

A NAGY HADRONÜTKÖZTETŐ ELSŐ SIKEREI

Veres I. Gábor

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Atomfizikai Tanszék, Budapest
E-mail: Gabor.Veress@cern.ch

A kísérleti részecskefizikai kutatásokkal kapcsolatban gyakran merülnek fel a fizika, különösen a mikrovilág fizikájának legalapvetőbb megoldatlan problémái és nehéz kérdései, hiszen az elsődleges célja ennek a munkának az ilyen kérdések megválaszolása. Ezek közé tartozik az anyagot felépítő részecskék (fermionok) tömegének eredete, a kis méretskálakon már biztosan nem teljes részecskefizikai standard modell kiterjesztése és az azon túli jelenségek, részecskék keresése, a Világegyetemben található anyag és antianyag mennyiségének aszimmetriája és az asztrofizikai mérésekből következtethető sötét anyag mibenléte. Vannak a kísérleti kutatásnak talán kevesebb nyilvánosságot élvező, mégis érdekes problémái és felfedezései, melyekre példa a már ismert alkotórészekből (kvarkokból) álló, de még soha nem látott részecskék (penta- és tetrakvarkállapotok) felfedezése, illetve az ismert részecskék viselkedésében felfedezett meglepő különlegességek, mint például az atommagok gluontelítődése vagy a nagy energiájú részecskeütközésekben keletkezett hadronok (kvarkokból felépített részecskék) nehezen értelmezhető kollektív mozgása.

Ezeknek a kérdéseknek a kísérleti vizsgálatához azonban számtalan eszköz, kiértékelési és szimulációs módszer, elméleti számítás precíz alkalmazására van szükség, és sokszor első látásra egészen távoli tématerülethez tartozó előzetes eredmények is szükségesek hozzá. Gondoljunk például arra, hogy egy standard modellen túli részecske felfedezése csak akkor lehetséges, ha meggyőződünk róla, hogy az általunk mért *jelet* nem tudja (pontosabban nem tudja elég nagy valószínűséggel) létrehozni egy olyan folyamat is, ami ritka ugyan, de a standard modell szerint is lehetséges (*hátteret*).

A részecskegyorsítók alapötlete, hogy két részecske (általában atommag, elektron vagy antielektron, néha neutron, foton, pion vagy kaon) ütközése során a parányi térfogatba összesűrített (mozgási) energiát (E) felhasználva a természet a saját törvényei szerint létrehoz különböző tömegű (m) részecskéket, melyeket vizsgálva próbáljuk ezeket a törvényeket felderíteni és megfogalmazni. Egy m tömegű részecske keletkezéséhez legalább

$E = mc^2$ energia szükséges, ahol c a vákuumbeli fénysebesség. Elméleti és kísérleti megfontolások egyértelműen arra mutatnak, hogy vannak ismeretlen, nagy tömegű részecskék, amelyek felfedezéséhez emiatt minden eddiginél nagyobb ütközési energiára van szükség. Ezért kíséri mindig, mint ahogy a Nagy Hadronütköztető esetében is, óriási figyelem egy-egy új gyorsító beindulását. Nehéz megjósolni, hogy milyen váratlan felfedezésekhez vezet az ilyenkor elérhető nagyobb energia- és tömegtartomány, de érdekes módon még az olyan egyszerű mennyiségek is csak nagyon pontatlanul láthatóak előre, mint az ütközésenként keletkezett részecskék átlagos száma – ez pedig fontos technikai információ a gyorsító működése (pl. a detektorok anyagának sugárterhelése, rosszul vagy kétszer érzékelt részecskék stb.) szempontjából, és a kis valószínűséggel létrejövő folyamatok tekintetében adhat lényeges járulékot, illetve hátteret. Sőt, mivel elméleti úton precízen nem kiszámítható, fontos információt ad az elemi részecskék dinamikájáról, és elengedhetetlen a pontos ismerete a kozmikus sugárzás, a gyorsítós neutrínofizikai kutatások és a nehézionok fizikája szempontjából is. Az ilyen típusú első mérésekre és a hozzájuk szükséges ötletekre összpontosítunk az alábbiakban.

A Nagy Hadronütköztető (LHC, Large Hadron Collider) a svájci Genfben, az Európai Részecskefizikai Laboratóriumban (CERN) működik. Elsősorban protonokat, tehát a hidrogén atommagjait gyorsítja fel a fénysebesség 99,9999991%-ára, ahol a mozgási energiájuk (osztva c^2 -tel) eléri a nyugalmi tömegük 7250-szeresét. A protonok másodpercenként 11245-ször repülnek körbe a föld alatti 27 km hosszú nyalábcsővekben létrehozott vákuumban, két ellentétes irányban. Több mint ezer kis csoportban mozognak, melyek egymástól (legalább) 7,5 méterre követik egymást, csoportonként nagyjából százmilliárd protonnal. Amikor két ilyen protoncsoport egymással szembetalálkozik a gyűrű négy pontján, a nagy kísérleti berendezések középpontjában, akkor lényegében sértetlenül átrepülnek egymáson – kivéve (legfeljebb) néhány tucat protont, amelyek apró méretük (10^{-15} m) ellenére éppen eltalálják egymást, míg a többiek továbbhaladnak. Összességében így milliárdos nagyságrendű proton-proton ütközés történik minden másodpercben, és a kísérletek egyik legnagyobb feladata ezek közül kiválasztani és „lefényképezni” a legérdekesebb 0,0001%-nyi ütközést, amelyeknél a legnagyobb valamilyen felfedezés esélye.

Az egyik ilyen nagy kísérleti berendezés a Nagy Hadronütköztetőnél a CMS (Compact Muon Solenoid), amely egy 100 méterrel a föld alá telepített 14 500 tonnás, 14×21 méter méretű, rendkívül érzékeny detektorrend-



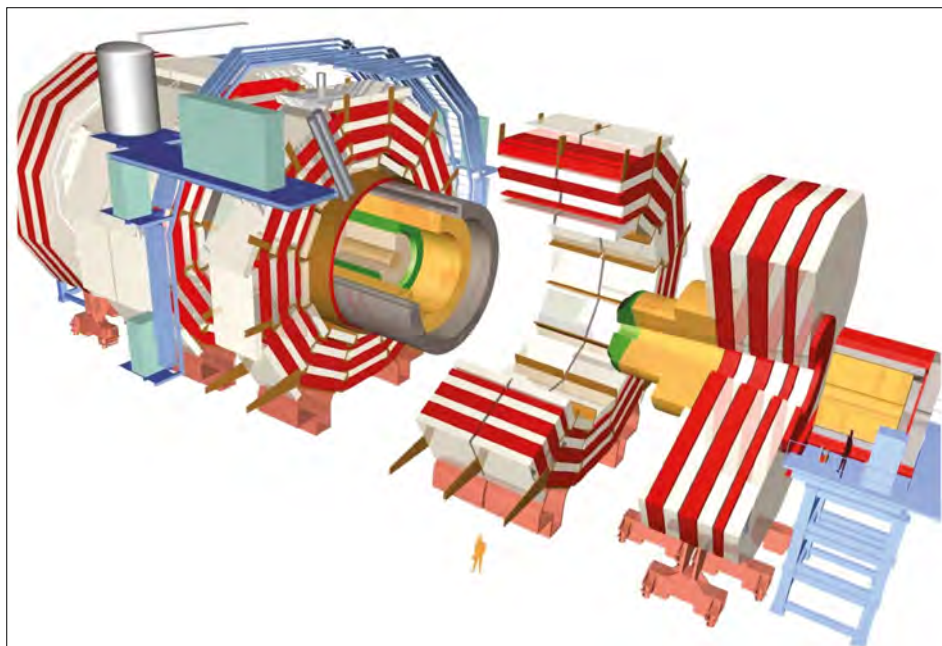
Veres I. Gábor egyetemi tanár, az ELTE TTK Fizikai és Csillagászati Intézetének igazgatóhelyettese. Érdeklődési területei: kísérleti részecskefizika, nehézion-fizika, gamma-spektrometria. Legfontosabb eredményei: kis és nagy atommagok ütközéseinek szisztematikus összehasonlítása, részecskeeloszlások mérése világrekord ütközési energiákon, felfedezések a részecskekorrelációk, illetve a kvark-gluon anyagban történő partonenergiavesztés területén.

szer, melyet az óriási mennyiségű ütközésben keletkezett, elsősorban nagy impulzusú részecskék érzékelésére és mérésére fejlesztett ki a CMS együttműködésben részt vevő több mint 140 egyetem és kutatóintézet, köztük több hazai intézmény. A protonnyaláb körül henger-szimmetrikus eszköz vázlatos rajza az 1. ábrán látható, az áttekinthetőség kedvéért szétnyitott állapotban. Az ütközések a középpontban történnek, a keletkezett részecskék pedig minden irányban áthatolnak a detektorokon. Legfelül található a (világosbarna színnel jelölt) szilícium félvezető detektor, mely a részecskepályák nyomkövetését végzi, azaz rekonstruálja a mágneses térben haladó töltött részecskék (pionok, protonok, kaonok, elektronok stb.) útvonalát, illetve annak görbületéből a részecske kezdeti impulzusának irányát és nagyságát. Kissé távolodva az ütközési ponttól található a (zölddel jelölt) elektromágneses, illetve a (narancssárgával jelzett) hadronikus kaloriméter. Ezekben a detektorokban elnyelődnek az elektromágneses részecskék (fotonok, elektronok és antielektronok), illetve a náluk jóval nagyobb tömegű hadronok. Az elnyelődés során fényfelvillanások keletkeznek a detektorok különleges anyagában, aminek mennyiségét mérve megállapítható az egyes részecskék energiája. Az ezt követő szürke színű henger jelképezi a hatalmas, 3,8 tesla erősségű mágneses teret létrehozó szolenoid szupravezető elektromágne-
A berendezés külső részét a mágnes vasmagja (piros) és a kísérlet névadói, a müondetektorok (szürke) foglalják el. A müon az egyetlen töltött részecske, amely átjut a kalorimétereken, mivel az erős kölcsönhatásban nem vesz részt (az atommagokat ezért alig érzékeli), míg nagy tömege (kis gyorsulása) miatt alig veszít energiát elektromágneses sugárzás révén, miközben elhalad az atommagok közelében. Az ábra jobb szélén, szintén narancssárga színnel jelölve szerepel a magyar közreműködéssel,

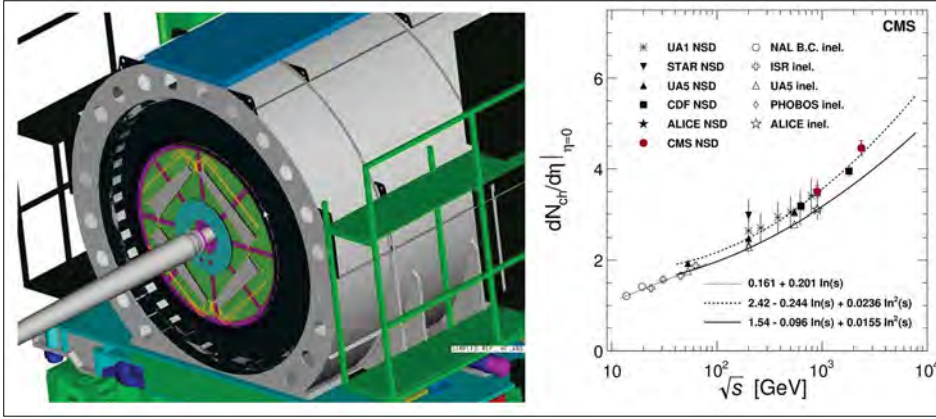
vasból és kvarcszálakból megépült, Cserenkov-sugárzásra alapuló, henger alakú Hadron Forward (HF) kaloriméter, melynek tervezésében és tesztelésében magam is részt vettem, és amelynek feladata a nyalábhoz közel, kis szögben kirepülő részecskék energiájának mérése.

A CMS kísérlet az LHC beindulását felkészülten várta, csakhogy másodpercenként egymilliárd ütközés mérésére tervezték, nem pedig az első órákban tapasztalt, *másodpercenként kevesebb mint egy* ütközésre. Az ilyen ritkán történő, szinte észrevehetetlen, csupán néhány részecskét létrehozó ütközések hatékony érzékelésére nem volt alkalmas. Márpedig ekkorra rendkívül élénk verseny alakult ki a kísérletek között – és a több ezer kutatót tömörítő CMS kísérleten belül is – az első tudományos publikáció mielőbbi elkészítéséért. Ehhez viszont elengedhetetlen volt ennek a hatalmas detektorrendszernek egy apró, de fontos kiegészítése. Ennek érdekében az utolsó pillanatokban javasoltam, hogy egy régebbi (OPAL nevű) kísérletből származó, újrahasznosított szcintillátor érzékelőkből épített, a HF kaloriméter belső (mindkét oldalról az ütközési pont felé néző) felületére helyezett detektorral oldjuk meg az ütközések hatékony detektálását, amint azt a 2. ábra mutatja. Ehhez egy erre alkalmas logikai elektronikai elrendezést is létre kellett hoznunk, és beillesztenünk a CMS eseményválogató (trigger) rendszerébe. A nyalábhoz közeli tartományban elhelyezett, mindkét oldalon egyidőben jelet adó nyalábszcintillátor számlálónk nagy hatásfokkal jelezte, ha a kísérlet középpontjában történő ütközésről volt szó, és ez a jel indította el a félvezető nyomkövető rendszer (egyfajta digitális fényképezőgép) adatkiolvasását, majd az esemény adatainak rögzítését. Az ilyen, számunkra kívánatos események annyira ritkák voltak, hogy gyakoribb volt a CMS kísérletbe érkező protonok ütközése a kísérleten kívüli ultranagy vákuumban maradt atommagok-

kal – az ezekben keletkező részecskéket szintén érzékeltelte a szcintillátor. Ezek kizárása érdekében felhasználtuk a jobb és bal oldalon elhelyezett detektorok jeleinek időkülönbségét, hiszen ezekben a háttéreseményekben ez eltért a zérustól. A detektor harmadik funkcióját pedig azzal a várakozással terveztük és valósítottuk meg, hogy esetleg érdekes jelenségeket figyelhetünk majd meg azokban a ritka proton-proton ütközésekben, amelyek különösen sok más részecskét hoznak létre – ezeket *nagy multiplicitású* eseményeknek hívjuk. A detektor több szegmensének együttes és egyidejű akti-



1. ábra. A Compact Muon Solenoid (CMS) kísérleti berendezés vázlatos rajza

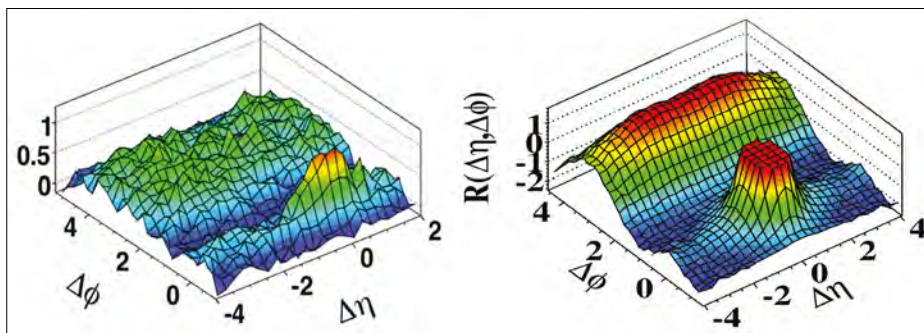


2. ábra. a nyalábszcintillátor számláló (körgyűrű és rombuszok), amely az első ütközéseket érzékelt az LHC CMS detektorában (bal oldal), valamint az első publikációban közölt eredmény a keletkezett részecskék számáról az ütközési energia függvényében (jobb oldal [1])

vitása jelezte ezeket a különleges eseményeket a kísérlet számára.

Az új gyorsító indulásakor az első publikáció előkészítését, mely a keletkezett töltött részecskék számának és szögeloszlásának mérését célozta, már évekkel korábban elkezdtek. Ehhez természetesen az ütközések egyenkénti érzékelése mellett szükséges volt a 66 millió pixelből álló szilícium detektor előzetes kalibrációja, pozicionálása, és a kozmikus eredetű müonokkal történő tesztelése is. A detektor zajszintje alacsonynak ígérkezett, így remélni lehetett, hogy kevés kivétellel csak akkor fog jelet adni, ha valóban áthaladt vékony rétegein egy-egy töltött részecske. A protonnyalábbal együtt haladó müonok és más, az általunk megfigyelt proton-proton ütközésen kívüli kölcsönhatásokban keletkezett részecskék nem a névleges ütközési pontból érkező más alakú és hosszúságú területen keresztelték a henger alakú detektort, ami lehetővé tette a kiszűrésüket. A félvezető detektor két, illetve három rétegét is felhasználva egyszerű, megbízható algoritmusokat teszteltünk, és megmértük a több rétegen is áthaladó részecskék felismerésének és számlálásának hatásfokát, megbízhatóságát, tisztaságát – kezdetben csak szimulációk segítségével.

Az első ütközések jelentették az eltelt évek munkájának, a CMS kísérlet évtizedes műszerfejlesztésének és kis csoportunk munkabírásának igazi megmértetését. Sikertült kollégáinkkal rövid idő alatt elfogadtatnunk a mé-



3. ábra. Kétrészecske-korrelációk arany-arany (bal oldal [3]) és nagy multiplicitású proton-proton (jobb oldal [4]) ütközésekben

résünk három különböző módszerrel elért, egymással egyező eredményeit egy olyan helyzetben, amikor a kollaboráció a legkisebb tévedést sem engedhet meg magának, majd 72 nappal az első ütközések után beküldtük a részecskék szögeloszlásáról szóló publikációnkat. Ennek egyik eredménye látható a 2. ábrán, amely a keletkezett töltött részecskék számának energiafüggését mutatja az új világrekordot jelentő 2,36 TeV tömeg-

középponti energián [1]. Néhány hónappal később az LHC újabb világrekordot állított fel 7 TeV ütközési energiával, és ezekből az adatokból is sikerült az első publikációt néhány fős csoportunknak elkészítenie, hasonló témában [2]. Sikertült a keletkező részecskék számát 4% pontossággal meghatározni, miközben az LHC beindulása előtti fenomenológiai modellek jóslatai legalább 30%-kal eltértek egymástól, és megfigyeltük a részecskeszám váratlanul meredek emelkedését az ütközési energia függvényében. A tudományos érdeklődést már jelzi az erre a két cikkre azóta érkezett 835 független hivatkozás, de emellett a következő fél évben a CMS minden publikációja az említett nyalábszcintillátor számlálót használta az adatok megtisztítására a nemkívánatos nyaláb-gáz ütközésektől.

A CMS kísérlet első igazi felfedezése néhány hónappal ezután, váratlan témában és szerencsés körülmények között született meg. Az foglalkoztatott minket, hogy korábban a Relativisztikus Nehézion-Ütköztetőnél (RHIC, Long Island, USA, PHOBOS kísérlet [3]) az aranyatommagok kölcsönhatásaiban megfigyelt kétrészecske-korrelációk esetleg mutatkoznak-e nagy energiával ütköző protonok esetén is. Láttuk, hogy az LHC energiáján lényegesen több részecskét hoz létre átlagosan egy proton-proton ütközés, de ritka esetben jóval az átlag fölötti számú, több száz részecske is keletkezhet. Ezekben a különleges esetekben reméltünk hasonló korrelációkat felfedezni, mint a nagy atommagok esetén, bár ezt semmilyen komoly érveléssel nem lehetett alátámasztani.

Az aranyatommagok ütközéseiben mért kétrészecske-korreláció [3]. Az ütközésben keletkezett részecskék párpainak azimuttszögben (φ) és polárszögben (η) mért különbségei függvényében ábrázoltuk az ilyen párok

előfordulási valószínűségét, ahol a kétféle szög a szokásos henger-koordináta-rendszerben értendő, a nyalábbal a tengelyében. A kis szögműködéseknél látható csúcs természetes, hiszen a részecskefizikában ismert jelenség, hogy a nagy energiájú gluon- vagy kvarkszóródás során kirepülő kvark vagy gluon nem távozik az ütközési pontból magányosan, hanem több részecske nagyon hasonló irányban repülve, egy részecskesugarat (jetet) alkotva látható. A jet átellenes oldalán, tehát $\Delta\varphi = \pi$ körül az impulzus megmaradása miatt találunk többletrészecskéket. Ez utóbbiak polárszögben elnyújtott struktúrát képeznek, aminek a háttérét az egymással ütköző atommagokban folyó elemi folyamatok – pl. két gluon ütközése – adják, hiszen ezek általában nem rendelkeznek azonos nyalábirányú impulzussal. Ennek az eredménynek az érdekessége tehát a kisebb „hegygerinc” a kis $\Delta\varphi$ -nek megfelelő, polárszögben viszont elnyújtott tartományban. Ennek magyarázata a nehézion ütközése esetén azzal kapcsolatos, hogy ott a viszonylag nagy térfogatú ütközési zónában létrejön egy hagyományosan kvark-gluon plazmának nevezett, de plazma helyett inkább folyadékhoz hasonlóan viselkedő, nagyon intenzíven kölcsönható, minden irányban szétrobbanó anyagcsepp, amely nem hengerszimmetrikus, és a kölcsönhatások miatt a végállapotban megfigyelt részecskék eloszlása sem lesz az. A kétfogású mellett ez a rendszer háromfogású és magasabb rendű aszimmetriákat is mutat, és ezek eredményeképp jelenhet meg ez a korrelációs struktúra.

Felmerülhet tehát a kérdés, hogy ez a fajta kollektív mozgás, összehangolt viselkedés, amelyet a nehézionfizikában ma már természetesnek gondolunk, elképzelhető-e kisebb ütköző atommagoknál, végső esetben proton-proton ütközésekben is. Ez a kérdés jó példa arra a fajta problémára, amelyre a választ elméleti úton aligha lehetséges előre megjósolni, viszont kísérleti vizsgálatára van remény. Az LHC gyorsító első proton-proton ütközéseit vizsgálva gyorsan kiderült, hogy a fenti, „hegygerinc” típusú korrelációk nem láthatóak. Ekkor határoztuk el, hogy megpróbáljuk kiválogatni a proton-proton események közül azokat, amelyek messze az átlagon felüli multiplicitásúak, vagyis nagyon sok részecskét keltettek. Valószínűnek tartottuk, hogy ezekben sem fogunk ilyen korrelációkat látni, de mégis szerettük volna a vizsgálatot elvégezni. Az átlagos ütközések gyűjtéséhez ugyan használtuk a nyálábszcintillátor számlálót, de az igen nagy multiplicitású események válogatásához kifinomultabb módszerre volt szükség: a kaloriméterekben követeltünk meg egy minimális energialeadást, és ezután a részecskenyomokat egyenként rekonstruálva a félvezető detektorban megszámláltuk a részecskéket. Ez az időigényes eljárás a több ezer számítógépen egyszerre futó eseménylválogató algoritmusok teljes számítási igényének mintegy felét elhasználta csak erre az egyetlen, ráadásul bizonytalan kimenetelű célra, mégis sikerült meggyőznünk a CMS kollaborációt, hogy engedélyt kapjunk a mérés végrehajtására.

Ennek eredménye az a meglepő felfedezés lett, amelyet a 3. ábra jobb oldalán láthatunk, tehát hogy csak az igen nagy multiplicitású eseményeket tekintve már a proton-proton ütközésekben is fellép a hegygerinc alakú hosszú távú kétrészecske-korreláció [4]. Ez az eredmény átalakította a nehézion-ütközések és az elemi proton-proton ütközések összehasonlításának értelmezési módszertanát, és paradigmaintéző lett azzal, hogy létrehozott egy rész tudományágat: a kollektív viselkedés jeleinek kutatását kis ütközési rendszerekben. Mindez potenciálisan megkérdőjelezte azt az addigi elképzelést, hogy a kis atommagok ütközéseiben nem várható kvark-gluon anyag kialakulása, és emiatt azok különösebb elővigyázatosság nélkül használhatók viszonyítási alapként a nehézion-ütközések értelmezéséhez. Később nagyon hasonló korrelációkat proton-ólom ütközésekben is kimutattunk. Részletesebb és szisztematikus vizsgálatokból később az is kiderült, hogy a keletkező részecskék azimutiszög-eloszlásának aszimmetriája kis és nagy atommagok ütközéseiben hasonló mértékű, ha *azonos multiplicitású* eseményeket vetünk össze. A RHIC gyorsító ennek a témának szentelt programja során proton-arany, deuteron-arany és hélium-arany atommag-ütközéseket vizsgált annak felderítésére, hogy mivel magyarázható a részecskeeloszlások azimutális aszimmetriája. A kutatások célkeresztjébe kerültek a még elemibb elektron-pozitron, sőt, foton-ólom (ultraperiférikus atommag-atommag) ütközések is. A kérdés, hogy protonok ütközéseire létre tudnak-e hozni egy termalizálódott anyagcseppet, illetve hogy a termalizáció valóban szükséges-e a kísérletben észlelt aszimmetriák magyarázatához, máig aktívan kutatott és vitatott területe az erős kölcsönhatás vizsgálatának.

Összefoglalva, írásomban szerettem volna bemutatni, hogy lényeglátó ötleteket követő céltudatos erőfeszítésekkel szerencsés esetben nagy kollaborációkban is mód van sikeres munkát végezni, akár paradigmaváltó eredményeket elérni. Szerettem volna röviden bemutatni az erős kölcsönhatás kutatása során felmerült néhány érdekes kérdést és a hozzájuk kapcsolódó eredményt, valamint közelebbi bepillantást adni a kísérleti részecskefizikai munkába azzal a nem titkolt szándékkal, hogy az olvasóban is kedvet ébresszek hozzá.

Irodalom

1. CMS Collaboration, Khachatryan V., Sirunyan A. M., et al. (2010): Transverse-momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 2.36 TeV. *J. High Energ. Phys.*, 2010, 41. [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2010\)041](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2010)041)
2. CMS Collaboration, Khachatryan V., et al. (2010): Transverse-momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. *Phys. Rev. Lett.*, 105(2), 022002. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.105.022002>
3. PHOBOS Collaboration, Alver B., et al. (2010): High transverse momentum triggered correlations over a large pseudorapidity acceptance in Au+Au collisions at $[s(NN)]^{1/2} = 200$ GeV. *Phys. Rev. Lett.*, 104, 062301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.062301>
4. CMS Collaboration, Khachatryan V., Sirunyan, A. M., et al. (2010): Observation of long-range, near-side angular correlations in proton-proton collisions at the LHC. *J. High Energ. Phys.*, 2010, 91. [https://doi.org/10.1007/JHEP09\(2010\)091](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2010)091) [665 független idéző]