

NEHÉZ KVARKOK KELETKEZÉSE AZ LHC ALICE KÍSÉRLETÉNÉL

Frajna Eszter,^{1,2} Vértési Róbert¹

¹Wigner Fizikai Kutatóközpont – MTA kiváló kutatóhely

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Nehéz kvarkok szerepe a nagyenergiás magfizikában

A Világegyetem keletkezése utáni töredék másodpercben a világot egy forró, erősen kölcsönható anyag, a *kvark-gluon plazma* töltötte ki. Napjaink nagyenergiás részecskegyorsítóiban ultrarelativisztikus nehézion-ütközések segítségével létre tudjuk hozni ezt a közeget, és az elmúlt mintegy két évtized során megismertük alapvető tulajdonságait. A CERN *Nagy Hadronütköztetője* (LHC, Large Hadron Collider) segítségével az utóbbi években gyűjtött rendkívül nagy adatmennyiség lehetővé teszi számunkra,

hogyan célirányos próbákkal részletesen feltérképezhessük a kvark-gluon plazma tulajdonságait. Ez hozzásegít minket az erős kölcsönhatás működésének mélyebb megértéséhez. Az erősen kölcsönható *kvarkok* és *gluonok* úgynevezett *színtöltéssel* rendelkeznek, a valóságban azonban csak színsemleges állapotok fordulnak elő.¹ Ez jelenti az erős kölcsönhatás tanulmányozásának fő nehézségét is: a térelméleti modellek perturbációszámításon alapuló analitikus megoldásai csak a nagy impulzuscsérés szórási folyamatok esetében használhatók, a reakció során létrejött kvarkok és gluonok viszont csak közvetetten, részecskékbe zárva figyelhetők meg, így a folyamatok teljes leírásához szükségünk van közelítő (például

A kutatást az NKFIH/OTKA K 120660 és FK 131979 témaszámú pályázata támogatta.



Frajna Eszter a Budapesti Műszaki Egyetem végzős mesterszakos fizikus hallgatója. Kutatási területe a nehéz kvarkok korrelációinak kísérleti és fenomenológiai vizsgálata. Tagja a nemzetközi ALICE kollaborációnak.



Vértési Róbert a Debreceni Egyetemen doktorált 2011-ben a kvark-gluon plazma kísérleti kutatásából. A Wigner FK Hadronfizika csoportjának vezetője, az ALICE nehézkvarkjet és -korrelációs munkacsoportjának koordinátora. Szakterülete a kis rendszerek fenomenológiája, valamint a nehéz kvarkok vizsgálata nagyenergiás ütközésekben.

¹A színek értékei megegyezéssel alapon *piros, zöld és kék*, illetve ezek *antiszínei*. A színsemleges (*fehér*) állapot előállhat szín-antiszín párként, vagy a három (anti)szín együttes jelenlétével.

fenomenológiai) modellekre. A kvark-gluon plazma keletkezése után hamar lehűl, és *hadronokká* alakul: kvark-antikvark párokból álló *mezonokká* vagy három kvarkból álló *barionokká*. Ez utóbbiak közé tartozik a proton és a neutron. A hadronokat alkotó kvarkokat a gluonok közvetítette erős kölcsönhatás tartja össze. A hadronok felépítését az 1. ábra szemlélteti.

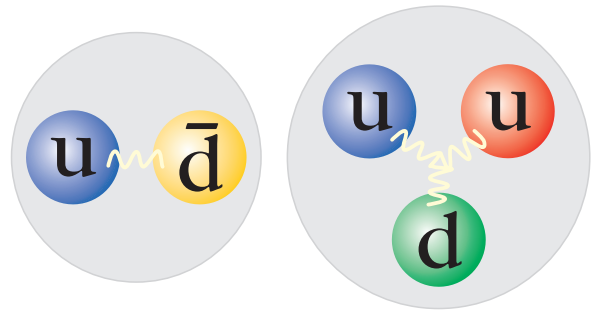
Bár a világban jelen lévő stabil anyagot a két könnyű (u, *up* és d, *down*) kvark alkotja, a nagyenergiás ütközésekben ennél nehezebb kvarkok is létrejönnek. Ezek közül a c (*charm*, $m_c = 1,27 \text{ GeV}/c^2$) és a b (*beauty* $m_b = 4,2 \text{ GeV}/c^2$) kvarkok² egyedülálló lehetőséget nyújtanak az erős kölcsönhatás nemperturbatív tartományának megértéséhez: nagy tömegük folytán legtöbbször nagy impulzuscserevel járó szórásokban jönnek létre, amilyenek csak az ütközés kezdeti állapotaiban történnek.³ Mivel a nehéz kvarkok annihilációs hatáskeresztmetszete elhanyagolható, a reakció későbbi lépései során számuk közel változatlan marad. Élettartamuk során azonban kölcsönhatnak a forró és hideg maganyaggal, így alkalmasak arra, hogy velük az erősen kölcsönható közeget tomográfiai módon megismerjük. A nehéz kvarkokat tartalmazó részecskék, a nehéz hadronok végül gyenge bomlással alakulnak könnyű részecskékké. A kísérletben ezen bomlástermékek kinematikai paramétereiből tudjuk a nehéz hadronok tulajdonságait rekonstruálni. A könnyű és nehéz kvarkok hozamait összehasonlítva a *partonok* (kvarkok vagy gluonok) keletkezési és hadronizációs folyamatainak, valamint a közzeggel való kölcsönhatásuknak a színtöltéstől, illetve a partontömegetől való függését érthetjük meg. A nehéz kvarkok kollektív mozgásban való részvétele pedig a plazma termikus viselkedéséről hordoz információt [1, 2].

Az LHC és az ALICE

Az LHC az Európai Nukleáris Kutatási Szervezet, a CERN kutatóközpontjában, Franciaország és Svájc határán található. A körülbelül 100 m-es mélységben lévő alagútban egy 27 kilométer kerületű szinkrotron-gyűrű húzódik, amely változó elektromos tér segítségével közel fénysebességre gyorsít fel protonokat vagy nehéz ionokat. A töltött részecskék nyalábját szupravezető mágnesek tartják pályán és fókuszálják. A pálya mentén négy nagy detektor található, amelyekkel a részecskék ütközéseit vizsgálják. A detektorok különböző jelenségek tanulmányozására jöttek létre. Míg az ATLAS és a CMS elsősorban a proton-proton ütközésekre – a Higgs-bozon tulajdonságainak

²A részecskék tömegét a tömeg-energia ekvivalencia alapján elektronvoltban célszerű kifejezni. Összehasonlításként, a proton tömege $m_p \approx 0,931 \text{ MeV}/c^2$, amelyből a protont alkotó könnyű kvarkok nyugalmi tömege elhanyagolható.

³Az LHC ütközéseiben kis számban t (*top*) kvarkok is keletkeznek, de ezek rendkívül nagy, $m_t = 173 \text{ GeV}/c^2$ tömegük miatt még a hadronizáció előtt elbomlanak b kvarkokra, a belőlük származó járulékot nem különítjük el.

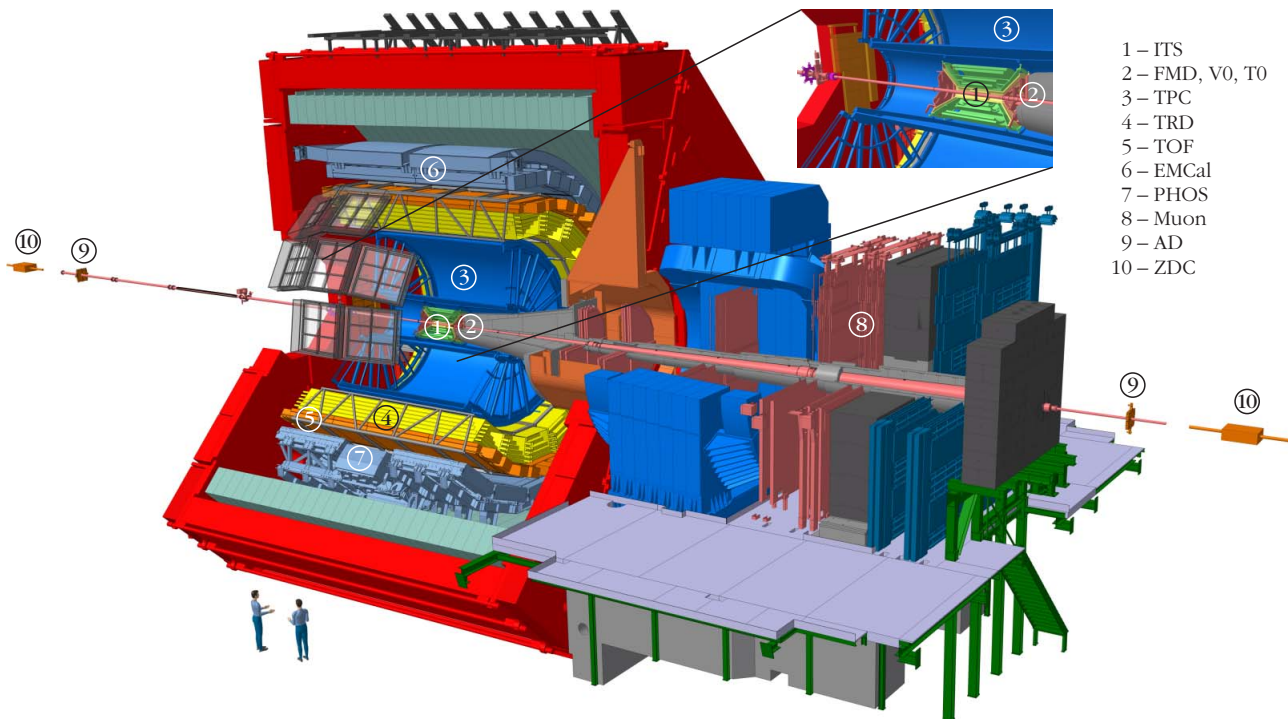


1. ábra. A hadronok kvarkszerkezete: mezon (π^+) és barion (proton). (Forrás: Horváth Árpád, CC BY-SA 2.5 licenc, via Wikimedia Commons.)

mérésére, a részecskefizika standard modelljének pontosabb megismerésére, illetve az ezen túli fizika keresésére – összpontosít, az LHCb pedig elsősorban az elektromos szektor megértésére (mint a CP-sértés pontos kimérése) fókuszál, az ALICE kísérlet kifejezetten nehézion-ütközések megfigyelésére építették (2. ábra) [3].

Az ALICE-ban zajló kölcsönhatások vizsgálata és értelmezése érdekében nyomon kell követnünk a részecskék pályáját a térben. Az e célra elsődlegesen használt detektorok a *belső nyomkövetőrendszer* (Inner Tracking System, ITS) és az *időprojekciós kamra* (Time Projection Chamber, TPC). Az ITS egy félvezető detektor, a részecskék pályájának pontos meghatározásával lehetővé teszi a késői gyenge bomlások helyének megtalálását, az úgynevezett *másodlagos vertex* rekonstrukcióját. E a módszerrel a c, illetve b kvarkból származó hadronokat nagy pontossággal tudjuk azonosítani. A TPC sokszálas gáztöltésű kamra neon, szén-dioxid és nitrogén gázból álló keveréken keresztülhaladva a töltött részecskék ionizálják a gázmolekulákat, elektronok nyomvonalát hagyva maguk után. A töltött részecskék impulzusát a szolenoidmágnes terében leírt pálya sugara alapján tudjuk meghatározni, az EMCal *elektromágneses kaloriméter* az elektronok és fotonok energiáját méri. A TPC a töltött részecskéket fajlagos energiavesztésük alapján képes azonosítani, a semleges részecskék repülési idő alapján azonosíthatók. Az instabil részecskéket invariánstömeg-eloszlásaik alapján rekonstruáljuk a bomlástermékekből.

Az ALICE kísérlet segítségével megvizsgálhatjuk, hogy miként viselkedett az anyag közvetlenül az Ősrobbanás után, ezzel betekintést nyerhetünk az erős kölcsönhatást leíró *kvantum-színdinamika* (QCD) tulajdonságaiba, feltérképezhetjük a maganyag fázisdiagramjának hiányzó szegmenseit. Az LHC kísérletek a 2015–2020 közötti (úgynevezett Run-2) időszakában a korábbiaknál jóval nagyobb mennyiségű adatot gyűjtöttek, jellemzően a korábbinál magasabb ütközésienergia-tartományokban proton-proton (pp), proton-atommag (p-A) és atommag-atommag (A-A) ütközésekben [4], kiértékeléseik precíziós nehézkvark-méréseket tesznek lehetővé. Az alábbiakban ezek közül mutatunk be néhány példát az ALICE eredményei közül.

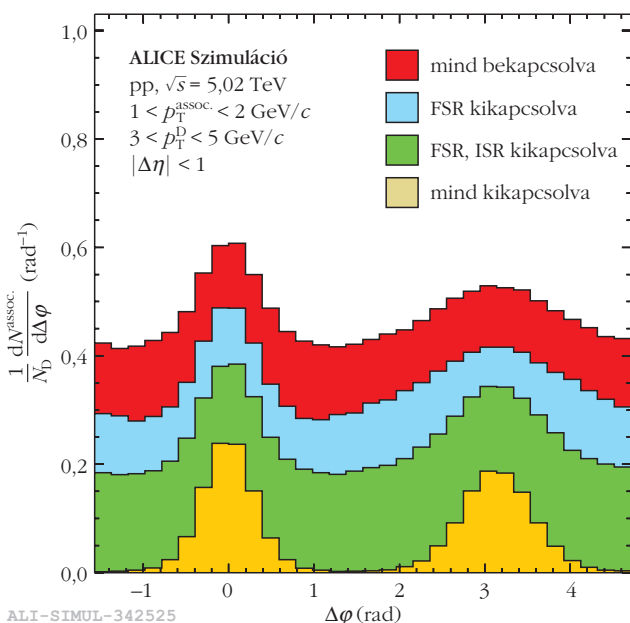


2. ábra. Az ALICE detektor sematikus ábrája az egyes alrendszerek megjelölésével.

A QCD tesztje nehéz kvarkokkal

Jelenlegi ismereteink szerint a pp ütközésekben nem jön létre kvark-gluon plazma. Így ezen ütközések egyfelől a vákuumbeli kvantum-szindinamikai modellek elsődleges tesztjeként szolgálnak, másfelől pedig referenciának használhatók a p-A és A-A ütközésekben történő maganyag-módosulások megértéséhez. A nehéz kvarkok differenciális keletkezési hatáskeresztmetszetét az ALICE nagy pontosságú mérésekben

3. ábra. Partonszintű folyamatok járuléka az ALICE D-h korrelációs csúcsaihoz $\sqrt{s} = 5,02$ TeV ütközési energián, PYTHIA 8 szimulációk alapján (ISR és FSR: kezdeti és végállapotú sugárzás).



ALI-SIMUL-342525

határozta meg számos csatornában, többek közt a c kvarkot tartalmazó D- és a b-t tartalmazó B-mezonok közvetlen rekonstrukciójából, valamint a nehéz mezonok szemileptonos bomlási csatornáiból származó elektronok és müonok spektrumának méréséből [5, 6]. Az általános tapasztalat szerint a perturbatív QCD-re alapuló modellek jól leírják a mérési adatokat, azonban ezen modellek bizonytalansága jóval magasabb a ma elérhető mérési pontosságnál. Ezért a kísérletek egyre inkább a ritkább, részletesebb, differenciáltabb próbák felé fordulnak.

A nagyenergiás ütközésekben keletkező nagy impulzusú partonok közvetlenül nem figyelhetők meg, azonban a detektorokban kollimált hadronnyalábként, az úgynevezett *jetek* formájában megjelennek. A jetképződés folyamatát *fragmentációnak* nevezzük. Míg a nehéz kvarkok hozamának mérése az ízfüggő partonképződés perturbatíván számolható folyamataiba nyújt betekintést, a jetek szerkezetének vizsgálata az analitikusan nem számolható fragmentációs folyamatokról is hordoz információt. A D-mezonok könnyű töltött hadronokkal való azimutális korrelációja (D-h korreláció) a jetszerkezet kialakulásának részleteit tárja fel. Az ALICE együttműködés elvégezte a D-mezonok hadronokkal való korrelációinak méréseit a $\sqrt{s} = 5,02$ TeV energiájú pp és p-Pb ütközésekben [7]. A kapott eredményeket az ütközési események részletes szimulációjával [8, 9] és a detektorválasz modellezésével jól le tudjuk írni, és segítségükkel elkülöníthetjük a végső korrelációs kép reakció különböző lépéseiből származó összetevőit. A 3. ábrán⁴ látható az egyes partonszintű folyamatok korrelációs

⁴A továbbiakban az ALICE szigorú ábrakonvencióit használjuk.

csúcshoz adott járuléka. Megfigyelhető, hogy a kétjeseeményeknek megfelelő csúcsok (a D és a könnyű hadron által bezárt azimuttszög $\Delta\varphi \approx 0$ és $\approx \pi$ értéknél) már a kezdeti folyamatokban kialakulnak, ettől eltérő irányban pedig a későbbi partonsugárzások és sokpartonszórásos folyamatok adnak járulékat.

A nehéz kvarkok hadronizációjába további betekintést nyerhetünk a barionos szektor vizsgálatával. Bár nehéz kvarkot tartalmazó barionok kis hatáske- resztmetszettel jönnek létre, a Run-2 periódusban elég adat állt rendelkezésre ilyen mérések elvégzéséhez is. A 4. ábrán a Λ_c^+ nehéz barion és a D^0 -mezon aránya figyelhető meg $\sqrt{s} = 7$ TeV energiájú pp ütközésekben, különböző szimulációkkal összehasonlítva. Látható, hogy a korábban alkalmazott, elektron-elektron ütközéseken alapuló modellek nem jól írják le az adatokat: alulbecsülik a barion-mezon arányt, nem adják vissza a kis impulzusoknál észlelt növekményt. Minde- ez arra utal, hogy a hadronizációs folyamatok füg- ghetnek az ütköző rendszertől. Bár az észlelt növe- kményt néhány modell új jelenségek figyelembe véte- lével képes kvalitatívan leírni [10, 11], a kvantitatív megértéshez szükséges adatokat a folyamatban lévő kísérletek fogják szolgáltatni.

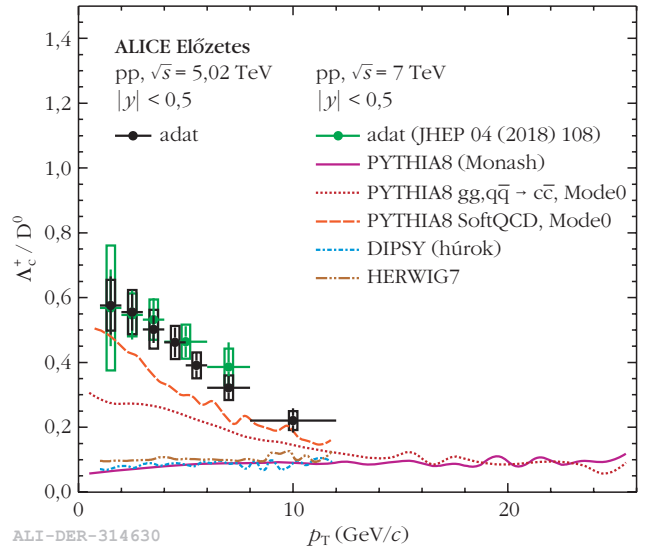
A hideg maganyag hatásai

A proton-atommag (p-A) ütközések elengedhetle- nek a hideg nukleáris anyagban bekövetkező válto- zások – amelyek alapot képeznek az atommag-atom- mag ütközésekben végzett mérésekhez – megértésé- hez. A p-A ütközésekben számolnunk kell kezdeti és végállapotú hatásokkal is, mint például a beérkező atommagon belüli partoneloszlás hatása (partonár- nyékolás), transzverzális impulzusok kiszélesedése sokszoros szórások hatására, illetve energiaveszteség a hideg maganyagban [12]. Emellett nem zárható ki teljesen az sem, hogy egy kicsiny térfogatban kvark- gluon plazma is keletkezhet centrális p-A ütközések- ben [13]. A maganyag módosító hatását legegyszer- rűbben a *nukleáris módosulási tényezővel* fejezhet- jük ki:

$$R_{pA}(p_T) = \frac{1}{\langle N_{\text{coll}} \rangle} \frac{dN_{pA}(p_T)/dp_T}{dN_{pp}(p_T) dp_T}, \quad (1)$$

ahol N_{pA} , illetve N_{pp} a keresett folyamat (például D-mezon keltése) egyetlen ütközésre jutó hozama pp, illetve p-A ütközésben, $\langle N_{\text{coll}} \rangle$ pedig a p-A ütközé- sekben előforduló, szimulációkból számolható bináris nukleon-nukleon ütközések átlagos száma. Az R_{pA} egységnyi értéke tehát azt jelenti, hogy a fizikai folya- matok a pp ütközésekhez képest nem módosulnak, egységnyinél kisebb érték a folyamat elnyomódását, annál nagyobb pedig a feldúsulását jelenti.⁵

⁵A nagyenergiás fizikában impulzus helyett rendszerint annak a – folyamatra jellemzőbb – nyalábtengelyre merőleges részét, a p_T transzverzális impulzust használjuk.



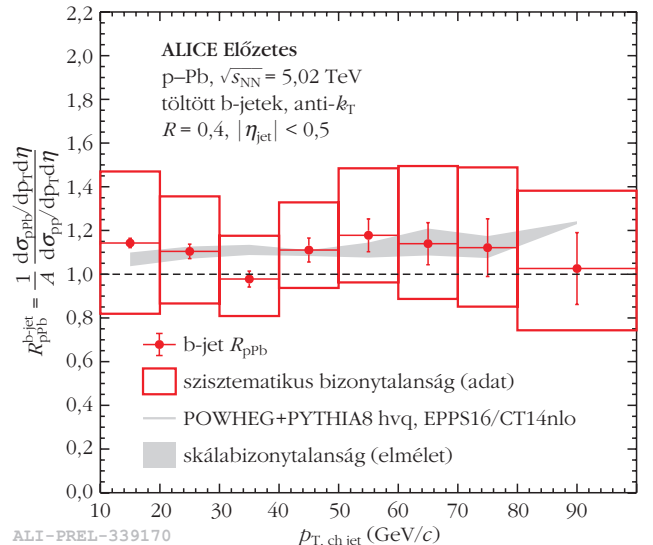
4. ábra. Λ_c^+ és D^0 aránya $\sqrt{s} = 7$ TeV energiájú pp ütközésekben, kü- lönböző modellszámításokkal összehasonlítva.

Az 5. ábrán b-kvarkot tartalmazó jetek nukleáris módosulási tényezője figyelhető meg $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV energiájú p-Pb ütközésekben. Látható, hogy a hideg maganyagban a b-kvarkok nem szenvednek el jelentős módosulást [14], bár a kísérleti bizonytalanság elsősorban a b-jetek azonosításának technikai nehézségei miatt nagy. Az ALICE közeljövőben elérhetővé váló mérései ezt a bizonytalanságot jelentősen csök- kenten fogják.

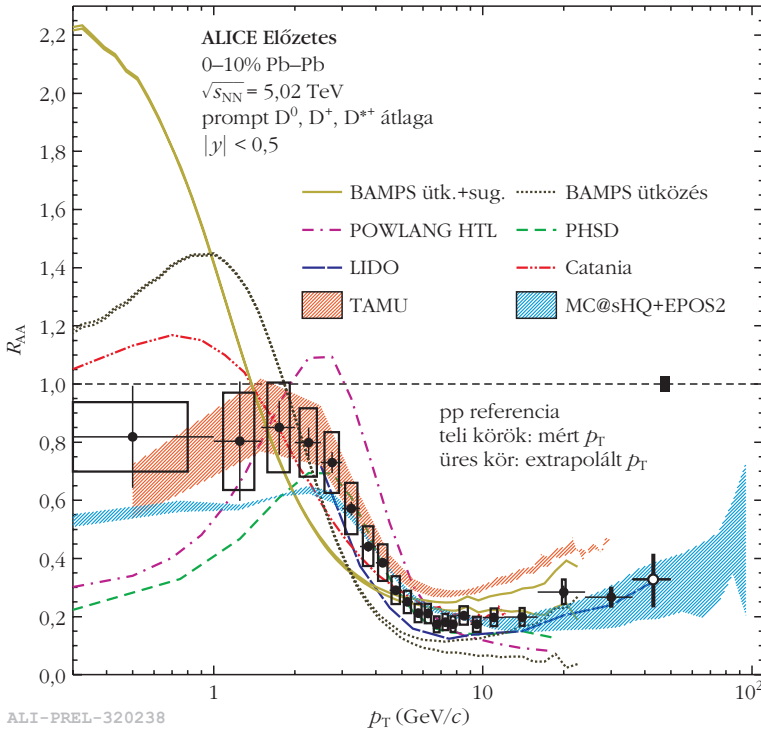
Nehéz kvarkok kölcsönhatása a kvark-gluon plazmával

Az atommag-atommag (A-A) ütközésekben keletke- ző sűrű és forró, erősen kölcsönható közeg csökkenti a rajta átfutó, szintöltéssel rendelkező részecskék energiáját – egyrészt ütközéseken, másrészt indukált

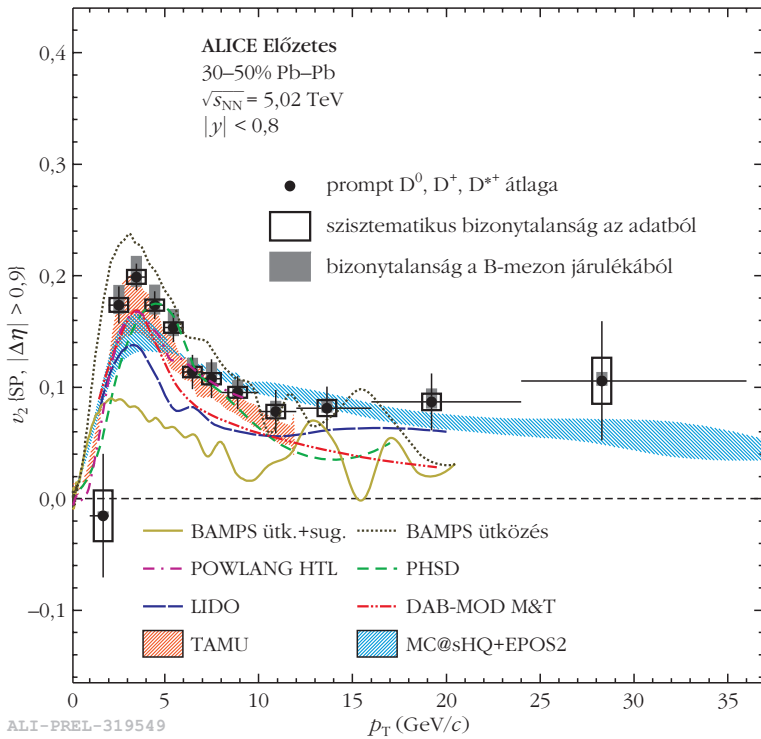
5. ábra. A b-jetek nukleáris módosulási tényezője $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV energiájú p-Pb ütközésekben.



ALICE-PREL-339170



ALI-PREL-320238



ALI-PREL-319549

6. ábra. D-mezonok R_{AA} nukleáris módosulási tényezője (fölül) és v_2 azimutális anizotrópiája (alul) Pb-Pb ütközésekben $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV energián, modellszámításokkal összehasonlítva.

gluonsugárzáson keresztül [15]. A nagy impulzusú részecskék elnyomódása így jelentős lesz: ahogyan az a 6. ábrán fölül megfigyelhető, a nehéz D-mezonok (D^\pm , D^0 és \bar{D}^0) nukleáris módosulási tényezője centrális Pb-Pb ütközésekben a $p_T \approx 10$ GeV/c tartományban a könnyű részecskékéhez hasonló [16] $R_{AA} \approx 0,2$ értéket vesz fel. Alacsonyabb p_T értékek-

nél azonban elnyomódás nem vagy jóval kevésbé figyelhető meg. Ennek okait jobban megérthetjük az azimutális aszimmetria vizsgálatával.

Kísérleti tapasztalat, hogy a kvark-gluon plazma erősen csatolt folyadékként viselkedik, viszkozitásmentes hidrodinamikai modellekkel jól leírható [18]. A nem centrális ütközésekben kezdetben jelen levő térbeli anizotrópia a kollektív tágulás során impulzustérbeli anizotrópiává alakul. Ennek paraméterezésére leggyakrabban az azimutimpulzus-eloszlás második Fourier-komponensét, az úgynevezett *eliptikus folyás* (v_2) mennyiségét használjuk [19]:

$$\frac{dN(p_T)}{d\phi} \approx 2 v_2(p_T) [\phi - \phi_{RP}], \quad (2)$$

ahol N a létrejövő részecskék száma, ϕ_{RP} pedig az adott ütközésben a bejövő részecskék párhuzamos egyenesi által kifejlesztett reakciósík azimutszöge. A név annak köszönhető, hogy ez a mennyiség mutatja meg, a tágulás mennyire tér el a kör-szimmetrikustól, milyen mértékben elliptikus. A 6. ábra alsó felén a D-mezonok v_2 paraméterét láthatjuk a p_T függvényében, $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV energiájú szemicentrális Pb-Pb ütközésekben. Az alacsony impulzustartományokban megfigyelhető $v_2 \approx 0,2$ érték közel esik a könnyű hadronokra jellemző értékekhez [20]. Különböző transportmodellekkel való összehasonlítás arra utal, hogy a nehéz kvarkok a kollektív mozgásba a könnyű kvarkokkal való *koaleszcencia* (klaszterformálódás) révén bekapcsolódnak [17]. Ugyanezen modellek szerint szintén a koaleszcencia ad magyarázatot arra, hogy a 6. ábra felső részén a kisebb p_T értékeknél nem tapasztalható jelentős elnyomódás.

Összefoglalás és kitekintés

A CERN-ben elhelyezkedő Nagy Hadronütköztető ALICE kísérlete az ultrarelativisztikus nehézion-ütközések során létrejövő kvark-gluon plazma tulajdonságait tanulmányozza a rajta keresztülhaladó részecskék kölcsönhatásainak vizsgálatával. Az LHC Run-2 adatgyűjtési periódusa lehetőséget kínált a ritkább, nehézkvarkpróbakkal történő pontos mérésekre is. A nehéz kvarkok elsősorban az ütközés kezdetén keletkeznek, és az ütközésben létrejövő közeg időfejlődése során mindvégig megmaradnak, így észlelésükkel a reakció összes fázisából nyerhetünk információt. A nehéz hadronok a bomlástermék-

keikből rekonstruálhatók, és tér- valamint impulzusbeli eloszlásaik alapján meghatározhatjuk a keletkezési folyamatokat, illetve a közeggel való kölcsönhatásukat.

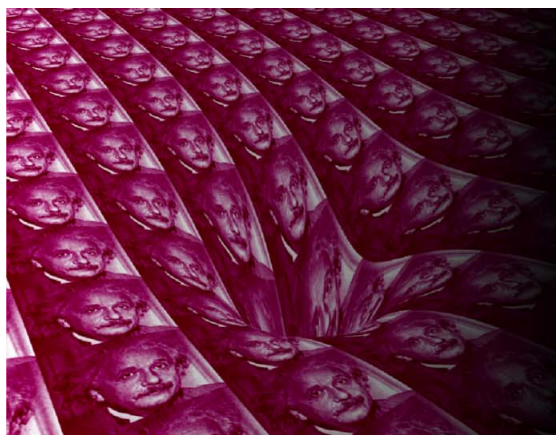
A nehéz kvarkok pp folyamatokban való keletkezését a perturbatív kvantum-szindinamikai modellek jól leírják, így a pp ütközések jól használhatóak referenciának a p–A és A–A ütközésekhez. Azonban a jet-keletkezés és a hadronizációs folyamatok jobb megértéséhez további, differenciált vizsgálatokra van szükség. A p–A ütközésekben létrejövő hideg maganyag nem módosítja jelentősen a nehéz kvarkok hozamát (de itt nem zárhatjuk ki a forró maganyag keletkezését sem). Az A–A ütközésekben megfigyelt nagy transzverzális impulzus esetén a nehéz kvarkok jelentős elnyomódását tapasztaljuk. Alacsonyabb impulzusoknál – a nukleáris módosulási tényező és az azimutális anizotrópia együttes tanulmányozásából – a nehéz kvarkok közeggel való erős koaleszcenciájára következtethetünk.

A budapesti Wigner Fizikai Kutatóközpont ALICE csoportja számos, elsősorban a nehéz hadronokhoz kapcsolódó (részben itt is bemutatott) ALICE mérésben vállalt és vállal jelentős szerepet. A meglévő mérések kiértékelésével párhuzamosan az LHC a 2021-ben induló Run-3 adatgyűjtési periódusára készül: az elkövetkező években az eddigi ütközésszámnál két nagyságrenddel többet fogunk felvenni. Ez a hatalmas adatmennyiség minden korábbinál részletesebb és pontosabb nehézkvarkméréseket tesz lehetővé, fogadásához azonban mind a gyorsítót, mind a detektorrendszereket alkalmassá kell tenni [4]. Kutatócsoportunk kulcsfeladatot lát el a TPC detektor, valamint az adatgyűjtő rendszer fejlesztésében [21, 22], és részt vett az ITS fejlesztésében is. Erőfeszítéseink végső soron a természet alapvető erőinek, azon belül az erős kölcsönhatás mélyebb megértését szolgálják.

Irodalom

1. A. Andronic et al.: Heavy-flavour and quarkonium production in the LHC era: from proton–proton to heavy-ion collisions. *Eur. Phys. J. C* 76/3 (2016) 107.
2. X. Dong, Y. Lee, R. Rapp: Open Heavy-Flavor Production in Heavy-Ion Collisions. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 69 (2019) 417.

3. B. B. Abelev et al. [ALICE]: Performance of the ALICE Experiment at the CERN LHC. *Int. J. Mod. Phys. A* 29 (2014) 1430044.
4. F. Noferini [ALICE]: ALICE results from Run-1 and Run-2 and perspectives for Run-3 and Run-4. *J. Phys. Conf. Ser.* 1014/1 (2018) 012010.
5. S. Acharya et al. [ALICE]: Production of muons from heavy-flavour hadron decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV. *JHEP* 09 (2019) 008.
6. S. Acharya et al. [ALICE]: Measurement of D-meson production at mid-rapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. *Eur. Phys. J. C* 77/8 (2017) 550.
7. S. Acharya et al. [ALICE]: Azimuthal correlations of prompt D mesons with charged particles in pp and p–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV (2019). Preprint: arXiv:1910.14403 [nucl-ex].
8. T. Sjöstrand, S. Mrenna, P. Z. Skands: A Brief Introduction to PYTHIA 8.1. *Comput. Phys. Commun.* 178 (2008) 852.
9. E. Frajna, R. Vértési: Correlation of Heavy and Light Flavors in Simulations. *Universe* 5/5 (2019) 118.
10. J. R. Christiansen, P. Z. Skands: String Formation Beyond Leading Colour. *JHEP* 08 (2015) 003.
11. M. He, R. Rapp: Charm-Baryon Production in Proton-Proton Collisions. *Phys. Lett. B* 795 (2019) 117.
12. R. Xu, W. Deng, X. Wang: Nuclear modification of high- p_T hadron spectra in p+A collisions at LHC. *Phys. Rev. C* 86 (2012) 051901.
13. A. Beraudo, A. De Pace, M. Monteno, M. Nardi, F. Prino: Heavy-flavour production in high-energy d–Au and p–Pb collisions. *JHEP* 03 (2016) 123.
14. R. Vértési [ALICE]: Heavy-Flavor Measurements with the ALICE Experiment at the LHC. *Universe* 5/5 (2019) 130.
15. S. Wicks, W. Horowitz, M. Djordjevic, M. Gyulassy: Elastic, inelastic, and path length fluctuations in jet tomography. *Nucl. Phys. A* 784 (2007) 426.
16. S. Acharya et al. [ALICE]: Production of charged pions, kaons and (anti-)protons in Pb–Pb and inelastic pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV (2019). Preprint: arXiv:1910.07678 [nucl-ex].
17. S. Cao, X. Wang: Jet quenching and medium response in high-energy heavy-ion collisions: a review (2002). Preprint: arXiv:2002.04028 [hep-ph].
18. J. Adams et al. [STAR]: Experimental and theoretical challenges in the search for the quark gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions. *Nucl. Phys. A* 757 (2005) 102.
19. R. Snellings: Elliptic Flow: A Brief Review. *New J. Phys.* 13 (2011) 055008.
20. J. Adam et al. [ALICE]: Anisotropic flow of charged particles in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. *Phys. Rev. Lett.* 116/13 (2016) 132302.
21. Á. L. Gera [ALICE]: Upgrade of the ALICE Time Projection Chamber for the LHC Run 3 (2020). Preprint: arXiv:2004.10520 [physics.ins-det].
22. S. A. Khan, J. Mitra, T. K. Nayak, T. Kiss, E. Dávid, A. Kluge: Common Readout Unit (CRU) – A New Readout Architecture for the ALICE experiment at the CERN-LHC. *DAE Symp. Nucl. Phys.* 59 (2014) 972.



A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kérik mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tétele, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Szemle hasábjain az olvasókkal!

