

Semleges pionok keletkezése nagyenergiás nehézion-ütközésekben a PHENIX kísérletnél

1. Bevezetés

Miből áll a világ? Mi tartja össze? Ezek a kérdések az idők során számtalan nagy gondolkodót foglalkoztattak. Napjainkig a világról alkotott képünk jelentős átalakulásokon ment keresztül. Ma a részecskefizika Standard Modellje szerint a világ elemi „téglákból”, fermionokból áll, amelyeket 4 alapvető kölcsönhatás tart össze: a gravitációs, az elektromágneses, a gyenge és az erős. Bármennyire is különbözőnek tűnnek ezek a kölcsönhatások, vannak arra utaló jelek, hogy bizonyos körülmények között ezeket „egyesíteni” lehet, azaz hatásuk közös matematikai keretbe foglalható. Ez az egyesítés az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatásoknál már megtörtént, így beszélhetünk „elektrogyenge” kölcsönhatásról. Ezzel szemben az erős kölcsönhatás mindeddig ellenállt az egyesítési kísérleteknek, néhány különleges tulajdonságának köszönhetően.

Az erős kölcsönhatás egyik legizgalmasabb tulajdonsága, hogy részecskéit, a kvarkokat és gluonokat soha nem figyelhetjük meg szabad állapotban, csak összetett részecskék, hadronok belsejébe zárva. Ennek oka nem a kísérleti be rendezéseink tökéletlensége, hanem magának az erős kölcsönhatásnak ilyen a természete. Ám az elméleti magfizikusok szerint mégis van rá mód, hogy a kvarkok és gluonok kitorjjenek hadronbörtönükből, még ha nem is egyenként. Ahhoz, hogy a kvarkbezárás megszűnjön, nagyon nagy energiasűrűségnek kell létrejönnie egy viszonylag (részecskeleptékben) nagy térfogatban. Ekkor a hadronikus anyag fázisátalakuláson megy át (a hadronok „megolvadnak”), és a kiszabadult kvarkokból és gluonokból létrejön az anyag új állapota. Ezt a nagyon forró és sűrű közeget kvark-gluon plazmának (az angol rövidítés alapján QGP) nevezzük.

A QGP létezése az erős kölcsönhatás elméletének alapvető kérdése. Ha létezik, remélhetjük, hogy gyorsítóberendezésben előállítva előbb-utóbb tanulmányozhatnánk a tulajdonságait, ezáltal roppantul értékes tudásra tennénk szert az erős kölcsönhatás természetéről.

A QGP előállítása azonban technikailag nagyon nagy kihívás. Létrehozásához nehézionokat kell ütköztetnünk nagyenergiás gyorsítóknak. Annak megér-

tése viszont, hogy mi történik egy ilyen ütközésben, még monumentálisabb feladat. Akár létrejön a QGP, akár nem, az ütközések egyetlen pillanatig tartanak csupán – majd az ütközési pontból ezrével repül ki mindenféle részecske. Ezeket a részecskéket hatalmas detektorrendszerekben felfogjuk, megmérjük tulajdonságaikat, és megpróbáljuk őket oly módon elemezni, amiből kiderülhet, vajon keletkezett-e QGP. Mivel a QGP tulajdonságait nem ismerjük pontosan, legfeljebb feltételezhetjük, milyen megfigyelhető adatok sejtetik a QGP létrejöttét. Ezeket a jeleket a QGP szignatúráinak nevezzük, és a nehézion-kísérletek célja egyértelműen, minél több szignatúrával bebizonyítani vagy cáfolni a QGP létét.

Ez a disszertáció az amerikai Brookhaven Nemzeti Laboratórium Relativisztikus Nehézion-Ütköztetőjén (RHIC) működő PHENIX kísérletnél végzett kutatásokon alapul. A RHIC-et úgy tervezték, hogy nehézionokat tudjon ütköztetni olyan energián, ami lehetővé teszi a QGP keletkezését. A RHIC-re épült detektorok (köztük a PHENIX) célja, hogy minél többféle folyamatot tudjanak mérni és azonosítani, a QGP számos szignatúrája után kutatva.

Ez a dolgozat két olyan analízis részleteit írja le, amelyek a QGP egyik (gyenge) szignatúráját, a semleges pionok deficitjét keresik. De mielőtt a detektorból egyáltalán fizikailag értelmes adatokat kapnánk, annak bonyolult rendszereit gondosan kalibrálni kell; két ilyen kalibrációs munkát is bemutatok itt.

2. Új eredmények

1. **A RHIC működésének második évében elvégeztem az elektromágneses kaloriméter fizikán alapuló időkalibrálását, továbbá a megfelelő PHENIX Technical Note szerkesztőjeként koordináltam a kaloriméter további kalibrálását.**¹

Viszonylag korán felfedeztük, hogy a kaloriméter lézer-alapú monitorozó rendszere nem jól követi a fotoelektronszorzók időben változó paramétereit, így fizikán alapuló kalibrációs módszerekre volt szükség. Az időkalibrációhoz az ütközésekből jövő fotonokból álló mintát használtam. Az időtengely origójának azt az időpontot választottuk, amikor ezeknek a fotonoknak meg kell érkezniük a kaloriméterre. A kalibráció célja a részecskék érkezési idejének olyan elcsúsztatása volt, hogy a fotonok a 0 időpillanatban, a hadronok pedig később érkezzenek meg. Ennek eléréséhez kétlépcsős megközelítést használtam.

- Globális (azaz időfüggetlen) tornyonkénti korrekciók egyenlítik ki az

¹EMCal calibration in preparation for QM2002, PHENIX Technical Note #400, edited by P. Tarján

https://www.phenix.bnl.gov/WWW/p/draft/ptarjan/calib_QM2002

egy csatornák válaszüvege közötti különbségeket (9216 torony a kaloriméter ólomüveg (PbGl) részében, 15552 az ólom-szcintillátor (PbSc) részben, bár voltak kieső csatornák). Ezzel lecsökkentjük a foton érkezési csúcsának szélességét;

- szektoronkénti időfüggő, „követő” korrekciók, amelyek szektoronként csúsztatják a fotoncsúcsot az origóba, és a hosszútávú elkalibrálódást követik és korrigálják.

Ezen korrekciók eredményeképpen a fotoncsúcs rendszerint a $\pm |100 \text{ ps}|$ tartományon belül található, és a szélessége 400 ps vagy kisebb.

2. A RHIC működésének második évében kidolgoztam a kaloriméter minőségbiztosítási (QA) módszereit, és az adatokon elvégeztem a minőségi ellenőrzést.²

A PHENIX minőségbiztosítási munkája két célt szolgált: egyrészt, hogy meggyőződjünk róla, hogy a feldolgozott adatok fizikailag értelmesek és nem torzítják el hibásan viselkedő detektorelemek. Másrészt, az adatminőség felmérésével fel akartuk tárni és korrigálni az esetlegesen megmaradt rossz kalibrációkat.

A QA eredményhisztogramok egy csoportja volt az egyik eszköz, amelynek révén kiderítettük, hogy a kaloriméter szektorainak energiaskálája nem egyezik és hogy az energiaskálákban időbeli ugrások vannak. A nem egyezés abban nyilvánult meg, hogy a minimum ionizáló részecskék látszólag nem ugyanannyi energiát deponáltak a különböző szektorokban, és az értékek bizonyos időpontokban hirtelen megváltoznak. Ennek természetesen nem lehet fizikai oka, tehát a lézeres erősítés-követő rendszert kikapcsoltuk, és minden kalibrációt (egy időintervallumon belül) állandó erősítési tényezőkkel végeztünk el, a QA eredményei alapján.

Az általam írt QA kód az elektromágneses kaloriméter energia- és időmérési teljesítményét is vizsgálta. Az időhisztogramokat szektoronként, az energiahisztogramokat szektorpáronként készítettem el. Az időhisztogramokat viszonylag tiszta fotonmintával töltöttem, az energiahisztogramokat minimum ionizáló részecskékkal. A QA hisztogramok azt mutatták, hogy a W3 szektor súlyos problémákkal küzd rossz minőségű elektronikája miatt; az időmérési teljesítménye különösen rossz volt. Ezért elhatároztuk, hogy a

²Egy példa itt található: EMCAL QA study, 04/19-04/25/2002
<https://www.phenix.bnl.gov/WWW/p/draft/ptarjan/QAstudy>

W3 szektort minden olyan analízisből kizárjuk, ahol az időmérésnek szerepe van.

Miután az imént leírt energiaskála-problémát kiküszöböltük, az energiakalibráció jónak bizonyult. A QA státuszszavakat ezek után az adott időszakbeli időmérési jóság alapján határoztuk meg. Az említett okok miatt a W3 szektor külön státuszértéket kapott annak jelzésére, ha még a szokottnál is problémásabb viselkedést mutatott.

A QA eredmények felhasználásával később elvégeztem az időadatokon egy „utánégető” korrekciót is.

3. Analizáltam a RHIC első $\sqrt{s} = 62,4 \text{ GeV Au} + \text{Au}$ ütközéseit és meghatároztam a semleges pionok spektrumát.³

A semleges pionok kiválogatása az atommag-atommag ütközésekben keletkezett hatalmas számú részecskéből, majd a pionok analízise egyike az anyag viselkedését magas sűrűségeen és hőmérsékleten vizsgáló elegáns analíziseknek. A csoportunk által végzett analízis szinte kizárólag csak az elektromágneses kaloriméterre hagyatkozik.

A semleges pionok túlnyomórészt két fotonra bomlanak ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$) kb. 10^{-16} s élettartammal. A fotonok a csak a töltött részecskéket érzékelő nyomkövető detektorokon detektálatlanul haladnak át, és a kaloriméterbe érkezvén teljes energiájuk elnyelődik. Ahhoz, hogy az anya-pion tulajdonságait rekonstruálhassuk, a fotonpárok tagjainak irányát és energiáját össze kell párosítani. Mivel azt nem tudjuk, melyik foton melyikhez tartozott, az egyedi pionok rekonstruálása lehetetlen feladat.

Lehetséges viszont statisztikai alapon megfigyeléseket tenni a pionokról. Ezt a *kombinációs módszerrel* lehet megtenni, amely a következőképpen működik. Néhány laza vágással kiválasztjuk a potenciális fotonokat; ezután ezek mindegyikét összekombináljuk minden másikkal. Feltételezzük, hogy a pár ugyanabból a pionból származik, kiszámoljuk a képzeletbeli anyarészecske invariáns tömegét és impulzusát. Az invariáns tömegek eloszlása nagy háttérrel ad a helytelen kombinációk miatt. A helyes kombinációk viszont a pion tömege körüli invariáns tömeget fognak eredményezni, tehát a háttérre ráül egy csúcs $\approx 135 \text{ GeV}/c^2$ -nél. Ezen csúcs integrálja megadja az adott vágási feltételek mellett detektált semleges pionok számát; ebből pedig kiszámolható a folyamat hozama. Spektrumokat úgy kapunk,

³Neutral Pion Spectra Measured with the EMCal in 62.4 GeV Au+Au Collisions, PHENIX Analysis Note #292, edited by P. Tarján
<https://www.phenix.bnl.gov/phenix/WWW/p/info/an/292/>

hogy a hozamokat a p_T transzverzális impulzus függvényében ábrázoljuk. A nehézion-ütközésbeli hozamok erősen függenek az ütközés centrálisságától (centralitásától). Az ördög az ilyen analíziseknél is a részletekben lakozik: az eseményselekcióban, vágásokban, a hozamok meghatározásában, akceptancia- és hatásfok-számolásokban és a szisztematikus hibák becslésében.

Az ütközésbeli folyamatok részecskehozamot módosító hatásának jellemzésére az R_{AA} -val jelölt nuklárius modifikációs tényezőt használjuk. Az R_{AA} , definíciója szerint, a nehézion-ütközésbeli és a $p + p$ -ütközésbeli keletkezési hatáskeresztmetszetek hányadosa, skálázva az elvi nukleon-nukleon-ütközések számával a nehézion-ütközésekben (N_{coll}):

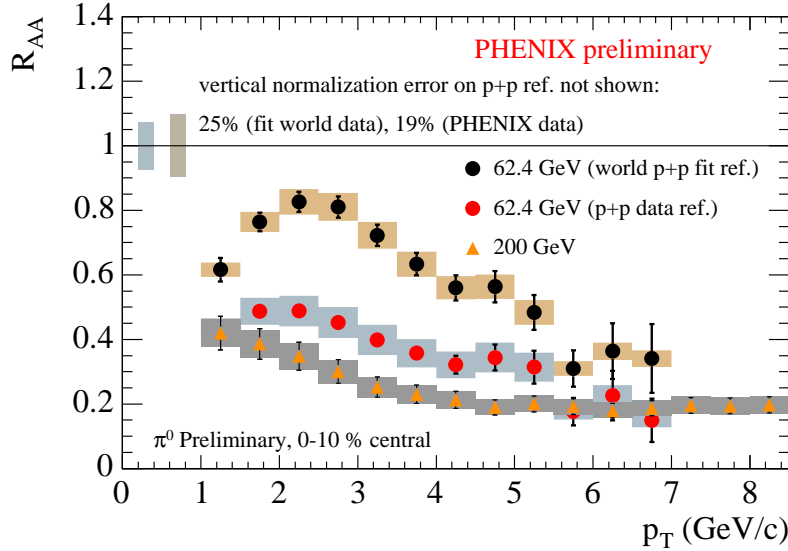
$$R_{AA} = \frac{\text{Hozam A + A ütközésekben}}{\text{Hozam p + p ütközésekben}} \cdot \frac{1}{N_{\text{coll}}},$$

amely a hadronrapiditás, y és a transzverzális impulzus, p_T függvénye. Ha R_{AA} értéke szignifikánsan különbözik 1-től, az arra utal, hogy a nehézion-ütközésekben végbemenő folyamatoknak jelentős hatása van a részecskék keletkezésére.

A spektrumok legcentrálisabb eseményosztályából származtatott R_{AA} -t mutatja az 1. ábra. Munkánk idején a PHENIX 62,4 GeV-en gyűjtött $p + p$ adatokkal még nem rendelkezett, így viszonyítási alapként az ISR gyorsító korábbi eredményeit használtuk. Később, amikor a PHENIX is gyűjtött adatokat ilyen energiájú $p + p$ ütközésekben, az R_{AA} -t újraszámoltuk az új viszonyítási alappal. Kiderült, hogy a mi referenciaspektrumunk kb. 70%-kal magasabban van, mint a CERN-i ISR adatokra illesztett görbe. A PHENIX adatainak 19%, az ISR adatainak 25% normálási bizonytalansága van, de az eltérés így is nagyobb, mint amit ezek a hibák megnyugtatóan megmagyaráznának. Az eltérésre máig nincs magyarázat; van azonban egy erős érv a PHENIX-es eredmény jósága mellett: a $p + p$ adatokat ugyanabban a kísérletben, ugyanazzal a detektorral, nagyon hasonló analízissel mértük, mint az $Au + Au$ ütközésbelieket. Ez azt jelenti, hogy az R_{AA} hányados képzésekor a szisztematikus hibák jó része kiejti egymást.

A referenciaspektrum megválasztásától függetlenül elmondható, hogy a π^0 -hozamok centrális $Au + Au$ ütközésekben alacsonyabbak, mint az N_{coll} -al skálázott hozamok $p + p$ ütközésekben mindkét energián. A hozam „deficitje” növekvő p_T -vel nő, majd állandósul. Az $1/R_{AA}$ deficit tényező értéke a legmagasabb transzverzális impulzusoknál 4 és 5 közötti. A centrálisabb eseményekben a deficit nagyobb.

Erre a deficitre az egyik magyarázat az lehet, hogy az ütközésben forró és sűrű közeg alakult ki, amely lelassítja és/vagy elnyeli a kifelé repülő



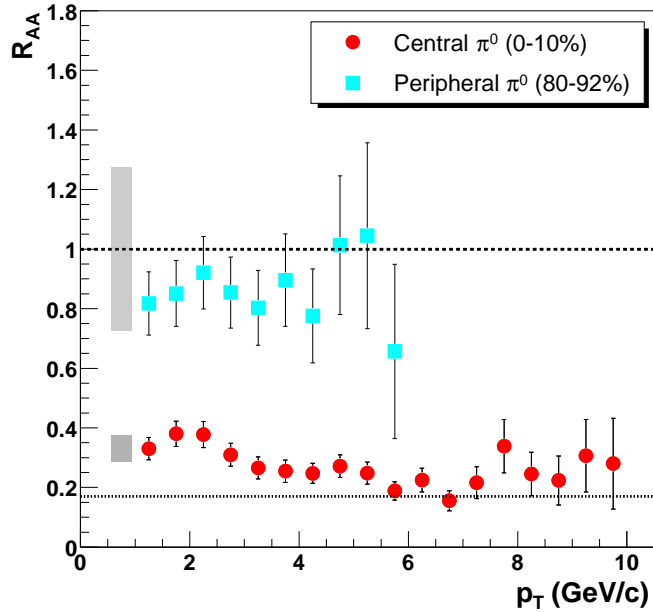
1. ábra. A (nukleonpáronként) 62,4 GeV-es centrális (0-10%) Au + Au ütközésekben keletkezett semleges pionok nukleáris modifikációs tényezői. Az R_{AA} nevezője a CERN-i ISR gyorsítónál (fekete) illetve a PHENIX-nél (piros), p + p ütközésekben mért pionspektrumokból származik. Összehasonlításképpen a 200 GeV-es eredmény is fel van tüntetve. A szokásos módon jelölt hibahatárok a pontonkénti statisztikus hibákat jelzik; a szürke sáv a szisztematikus hibákat, amelyek az összes pontot együtt felfelé vagy lefelé mozdíthatják.

partonokat. Ez a jelenség a *jetkioltás* (jet quenching). Az itt bemutatott eredmény azonban nem elegendő annak eldöntésére, hogy a részecskék a forró végállapotban vagy a „hideg” kezdeti állapotban, a maganyagban veszítenek-e energiát.

4. Analizáltam a RHIC $\sqrt{s} = 200$ GeV Au + Au ütközéseit és meghatároztam a semleges pionok spektrumát.⁴

A csoportunk által elvégzett mérés elve lényegében megegyezik a fentebb leírttal, de a részletekben természetesen vannak eltérések.

⁴Neutral Pion Measurement in the PbSc Calorimeter in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, PHENIX Analysis Note #166
<https://www.phenix.bnl.gov/phenix/WWW/p/info/an/166/>



2. ábra. A (nukleonpáronként) 200 GeV-es centrális és periférikus Au+Au ütközésekben keletkezett semleges pionok nukleáris modifikációs tényezői. Az R_{AA} nevezője a RHIC szintén 200 GeV-es p+p ütközéseiben a PHENIX-nél mért pionspektrumokból származik. A szokásos módon jelölt hibahatárok a pontonkénti statisztikus hibákat jelzik; a szürke sáv a szisztematikus hibákat, amelyek az összes pontot együtt felfelé vagy lefelé mozdíthatják.

A 2. ábra a p_T függvényében ábrázolt R_{AA} -t mutatja, a legcentrálisabb (0 – 10%) és a legperiférikusabb (80 – 92%) eseményekre. A periférikus események nukleáris modifikációs tényezője 1-gyel konzisztens, azaz a periférikus események nukleon-nukleon ütközések inkoherens szuperpozíciójaként viselkednek (nem alakul ki elnyelő közeg). A centrális eseményekre vonatkozó R_{AA} szignifikánsan kisebb, mint 1, ellentétben a CERN-i SPS-nél mért korábbi eredményekkel (Cronin-effektus). A deficit a periférikus eseményektől a centrálisok felé haladva fokozatosan nő. A semleges pionok deficitje 2 GeV/c körül a legkisebb és közelítőleg konstans nagyobb transzverzális impulzusoknál. Az $1/R_{AA}$ deficittényező 4 és 5 közötti; az R_{AA} értéke $\approx 30\%$ -kal magasabb, mint az várható lenne a ütközésekben részt vevő nukleonok száma (N_{part}) szerinti skálázásból (pontosított vonal a 2. ábrán).

Léteznek olyan – sűrű, partonikus közegbeli energiaveszteségen alapuló –

jet-kioltási számítások, amelyek reprodukálni tudják a bemutatott π^0 -deficitet. Ez azonban önmagában nem zárja ki azt, hogy a deficit nem egy végállapot, hanem egy kezdeti állapot effektus eredménye. Ennek ellenőrzésére a következő évben a RHIC végzett nagy energiás d + Au ütköztetéseket is. Ezekben az eseményekben – a deuteron kis mérete miatt – nem alakulhat ki a sűrű partonikus anyagból álló közeg (QGP). Az ilyen ütközésekből származó pionok nukleáris modifikációs tényezője nem mutatja a fenti deficitet, tehát az valóban egy végállapot közeg által okozott effektus.

3. Az eredmények alkalmazása

Az elektromágneses kaloriméter precíz kalibrálása nem csak a mi analízisünket, hanem a PHENIX-es analízisek nagy részét is szolgálta. Ily módon az itt ismertetett kalibrációs és minőségbiztosítási eredmények (és az azokat követő, hasonló kalibrációk) azonnal hasznosultak. Később én és mások továbbfejlesztettük a saját kalibrációs módszereinket, ami után a kaloriméter jónéhány paramétere, helyes működése ellenőrizhetővé és kalibrálhatóvá vált online módon, majdnem teljesen automatizálva.

A korábban felsoroltakon kívül az alábbi belső cikkek mutatják a kalibrációs munkám továbbfejlesztésének irányát és eredményeit:

<https://www.phenix.bnl.gov/WWW/p/draft/ptarjan/EmcTofAfterBurner/>

https://www.phenix.bnl.gov/WWW/p/draft/ptarjan/timing/EMC_timing_calib_run3.pdf

A 200 GeV-es π^0 -analízisből írt cikkünk:

„Suppressed π^0 Production at Large Transverse Momentum in Central Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV”

the PHENIX collaboration

Phys. Rev. Lett. 91, 072301 (2003), 2003-08-13

(a preprint archívumban is elérhető: nucl-ex/0304022).

A 62,4 GeV-es analízis eredménye azt mutatja, hogy a részecskehozambeli deficit (a RHIC számára) viszonylag alacsony energián is bekövetkezik. Ez jelentősen megnövelte az érdeklődést a RHIC későbbi alacsony energiás ütközései és az azokból származó adatokon végzett kutatások iránt.

Néhány, konferenciákon bemutatott eredmény:

Poszter: New results from the PHENIX experiment at RHIC (NPDC 17 konferencia)

Poszter és cikk: Physics analysis with the PHENIX electromagnetic calorimeter (2004 IEEE-NSS konferencia)

A következő cikkekben szintén volt hozzájárulásom: „Absence of Suppression in Particle Production at Large Transverse Momentum in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV

d+Au Collisions”

the PHENIX collaboration

Phys. Rev. Lett. 91, 072303 (2003) , 2003-08-15

(a preprint archívumban is elérhető: nucl-ex/0306021)

„Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration”

Nuclear Physics A Volume 757, Issues 1-2, 8 August 2005, Pages 184-283

(a preprint archívumban is elérhető: nucl-ex/0410003)