



A KIS RENDSZEREKBEN MEGFIGYELT
KOLLEKTÍV VISELKEDÉS EREDETE AZ
ALICE LHC KÍSÉRLET NEHÉZKVARK-
MÉRÉSEIN KERESZTÜL

PhD téziszfüzet

Gyulai László

PhD hallgató

Dr. Vértési Róbert

Témavezető

Dr. Kis Dániel Péter

Konzulens

Budapest

2025

Bevezető

A kvantumszíndinamikában (QCD) a kvarkok és gluonok alacsony energiáknál hadronokba vannak zárva, és szabad állapotban nem figyelhetők meg. A modern részecskegyorsítók, mint például a Relativisztikus nehézion-ütköztető (RHIC) és a Nagy Hadronütköztető (LHC) azonban lehetővé tették, hogy elérjük azokat az energiasűrűségeket, amelyeknél a partonok a hadronokból kiszabadulva, a kvark-gluon plazma (QGP) állapotában léteznek. Eredetileg azt feltételezték, hogy a QGP ideális gázként viselkedik, azonban a RHIC-nél végzett mérések során a nehézion-ütközések végállapotában erős kollektív mozgást figyeltek meg. Ez egy erősen csatolt, folyadékszerű QGP hidrodinamikai viselkedéseként értelmezhető, ahol a szabadsági fokok a kvarkok. Később az LHC mérések nemcsak nehézion-ütközésekben találtak kollektív viselkedést, hanem kisebb p -Pb és pp rendszerekben is. Ezekben a kisebb ütközési rendszerekben a sokkal kisebb energiasűrűségek miatt a QGP kialakulását nem feltételezzük. Bár a QGP keletkezése kis térfogatokban nem zárható ki teljesen, több elméleti munka vákuum-QCD folyamatokkal magyarázza a kis rendszerekben megfigyelt kollektív viselkedést, amilyen például a sokparton-kölcsönhatás (MPI) vagy a húrlökéssel járó húrhadronizáció.

Nagyenergiás ütközésekben a könnyű vagy ritka kvarkokat tartalmazó hadronok többnyire a végállapotra vonatkozó információt hordoznak. A nehéz c és alsó b kvarkok túlnyomórészt az ütközések kezdeti szakaszában keletkeznek. Mivel a nehéz kvarkok keletkezése perturbatív módon leírható egészen alacsony impulzusokig, ezek segítségével ellenőrizhetjük a QCD számításokat. Ezen kívül a nehéz kvarkok kiváló lehetőséget nyújtanak arra, hogy a QGP tulajdonságait ne csak referenciaként, hanem tomográfias módszerrel is vizsgáljuk: hosszú élettartamuk és elhanyagolható annihilációs hatáskeresztmetszetük miatt a nehéz kvarkok az erősen kölcsönható rendszer teljes fejlődésében részt vesznek.

Az azonosított hadronok transzverzális impulzus (p_T) spektrumai információt hordoznak a hadronizáció során zajló partonszintű folyamatokról. A hadronizáció megértése fundamentális elvek alapján nem lehetséges, mivel az erős kölcsönhatás ezen energiaskálákon nem perturbatív jellegű. Míg a spektrum nagy p_T -s részét a hadronok jet-szerű, kemény keletkezése határozza meg, addig az alacsony- p_T rész a lágy keletkezésnek felel meg, amely a termodinamika és a hidrodinamika segítségével írható le. Széleskörű kutatás irányul egy olyan egységes modell kidolgozására, amely képes egyszerre leírni a kemény és a lágy tartományt. A különböző megközelítések közül a nem-extenzív statisztika bizonyult hatékonynak az azonosított részecskék spektrumának leírásában.

Célkítűzés

Dolgozatomban a nehéz kvarkot tartalmazó mezonok keletkezését vizsgáltam a nagy-energiás ütközésekben. Elsődleges céloom az volt, hogy megértsem a kis ütközési rendszerekben nagy végállapoti multiplicitásnál megfigyelt kollektivitás okát. A hadronütközésekben lejátszódó folyamatokat nehéz kvarkokkal tanulmányoztam. Először a D- és B-mezonok, valamint a c és b kvarkok keletkezését vizsgáltam szimulációkban a transzverzális eseményaktivitás függvényében. Ennek segítségével különbséget tudtam tenni a kemény és lágy keletkezési folyamatok között, így lehetőséget adva a kollektivitás és a vákuum-QCD folyamatok, mint például az MPI összekapcsolására. További céloom volt, hogy megvizsgáljam az MPI szerepét kis ütközési rendszerekben, ezért elvégeztem a D^0 mezonok keletkezésének vizsgálatát az ALICE kísérletben, és összehasonlítottam a modelleket az adatokkal. Végül alkalmaztam a nem-extenzív termodinamikai keretrendszert a STAR és az ALICE kísérletekben megmért ütközési rendszerekben, hogy megbecsüljem a nehéz kvarkok keletkezésének időskáláját, és hogy meghatározzam, hogy a nehéz kvarkok alkalmazhatóak-e arra, hogy információt nyerjünk az ütközés korai szakaszából.

Vizsgálati módszerek

Az ALICE kísérlet eredményei azt mutatták, hogy a transzverzális tartományban a részecskék keletkezése nem kapcsolódik az ütközések kemény folyamataihoz, és a lágy háttéreseményekkel írható le. Dolgozatomban a pp ütközésekben keletkező D-mezonokat osztályoztam a transzverzális eseményaktivitás alapján. Az események szimulációjához a PYTHIA 8 Monte Carlo eseménygenerátort használtam. A transzverzális eseményaktivitás segítségével megvizsgáltam a lágy folyamatok hatását a D és a B mezonok keletkezésére.

Az ALICE detektor kiválóan alkalmas a nehéz kvarkok vizsgálatára egészen alacsony impulzustartományokban is. A belső nyomkövető rendszer (ITS) 100 mikron felbontású, ami lehetővé teszi a másodlagos vertex nagy pontosságú rekonstrukcióját. A transzverzális eseményaktivitás szerinti osztályozást alkalmazva elemeztem az ALICE Run 2 adatfelvételi időszakában gyűjtött adatokat, és az eredményeket összehasonlítottam az általam készített szimulációkkal.

Az azonosított részecskék transzverzálisimpulzus-eloszlásaiban két alapvetően különböző rész figyelhető meg: egy alacsony impulzusú régió, ahol a részecskék keletkezését lágy folyamatok szabják meg, és egy magas impulzusú régió, ahol a perturbatív QCD által jól leírható partonzápor-keletkezési folyamatok zajlanak. A spektrum alacsony- p_T része Boltzmann–Gibbs statisztikával írható le, míg a nagy p_T -s rész hatványfüggvény-szerű lecsengést mutat. A nem-extenzív Tsallis–Pareto statisztikát alkalmazó keretrendszer lehetővé teszi a két rész összekapcsolását, és ezzel a teljes spektrum univerzális leírását egyetlen elmélet keretében. A dolgoza-

tomban a Tsallis–Pareto eloszlást alkalmaztam a STAR és az ALICE kísérletekből azonosított D-mezonok spektrumaira, hogy megkapjam az egyes spektrumokat leíró Tsallis paramétereket. Ebben a keretrendszerben összehasonlítottam a nehézkvark-tartalmú D-mezonokat a könnyű hadronokkal, a könnyű és nehéz részecskék keletkezési folyamatainak mélyebb megértése érdekében.

Eredmények

Az eredményeimet az alábbi tézispontokban foglalom össze:

1. Megvizsgáltam a nehéz kvarkok (c és b) és a nehéz kvarkok fragmentációjából keletkező D és B mezonok eseményaktivitás-függő keletkezését $\sqrt{s} = 13$ TeV ütközési energiájú pp ütközésekben a PYTHIA 8 Monte Carlo eseménygenerátor segítségével. Az események transzverzális eseményaktivitásának (R_T) meghatározásához a vezető (legnagyobb transzverzális impulzusú) ún. „trigger” hadronokat, valamint jeteket használtam. Megvizsgáltam a nehéz hadronok keletkezését az azonos-oldali (a triggerhez azimutálisan közeli) tartományban és a transzverzális (a triggerre az azimutális síkban merőleges) tartományban. Kimutattam, hogy a D- és B-mezonok keletkezése az azonos-oldali tartományban a transzverzális eseményaktivitástól függ alacsony transzverzális impulzus p_T értékeknél mindkét trigger típus esetében. A hadron triggeres esetében ez a függés nagy impulzusoknál eltűnik, míg a c - és b -jet triggeres (c , illetve b kvarkot tartalmazó vezető jetek) esetében az R_T függés nem szűnik meg a nagy-szögű gluonhasadásból eredő önkorrelációs hatások miatt. Megállapítottam, hogy az alacsony transzverzális impulzusú D- és B-mezonok a háttéreseményben keletkeznek, míg a nagy p_T -s nehéz mezonok többnyire a vezető kemény folyamatban jönnek létre. Továbbá megvizsgáltam a nehéz kvarkok keletkezését a hadronnal triggerelt eseményekben. A várakozásoknak megfelelően a c kvarkok és a D-mezonok között a transzverzális impulzusskala eltolódását tapasztaltam, ami a c kvarkok D-mezonokká történő hadronizációjával magyarázható meg, míg ez a hatás a b kvarkok és a B-mezonok összehasonlításakor minimális, ami a sokkal keményebb fragmentációnak köszönhető. A vizsgálataim során kimutattam, hogy a nehéz részecskék keletkezése a transzverzális tartományban a teljes vizsgált transzverzális impulzustartományban függ az R_T -től, ami azt jelenti, hogy a D és B mezonok ebben a tartományban főleg a háttéreseményben keletkeznek. Érdekes módon hasonló viselkedést figyeltem meg az azonos-oldali tartományban könnyű jetekkel kiváltott események esetén, ahol a vezető részecskezépor nem tartalmaz nehéz kvarkokat, ami arra utal, hogy a nehéz részecskék keletkezése teljesen független a kemény folyamatoktól ezekben az eseményekben [1]. Ezek az eredmények megalapozták az alább ismertetett adatelemzést.

2. Az LHC ALICE kísérlet $\sqrt{s} = 13$ TeV ütközési energiájú pp ütközéseiben megmértem a nehéz D^0 mezonok keletkezését a transzverzális eseményaktivitás R_T függvényében. Az események kiválasztását hadrontriggerekkel végeztem, és a hozamokat csak az azonos-oldali tartományban vizsgáltam meg az LHC Run 2 adatgyűjtési időszakban gyűjtött adatok statisztikai korlátai miatt. A D^0 mezonok nyers hozamát a D^0 jelöltek invariáns tömegcsúcsának illesztésével kaptam meg. A D^0 -mezonok tényleges p_T -eloszlásának meghatározásához az ALICE detektorrendszer töltött részecskék nyomkövetési és D-mezon rekonstrukciós hatásfokára, valamint a geometriai akceptanciára vonatkozó korrekciókat alkalmaztam. Meghatároztam a gyenge b-hadron-bomlásokból származó, „feed-down” D^0 -mezonok arányát, és azt levontam a D^0 -mezonok hozamából. Megvizsgáltam és kiértékeltem a szisztematikus bizonytalanságok különböző forrásait, mint például a D^0 -mezonok topológiai kiválasztása, az invariáns tömegcsúcs illesztése, az R_T tartományok közti migráció és a feed-down kiértékelése által okozott bizonytalanságot. Az eredményeimet összehasonlítottam két különböző paraméterezésű PYTHIA 8 szimulációval, és azt tapasztaltam, hogy az eredmények a hibahatáron belül megegyeznek a szimulációkkal [2, 5, 6]. Ez bizonyítja a módszer alkalmazhatóságát, viszont a Run 3 adatgyűjtés magasabb luminozitása szükséges a modellek teszteléséhez. Az eredményeket összefoglaló publikáció készül a kollaboráción belül.

3. Megvizsgáltam a D-mezonok keletkezését a nem-extenzív statisztikai keretrendszerben. A vizsgálatához felhasználtam az ALICE és a STAR kísérletekben megmért azonosított D mezonok transzverzális impulzus eloszlásait több ütközési rendszerben, a pp-től az A–A-ig, és több ütközési energiánál – $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV és $\sqrt{s_{NN}} = 7$ TeV között. Megmutattam, hogy a Tsallis–Pareto-eloszlás alkalmazható a D-mezonok transzverzális impulzusspektrumának pontos leírására, a könnyű hadronokhoz hasonlóan. Az alkalmazott modell érvényességét igazoltam a termodinamikai konzisztencia teljesülésének ellenőrzésével. Kimutattam, hogy a D-mezonok transzverzális impulzus spektrumából meghatározott Tsallis paraméterek skálázó viselkedést mutatnak a töltött részecskék multiplicitásával és az ütközési energiával. Ez a skálázás azonban kvantitatívan eltér a könnyű és ritka hadronok esetétől. Meghatároztam a D-mezonok közös csoportosulási pontját, ami a kis-multiplicitású rendszerek határesetére jellemző, és mind a T Tsallis-hőmérsékletnél, mind a q nem-extenzivitási paraméternél magasabb értékeket vesz fel a könnyű hadronokhoz képest. A közös csoportosulási pont eltolódása alátámasztja azt a tényt, hogy a nehéz hadronok spektruma a reakció korábbi szakaszáról hordoz információt, mint a könnyű hadronok spektrumai, amelyek a kifagyási szakaszban keletkeznek. Bjorken-féle tágulást feltételezve a nehéz és könnyű hadronok közötti Tsallis-hőmérsékletkülönbségéből meghatároztam a hadronok keletkezési időskáláját. Arra a következtetésre jutottam, hogy a D-mezonok a könnyű

hadronokhoz képest 0.18 ± 0.06 -szor korábbi sajátidőnél keletkeznek [3].

4. Meghatároztam különböző hadronfajták (töltött pionok és kaonok, K^0 , (anti)protonok, ϕ mezonok, Λ^0 hiperonok és D-mezonok) spektrumainak keletkezési idejét az ALICE kísérlet $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV és $\sqrt{s_{NN}} = 13$ TeV energiákon rögzített pp, p–Pb és Pb–Pb ütközéseiben. Megállapítottam, hogy a mezonok közös csoportosulási pontjainak Tsallis-hőmérséklete, T_{eq} , a mezonok tömegével skáláz. Azonban a barionok T_{eq} értékei a hasonló tömegű mezonokéinál szignifikánsan kisebbek. Megfigyeltem, hogy a közös csoportosulási pontok nem-extenzivitási paramétere, q_{eq} , nem függ jelentősen a hadronok tömegétől. Bjorken-féle tágulást feltételezve megfigyeltem, hogy a mezonok keletkezési ideje a mezonok tömege szerint rendeződik. A pionok spektrumai lényegesen később keletkeznek, mint a többi hadroné: a pionoknak megfelelő keletkezési időskála háromszor nagyobb, mint a kaonoké, és körülbelül harmincszor nagyobb, mint a D-mezonoké. A q_{eq} értékek és a relatív multiplicitási fluktuációk δ^2 értékei alapján megbecsültem a rendszer fajhőjét is. A különböző részecskefajokra vonatkozó eredmények egymással konzisztensek, és a fajhőre egy $C > 5$ alsó korlátweb adódik. A könnyű kvarkokból álló hadronoknak megfelelő nagy C értékek nagymértékben termalizált rendszerre utalnak [4].

Hivatkozások

PUBLIKÁCIÓK

- [1] L. Gyulai, S. Sándor és R. Vértési. „Defining the Underlying-Event Activity in the Presence of Heavy-Flavour Processes in Proton-Proton Collisions at LHC Energies”. *Particles* 5.3 (2022), 235–244. old.
- [2] L. Gyulai (ALICE collaboration). „ D^0 meson yields as a function of the Underlying Event activity in pp collisions at 13 TeV”. *ALICE-PUBLIC-2024-001* (2024). <https://cds.cern.ch/record/2901185>.
- [3] L. Gyulai, G. Bíró, R. Vértési és G. G. Barnaföldi. „How far can we see back in time in high-energy collisions using charm hadrons?” *J. Phys. G* 51.8 (2024), 85103. old.
- [4] L. Gyulai, G. Bíró, R. Vértési és G. G. Barnaföldi. „Evolution of the hot dense matter at LHC energies through light and heavy-flavor hadrons using non-extensive thermodynamics” (2024). Accepted by *Int. J. Mod. Phys. A*. arXiv: 2409.01085 [hep-ph].

KONFERENCIAKÖZLEMÉNYEK ÉS JEGYZŐKÖNYVEK

- [5] L. Gyulai (ALICE collaboration). „Heavy-flavour production as a function of event activity in pp collisions with the ALICE experiment”. *EPJ Web Conf.* 314 (2024), 35. old.
- [6] L. Gyulai (ALICE collaboration). „D0 meson yields as a function of the Underlying Event activity in pp collisions at 13 TeV”. *ALICE Internal Analysis Note ANA-1368* (2023).
- [7] L. Gyulai (ALICE collaboration). „Heavy-flavour production in proton–proton collisions with the ALICE experiment”. *J. Phys. Conf. Ser.* 1690.1 (2020), 12165. old.

Konferencia előadások és posztterek

1. L.Gyulai, “Heavy-flavour measurements with the ALICE experiment”, 24. Zimányi School, Budapest, 2024-12-05,
<https://indi.to/hhJHN>
2. L.Gyulai, “How far can we see back in time in high-energy collisions using charm?”, Theory and Experiment in High Energy Physics, Warsaw, 2024-10-29,
<https://indi.to/GyBqd>
3. L.Gyulai, “Milyen messzire láthatunk a múltba charm hadronokkal a nagy-energiájú ütközésekben?”, Magyar Magfizikus Találkozó 2024, Debrecen, 2024-09-03,
<https://indico.wigner.hu/event/1600/contributions/4118/>
4. L.Gyulai, “Heavy-flavour production as a function of event activity in pp collisions with the ALICE experiment”, International Workshop on QCD Theory and Experiment, Trani, 2024-06-20,
<https://agenda.infn.it/event/37243/contributions/233577/>
5. L.Gyulai, “How far can we see back in time in high-energy collisions using charm?”, 21st International Conference on Strangeness in Quark Matter, Strasbourg, 2024-06-04,
<https://indico.in2p3.fr/event/29792/contributions/137422/>
6. L.Gyulai, “Investigation of the heavy-flavor hadronization time-scale using the Tsallis-thermometer”, 23. Zimányi School, Budapest, 2023-12-06,
<https://indi.to/j2WHL>

7. L. Gyulai, “Defining the Underlying-Event Activity in the Presence of Heavy-Flavour Processes in Proton-Proton Collisions at LHC Energies”, 22. Zimányi School, Budapest, 2022-12-05,
<https://indi.to/8YNCR>
8. L.Gyulai, „D⁰ meson production in dependence on the transverse activity classifier R_T in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ALICE experiment”, 29th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Krakow, 2022-04-08,
<https://indi.to/LvXX5>
9. L. Gyulai, “Production of heavy-flavoured mesons and jets in dependence on Underlying Event activity”, 21. Zimányi School, Budapest, 2021-12-09,
<https://indi.to/XdDky>
10. L. Gyulai, “Heavy-flavour production in proton-proton collisions with the ALICE experiment”, 20. Zimányi School (online), 2020-12-10,
<https://indi.to/pvpRq>
11. L.Gyulai, “Heavy-flavour production in proton-proton collisions with the ALICE experiment”, 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (online), 2020-10-07,
<https://indico.particle.mephi.ru/event/35/>