

Nukleáris modifikáció 17.3 GeV nukleononkénti tömegközépponti energián, a CERN-NA49 kísérletben

Doktori értekezés tézispontjai

László András

KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest

laszloa@rmki.kfki.hu

2007 November

Fizika Doktori Iskola (Vezető: Dr. Horváth Zalán),
Részecskefizika és Csillagászat Program (Vezető: Dr. Csikor Ferenc),
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

Témavezető: Dr. Vesztergombi György

1. Bevezetés

A Kvantum Színdinamika (QCD) az elemi részecskék Standard Modelljének része, amely jelenlegi tudásunk szerint az elemi részecskék közötti kölcsönhatásokat nagy pontossággal leírja. A QCD a Standard Modell részecskéi közötti ‘erős kölcsönhatást’ implementálja. A hadronikus részecskék közötti kölcsönhatás ennek folyománya. A QCD egyik fontos tulajdonsága az aszimptotikus szabadság, mely szerint az effektív csatolási állandó az elemi impulzusátadás növekedésével csökken. Nagy impulzusátadásoknál a lecsökkent effektív csatolási állandó szerint sorfejtés végezhető, ezáltal a QCD jóságotok perturbatív számolhatóvá válnak. Kis impulzusátadásoknál azonban ez a megközelítés a nagy csatolási állandó miatt nem működik, más stratégiához kell folyamodni. Az egyik lehetséges stratégia a fenomenológikus modellek alkalmazása, amelyek az eredő impulzus és töltéscsere legfontosabb aspektusait próbálják megragadni. A fenomenológikus modellek többnyire nem származtathatóak közvetlenül a QCD alapelveiből. Léteznek emellett téridő-rácson végzett numerikus számítások, amelyek a QCD Feynman-integráljának numerikus számolásán alapulnak. Ezek egy fázisátalakulást jósolnak: kellően magas hőmérsékleten a kvark-gluon plazma fázis létrejötte következik a modellből. Ennek kimutatását célozzák a nagy-energiás nehéz-ion fizikai kísérletek. A kvark-gluon plazma létrejöttére több fontos jellemző megváltozásából következtethetünk, amelyek a hadronikus viselkedéstől való eltérésre utalnak.

A bookhaveni RHIC gyorsítónál épült kísérleteknél 200 GeV nukleon-nukleon ütközési energia mellett ($\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$) érdekes jelenségre figyeltek fel: centrális mag-mag ütközésekben a részecskehozamok az elemi ütközésekhez képest (periferális mag-mag, deuteron-mag vagy proton-proton) relatíve kevésnek adódtak, nagy transzverz impulzusok esetén.¹ Ezt nevezik a nagy transzverz impulzusú részecskék elnyomódásának. Az jelenség felfedezése után ezt a kvark-gluon plazma keletkezésére utaló jelként interpretálták: arra utalhat, hogy a keletkezett nagy transzverz impulzusú partonok lefékeződnek az erősen kölcsönható plazmában a hadronná való fragmentálódás előtt.

Természetes módon vetődik fel a kérdés: ha az ütközési energiát jelentősen lecsökkentjük, tapasztaljuk-e eme elnyomási jelenség hirtelen megszűnését? Ha erre a kérdésre választ kívánunk adni, akkor olyan kísérletet kell keresnünk, amelynek elegendő statisztikájú alacsony-energiás adat áll rendelkezésére, továbbá a részecskéket azonosítani tudja. Ez utóbbi azért lényeges,

¹Amennyiben feltételezzük, hogy a keltett részecskék száma a bináris ütközésekkel skálázik. Ezt a partonikus kép jósolná: feltételezi, hogy a részecskék a bináris parton-parton ütközésekben keletkeznek.

mert a RHIC kísérleteknél végzett finomabb vizsgálat szerint az elnyomás erősen függ a részecske típusától; a produktions spektrum részecske-kompozíciója azonban alacsonyabb energiákon jelentősen eltér a 200 GeV energián tapasztalhatótól.

A kívánt vizsgálat szempontjából természetes választás esik a CERN-beli NA49 kísérletre, amely lényegében egy nagy akceptanciájú hadron-spektrométer. Az NA49 kísérlet rendelkezik megfelelően nagy statisztikájú alacsony energiás ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV) proton-proton, proton-mag és mag-mag adatokkal, spektrum szintű részecskeazonosítással, továbbá nagy akceptanciával és rekonstrukciós határfokkal.

A kérdés iránti tudományos érdeklődést jól mutatja, hogy a CERN jelenlegi legfiatalabb kísérlete, az NA61, az NA49 továbbfejlesztéseként ez évtől kezdett adatokat felvenni és fogja folytatni méréseit a következő években. Az NA61 kísérlet fő motivációi között a nagy transzverz impulzusú részecske elnyomódás energiafüggésének pontosabb tanulmányozása is szerepel [6, 7, 8, 12], mely többek között a szerző NA49 kísérletben végzett kutatási munkájának folyománya.

A dolgozatnak két fő motivációja van.

- Az NA49 kísérlet adatai segítségével precíziós azonosított egyrészecske hadronspektrumokkal tudunk szolgálni alacsony energián ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV) és nagy transzverz impulzusoknál (kb 4.5 GeV/c-ig), proton-proton, proton-mag és mag-mag ütközésekben. Ez azért lényeges, mert ezt a kinematikai tartományt gyakorlatilag nem fedik le a régebbi kísérletek.
- Az NA49 kísérlet adatainak segítségével meghatározni a nukleáris modifikáció mértékét $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV energián, részecsketípustól függően, nagy transzverz impulzusoknál (kb 2–4.5 GeV/c-en). A 200 GeV energián felvett RHIC adatokkal összehasonlítva megállapítható volna, hogy a nukleáris modifikáció jellege hirtelen megváltozik-e, vagyis az ütközési energia csökkenésével hirtelen megszűnik-e a nagy transzverz impulzusú részecskék elnyomódása.

2. Célkitűzések

A jelen kísérleti munka jelentős célja, hogy a részecskeproduktions mechanizmusokra vonatkozó tudásunkat kibővítse a kérdéses kinematikai tartományon.

Ebből az egyik legfontosabb a töltött hadronok egyrészecske produktions

spektrumának nagy-pontosságú meghatározása eme gyengén lefedett kinematikai tartományon, de különösen a nagy transzverz impulzusok esetében ($2 \text{ GeV}/c$ fölött). A vizsgálni kívánt reakciók az inelasztikus mag-mag, proton-mag és proton-proton ütközésekbeli inkluzív részecskekeltések (azonosított végállapoti részecskével). A célul kitűzött kísérleti pontosság ($\approx 5\%$) megköveteli az adatfeldolgozási, kalibrációs, vágási és korrekciós procedúrák igen precíz kezelését.

További kitűzött cél az inkluzív semleges pion impulzusspektrumok meghatározása, melyhez egy funkcionálanalízisbeli / valószínűségi számításbeli matematikai probléma megoldása vált szükségessé. Bár a kísérleti statisztika végülis nem bizonyult elegendőnek eme π^0 spektrum mérés kivitelezéséhez nagy transzverz impulzusok esetében, azonban a kifejlesztett jelfeldolgozási módszernek számos potenciális alkalmazási területe van.

A dolgozat motivációinak megfelelően tárgyalom a mért részecskeprodukciós spektrumok tulajdonságait, különös tekintettel a nukleáris modifikációra és a nagy transzverz impulzusú részecskék elnyomódásának energiafüggésére.

3. Alkalmazott módszerek

A dolgozatban részletesen tárgyalom azon módszereket, amelyeket célzottan fejlesztettem az azonosított töltött hadronok spektrumának mérésére nagy transzverz impulzusok esetében.

Az NA49 egy fix-céltárgyas kísérlet az SPS gyorsító egyik nyalábkivezetésénél. A töltött részecskék detektálása az NA49 kísérletben négy nagy térfogatú Időprojekciós Kamrában (TPC) történik, amelyek a kísérlet dipól mágneseinek terében elhajolt részecske-röppályákat 3 dimenzióban rögzítik. Utólagos feldolgozás lehetővé teszi a görbületből való impulzus és töltés rekonstrukciót. A TPC kamrákban hagyott jel nagysága pedig a részecske fajlagos ionizációjára jellemző. Ez utóbbi csak a részecske sebességétől függ, ezáltal a töltés és impulzus ismeretében meghatározható a részecske tömege, és így a típusa is.

Mag-mag ütközésekben a fix-céltárgyas felépítésből eredően a lövedék mag kölcsönhatásban részt nem vevő darabja (spektátor anyag) kísérletileg teljes egészében hozzáférhető, miután torzítatlanul tovább repül. A spektátor anyag nyalábhöz viszonyított energiáját egy Veto Calorimeternek nevezett berendezés méri, amely lehetővé teszi a mag-mag ütközés centralitásának meghatározását (minél kisebb a spektátor energia, annál centrálisabb volt az ütközés, ugyanis a spektátor energiahányad megegyezik a spektátor térfogathányaddal). A kísérletek során a Veto Calorimeter azonban a nagy

sugárzási igénybevétel miatt fokozatosan degradálódott. Miután a kísérleti eredmények erre érzékenyek, kifejlesztettem ezen effektus korrigálására egy kalibrációs módszert, amely a Veto Calorimeter válasz és a detektált részecskeszám korrelációjának időfüggetlenségén alapul. Kidolgoztam továbbá egy abszolút kalibrációs eljárást, amely után a Veto Calorimeter válaszai közvetlenül összevethetők Glauber számolások eredményeivel, így az ütközések geometriai jellemzői jól meghatározhatóvá válnak.

A fix-céltárgyas felépítésből következően a keletkezett részecskék nagy része előre fókuszálódik. Ez a TPC térfogatokban nagy pálya-sűrűséget és ezáltal romló rekonstrukciós hatásfokot illetve növekvő hamis-pálya hozamot idéz elő. Ez utóbbi különösen komoly problémát okoz nagy transzverz impulzusoknál, ahol kevés részecske keletkezik, így a jel teljesen elvész a nagy hamis-pálya háttérben (több 1000% zaj/jel viszony). Ez egy megoldatlan probléma volt a kísérletben, ami miatt a nagy transzverz impulzus tartomány ($> 2 \text{ GeV}/c$) nem volt hozzáférhető. Munkám kulcs lépése ezen problémák feltérképezése és egy olyan röppálya válogatási kritérium kidolgozása volt, amely ezt a problémát kezeli. A megoldás a nem folytonos röppályák kizárása és egy szigorú, optimalizált 3 dimenziós impulzustér-vágás volt. A kifejlesztett eljárás után a hamis-pálya hozam ezrelék nagyságrendűre süllyedt a teljes lefedett impulzustérben, míg a rekonstrukciós hatásfok jóval 90% fölött maradt még a nagy pálya-sűrűségű centrális ólom-ólom ütközésekben is. A módszer előnye, hogy az elfogadott akceptancia direkt módon kontrollálható, tehát az akceptancia-korrekció Monte Carlo-mentesen végezhető.

A töltött hadronok mérése mellett a semleges hadronok, például a semleges pionok impulzus-eloszlásának mérése is érdekes. Az NA49 kísérlet a π^0 részecskéket csak a gamma fotonok céltárgyban való konverziója útján tudja mérni, ami a detektálható π^0 hozamot a konverziós valószínűség négyzetével csökkenti, ezáltal jelentősen rontva a statisztikát. Ezért kifejlesztettem egy indirekt módszert, amely a semleges pionok impulzus-eloszlását a gamma fotonok impulzus-eloszlásából állítja vissza, amely csupán a konverziós valószínűség első hatványával rontja a statisztikát. Ehhez egy matematikai probléma megoldása, egy valószínűségi keverési operátor invertálása válik szükségessé. Eme funkcionálanalízisbeli / valószínűségszámításbeli problémára kidolgoztam egy iteratív eljárást, amelynek konvergenciáját bizonyos esetekben analitikusan is bebizonyítottam, továbbá a konvergencia bármely kívánt esetben numerikusan tesztelhető.

4. Tézispontok

A dolgozatban közölt saját eredményeket az alábbi pontokban foglalom össze.

1. **A Veto Calorimeter kalibrációja.** Eljárást dolgoztam ki a Veto Calorimeter időbeli degradációjának korrigálására, amely a spektátor energia és a detektált részecskeszám korrelációjának abszolút voltán alapul [11]. Továbbá a pontos abszolút kalibrációra is kidolgoztam egy módszert, és kimutattam, hogy a Glauber-modellen alapuló VENUS szimuláció a mért spektátor energiával jó egyezésben van. Emiatt a fizikai érveléseknél használatos, a centralitással kapcsolatos mennyiségek szisztematikus hibái elegendően alacsonnyá válnak [10]. Az eredményt sok NA49 publikáció felhasználta, többek között [1, 5, 6, 7, 8, 12].
2. **Nagy transzverz impulzusú részecskék rekonstrukciója.** Az NA49 kísérletben a 2 GeV/c transzverz impulzus fölötti részecskék nem rekonstruálódtak tökéletesen: kihívást jelentettek a rekonstrukciós veszteségek illetve a sok tévesen rekonstruált részecske miatti háttér. Erre a problémára megoldást találtam, mely a nem folytonos pályák kizárásán és egy szigorú, optimalizált 3 dimenziós impulzustér vágáson alapul [9]. Ez a dolgozat egyik kulcs lépése, gyakorlatilag az összes publikációm felhasználja [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 15, 16], mely után a részecskeprodukción mérhető a kísérlet statisztikai határáig (4.5 GeV/c transzverz impulzusig, centrális Pb+Pb esetén).
3. **Azonosított töltött hadron spektrumok meghatározása.** Finomhangolt korrekciós eljárásokat dolgoztam ki a nyers π^\pm , p , \bar{p} , K^\pm spektrumok különböző effektusokra való korrigálására, melyek után az említett részecskék inkluzív produkciós transzverz impulzus spektruma nulla rapiditás körül elérhetővé válik p+p, p+Pb és Pb+Pb reakciókban, $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV tömegközépponti energián [9]. A teljesen korrigált eredmények, melyek kb 5% pontosságúak, az [1] kísérleti cikkben kerültek publikálásra.
4. **Semleges pion spektrum meghatározása.** Az inkluzív π^0 spektrum meghatározására egy indirekt módszert dolgoztam ki, amely valószínűségi keverési operátorok invertálásán alapul. Ezen általános valószínűségszámításbeli / funkcionálanalízisbeli probléma megoldására kidolgoztam egy robusztus iteratív matematikai módszert, melyre bizonyos esetekben a konvergenciát analitikusan bizonyítottam. Erre vonatkozó eredményeimet a [2] matematikai cikkben publikáltam. To-

vábbbá a [14] előadásomban felhívtam a figyelmet a nagy-energiás kalorimetrikus mérések problémájára: bár az energiafelbontás ebben a határesetben ideálissá válik, a meredek spektrumokat a kaloriméter mégis torzítja, melyre azonban a [2] cikkben közölt módszer megoldást kínál. Megvizsgáltam továbbá a nem ideális impulzusfelbontás hatását a nagy transzverz impulzusú töltött részecske analízisemben is, amely jelentős potenciális szisztematikus hibaforrás lehet meredek spektrumok esetén, azonban a becsült hiba kisebbnek bizonyult az egyéb szisztematikus hibáknál.

5. **Kollektív viselkedés alacsony transzverz impulzusnál.** Kimutattam, hogy a részecskeprodukció a kis transzverz impulzus tartományban ($< 1.5 \text{ GeV}/c$) jól reprodukálható a lökeshullám-képpel [3, 13, 15], amely termikus jellegű részecske-emissziót feltételez egy cilindrikusan táguló forrásból. Nagy transzverz impulzusnál azonban ez a kinematikai kép túl nagy barion/mezon arányt jósol, amely rámutat a kollektív mozgás csökkent szerepére nagy transzverz impulzusok esetében.
6. **Perturbatív QCD közelítés alkalmazhatóságának vizsgálata nagy transzverz impulzusú részecskék produkciójára.** A keltett-barion/mezon arányok meghatározása után az eredményeket összevettem perturbatív QCD jóslatokkal [3, 13, 15]. Az összehasonlítás arra enged következtetni, hogy $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$ energián még a kb $4 \text{ GeV}/c$ transzverz impulzusú részecskék sem tisztán perturbatív úton keletkeznek, mert a perturbatív QCD modell nagyon eltérő barion/mezon arányt jósol. A kísérleti eredményeket a $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ energián felvett RHIC eredményekkel összevetve azt tapasztaltam, hogy a nettó-barion/mezon arány egy centralitástól nem függő energia és transzverz impulzusbeli faktorizációt mutat.
7. **Nagy transzverz impulzusú részecskék elnyomódásának energiafüggése.** A perturbatív QCD jóslatok a mért nukleáris modifikációs faktorokat kvalitatíve jól visszaadják. Kísérleti eredményeimet a $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ energián felvett RHIC eredményekkel összevetve azt tapasztaltam, hogy a RHIC energián mérhető centrális / periferális elnyomás nem csökken le ugrásszerűen a $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$ energia felé, épp ellenkezőleg: a mért modifikációs görbék igen hasonlóak a két nagyon különböző energián [1], bár a töltött pion elnyomás mértéke kisebb az alacsonyabb energiás esetben.

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

- [1] A. László *et al.* (the NA49 Collaboration):
„High Transverse Momentum Hadron Spectra at $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV, in Pb+Pb and p+p Collisions”;
Physical Review **C77** (2008) 034906.
- [2] A. László:
„A Robust Iterative Unfolding Method for Signal Processing”;
Journal of Physics **A39** (2006) 13621.
- [3] A. László *et al.* (the NA49 Collaboration):
„High $p(T)$ Spectra of Identified Particles Produced in Pb Plus Pb Collisions at 158 GeV/nucleon Beam Energy”;
Nuclear Physics **A774** (2006) 473.
- [4] T. Schuster, A. László *et al.* (the NA49 Collaboration):
„High $p(T)$ Spectra of Identified Particles Produced in Pb+Pb Collisions at 158 A GeV Beam Energy”;
Journal of Physics **G32** (2006) S479.
- [5] A. László *et al.* (the NA49 Collaboration):
„New Results and Perspectives on R_{AA} Measurements Below 20 GeV CM-energy at Fixed Target Machines”;
International Journal of Modern Physics **E16** (2007) 2516.

A tézispontokhoz kapcsolódó cikkek és előadások

- [6] A. László *et al.* (the NA61 Collaboration):
„Study of Hadron Production in Collisions of Protons and Nuclei at the CERN SPS”;
NA49-future Letter of Intent (2006), 2.2 és 4.2. fejezetek [CERN-SPSC-2006-001, SPSC-I-235].
- [7] A. László *et al.* (the NA61 collaboration):
„Study of Hadron Production in Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions at the CERN SPS”;
NA49-future Proposal (2006), 2.2, 3.5.3 és 4.2. fejezetek [CERN-SPSC-2006-034, SPSC-P-330].

- [8] A. László *et al.* (the NA61 Collaboration):
 „Additional Information Requested in the Proposal Review Process”;
 Addendum to the NA49-future Proposal (2007), 8. fejezet
 [CERN-SPSC-2007-004, SPSC-P-330].
- [9] A. László:
 „High Transverse Momentum Identified Charged Particle Yields in
 158 GeV/nucleon Pb+Pb Collisions”;
 NA49 Technical Note (2007).
- [10] A. László:
 „Calculating Mean Values of Collision Parameters as a Function of Cent-
 rality”;
 NA49 Technical Note (2007).
- [11] A. László:
 „Time-dependence Calibration of the Veto Calorimeter”;
 NA49 Technical Note (2006).
- [12] A. László (for the NA61 Collaboration):
 „NA61/SHINE at the CERN SPS”;
 Meghívott előadás a Critical Point and Onset of Deconfinement konfe-
 rencián (Darmstadt, 2007);
 Proceedings of Science **CPOD07** (2007) 054.
- [13] A. László:
 „High p_T Spectra of Identified Particles Produced in Pb+Pb Collisions
 at $\sqrt{s} = 17.3$ GeV/nucleon”;
 Meghívott előadás a Heavy Ion Forum-on (CERN, 2006).
- [14] A. László:
 „Deconvolution of Noisy Data”;
 Előadás a Zimányi Winter School-on (Budapest, 2006).
- [15] A. László:
 „High p_T Spectra of Identified Particles Produced in Pb+Pb Collisions
 at 158 GeV/nucleon Beam Energy”;
 Előadás a RHIC Winter School-on (Budapest, 2005).
- [16] László András:
 „Nagy transzverz impulzusú azonosított töltött részecskék
 17.3GeV/nukleon tömegközépponti energián”;
 Előadás a Magfizikus Találkozón (Jávorkút, 2006).