Phys. G **2022**, 49, 075005.
- [8] Varga, Z.; Misák, A.; Vértesi, R. The role of the underlying event in the charm-baryon enhancement observed in pp collisions at LHC energies. SciPost Phys. Proc. **2024**, 15, 014.
- [9] Varga, Z.; Misák, A.; Vértesi, R. Event-activity-dependent production of strange and non-strange charmed baryons in the enhanced color-reconnection scheme. J. Phys. G **2023**, 50, 075002.
- [10] Vértesi, R.; Varga, Z. Connection of event shapes to the heavy-flavor baryon enhancement. arXiv:2402.01234 [hep-ph]. 2024.

Tézispontokhoz nem kapcsolódó további publikációk:

- [P1] D. Nógrádi, L. Szikszai, Z. Varga, "SU(2) Lattice gauge theory with a topological action", JHEP 1808 (2018) 032.