

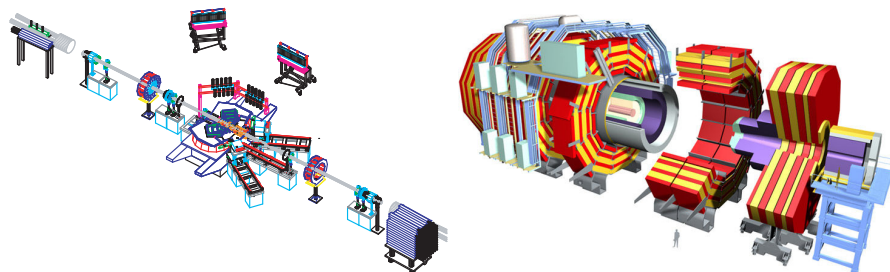
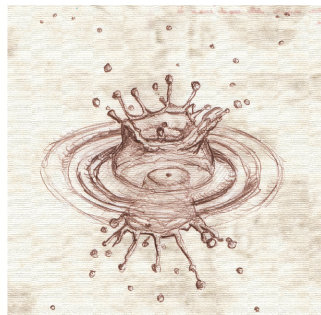
dc_152_11

Az erős kölcsönhatás kísérleti vizsgálata elemi részecskék és nehéz atommagok ütközéseinek összehasonlításával

MTA Doktori Értekezés Tézisei

Veres I. Gábor

*Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest
Fizikai Intézet, Atomfizikai Tanszék*



Magyar Tudományos Akadémia
XI. Fizikai Tudományok Osztálya
Budapest, 2011. szeptember

dc_152_11

1. A kutatások előzményei

Az erős kölcsönhatás révén nyernek mechanikai tömeget az általunk észlelt makroszkopikus anyagi világ mikroszkopikus összetevői. Ez a kölcsönhatás hozza létre az atommagokat alkotó nukleonok stabil kötését, olyannyira, hogy a nukleonok alkotórészeit, a kvarkokat és a gluonokat nem is figyelhetjük meg szabadon, csak a hadronoknak nevezett kötött állapotaikban.

A Világegyetem keletkezése utáni mikromásodpercekben viszont olyan sűrű és magas hőmérsékletű lehetett Univerzumunk anyaga, hogy akkor még ezek az alkotórészek nem záródtak be a hadronokba, amit ma az erős kölcsönhatást leíró kvantum-színdinamika (QCD) aszimptotikus szabadságával magyarázunk. Az erősen kölcsönható anyag ezen állapotát, illetve a két állapot közötti fázisátalakulást kísérletileg nagy rendszámú atomok magjainak nagy energiájú ütköztetésével vizsgálhatjuk. Az ezekben az ütközésekben keletkező részecskék impulzus- és szögeloszlását és korrelációit használhatjuk arra, hogy az ütközést követően lezajló folyamatokat, illetve az ott létrejött anyag tulajdonságait közvetve vizsgáljuk.

Nagy nehézséget jelent, hogy egy ilyen nehézion- vagy hadronikus ütközés során a részecskék nagy része kis impulzusátadással járó folyamatokban keletkezik. Ilyen esetekben az elméletben szereplő, az erős kölcsönhatás erősségét leíró csatolási állandó értéke nagy, megghiúsítva a részecskefizika egyik legfontosabb eszközének, a perturbációszámításnak az alkalmazását. Nehéz feladat tehát az ütközésekben keletkező részecskék számát és tulajdonságait a QCD segítségével megjósolni, pedig ez jelentené az összeköttetést a mindössze néhányszor 10^{-23} másodpercig létező forró folyadéksepp jellemzői és a műszereinkkel megfigyelhető végállapoti részecskék között.

A forró folyadéksepp kialakulását és fejlődését elméleti oldalról valójában a QCD effektív modelljeinek, esetenként klasszikus térelméleti határeseteknek segítségével, illetve az ezekre épülő számítógépes eseménygenerátorokkal kísérjük meg követni. A modellek "hangolását" a kísérleti tapasztalat irányítja, azaz a tudományterület elméleti és kísérleti fejlődése egymást támogatja. Az utóbbi évtizedben jelentős áttörést jelentett a QCD egyensúlyi, sztatikus tulajdonságainak tanulmányozásában a legszisztematikusabb nemperturbatív módszernek, a rácstérelméletnek a fejlődése. A Lagrange-függvényben szereplő tereket egy tér-idő rács pontjain értelmezve és a rácsállandót csökkentve (kontinuum határesetet véve) megkaphatjuk a QCD jóslatait a fázisátalakulásra és a kvark-gluon anyagra vonatkozóan. A dinamikai időfejlődés követése szempontjából ezen eredmények is csak korlátozott hasznosságúak.

Az erősen kölcsönható anyag rendkívül nagy sűrűségű, de alacsony hőmérsékletű állapotban is fázisátalakuláson mehet keresztül, amelyet laboratóriumban ugyan nehezebb vizsgálni, de a neutroncsillagok belsejében uralkodó nagy nyomás alatt megvalósulhat, itt már felmerülhet a kvarkanyag létrejötte. Ezeknek a kérdéseknek a tisztázásához is hozzájárulhatnak eredményeink.

Az ultrarelativisztikus nehézion-ütköztetés története a genfi CERN kutatóin-

tézet SPS gyorsítójánál kezdődött 1986-ban S és O ionokkal, majd 1995-ben Pb ionokkal, ahol nukleonpáronként néhány GeV-től 17.2 GeV-ig változtatható az ütközések energiája. A 2000-ben a Brookhaven-i Nemzeti Laboratóriumban beindult RHIC gyorsítónál, ahol proton-proton és d+Au ütközéseket is létrehoztak, az elérhető tömegközépponti energia több mint egy nagyságrenddel, 200 GeV-re emelkedett nukleonpáronként. Ma a legnagyobb energiájú laboratóriumi ütközéseket a CERN LHC gyorsítója produkálja, amióta 2010. novemberében megtörtént az első Pb+Pb ütközés 2.76 TeV nukleonpáronkénti energián. A QCD nagy sűrűségű állapotának részletes vizsgálatára pedig most készül a darmstadti GSI-ben épülő FAIR gyorsító CBM kísérlete.

Az ezredfordulóig jónéhány jelenséget sikerült kísérletileg kimutatni nehézion-ütközésekben, amelyek a hadronanyag fázisátalakulására utalnak. Ilyen például az ütközés kezdeti fázisában kialakuló feltételezett nyomásgradiens, amely a végállapotú részecskék azimutális szögeloszlásait egyenletlenné teszi (elliptikus áramlás); a ritka kvarkokat tartalmazó keletkezett részecskék számának növekedése; vagy a keletkezett J/Ψ részecskék kis száma centrális ütközésekben a periférikus ütközésekhez képest. Ezek alapján valószínűsíthető volt, hogy a fázisátalakulás az SPS gyorsítónál megtörtént, de a létrehozott anyag mibenlétéről keveset tudtunk.

A nagy impulzusátadással járó folyamatok a perturbációszámítás alkalmazhatósága miatt hasznos eszköznek bizonyultak ennek az anyagnak a kutatásában, viszont ezek hatáskeresztmetszete rendkívül alacsony volt az SPS energiákon. Ismereteink bővítéséhez tehát növelni kellett az ütközési energiát, melynek eredményeképpen a RHIC és LHC gyorsítóknál addig el sem képzelhető tanulmányokat folytathattunk.

Tudományos pályámat a CERN SPS gyorsítójának legsokoldalúbb berendezésénél, az NA49 kísérletben kezdtem egyetemi hallgatóként, majd PhD-ösztöndíjasként. Az elemi és nehézion-ütközések összehasonlító vizsgálatát az egy évtizeddel ezelőtt beindult RHIC gyorsítónál folytattam. A RHIC PHOBOS kollaborációjának programjában annak korai szakaszától kezdve vettem részt, csakúgy, mint a CERN CMS együttműködés kezdeti proton-proton méréseinek és nehézion programjának tervezésében és végrehajtásában. Jelen értekezés pályám utóbbi két szakaszán elért eredményeimet mutatja be.

2. Célkitűzések

A QCD fázisátalakulás illetve a nehézion-ütközések vizsgálatában az előző fejezetben tárgyalt okok miatt nehéz pontos elméleti jóslatokat adni a kísérletileg mérhető mennyiségekre. A modellek jóslatainak az adatokkal való összehasonlításából nem juthatunk el könnyen a modellek egyértelmű cáfolatáig, részben azok paramétereinek hangolhatósága, részben a különböző, egymással versengő folyamatok szétválasztásának nehézségei miatt. Egyik fő célkitűzésünk tehát olyan mérhető mennyiségek konstruálása, amelyek minél tisztábban emelnek ki egy-egy jelenséget, vagy amelyek a rendelkezésre álló adatok között rendet, szabályosságot tárnak fel.

Kísérleti szempontból két fontos lehetőségünk is van arra, hogy a nehézion-ütközésekben a főként kis impulzusátadással járó alfolyamatokban keletkező részecskék alkotta közeg tulajdonságait felderítsük. Az egyik az elemi(bb) hadronikus ütközésekkel való szisztematikus összehasonlítás, hiszen a kétféle adathalmaz közötti eltérések modelfüggetlenül árulkodhatnak a létrehozott anyag különleges tulajdonságairól. Az eredmények kvantitatív analíziséhez természetesen ekkor sem mellőzhetjük a modellezést. A másik fontos eszköz a nagy impulzusátadással járó, perturbatív folyamatok felhasználása. Ezekre sokkal megbízhatóbb elméleti jóslatok állnak rendelkezésre, tehát egy jól interpretálható jelenség (pl. jet-ek) módosulásából következtethetünk a közeg jelenlétének hatására.

Összefoglalva, értekezésem fő céljai: a) a QCD fázisátalakulás kísérleti igazolása; b) új szabályosságok feltárása az atommagok és elemi részecskék ütközéseiben (skalázási tulajdonságok, faktorizálhatóság), amelyek segítségével rendszerezhetjük kísérleti ismereteinket; c) a kísérleti eredmények azon komponenseinek megtalálása, amelyek egyszerűen a kezdeti feltételektől függenek és magyarázatukhoz nem szükséges új mechanizmusok bevezetése; végül pedig d) olyan új jelenségek keresése, amelyek nem következnek egyszerűen más ismert tapasztalatokból, de megvilágíthatják az erős kölcsönhatás különböző folyamatokban megmutató univerzális arcát. Tézispontjaim és doktori művem ezen négy célkitűzés köré szerveződik.

A dolgozat a RHIC-nél és az LHC-nél végzett d+Au és p+p referencia-ütközéseket részletesen elemzi, feltárja az ütközési energia növelésével fellépő új sajátosságokat. Ezt kiegészíti a két gyorsítónál végzett Au+Au és Pb+Pb ütközések elemzése, illetve a d+Au és p+p ütközésekkel való összehasonlításukat lehetővé tevő konstrukciós fejlesztések bemutatása. Különösen fontos a kísérletekben változtatható három paraméter (a magok mérete, energiája és az ütközések centralitása) terében észlelhető szabályosságok maximálisan modelfüggetlen leírása (faktorizációk, kollektív mozgások, kétrészecske-korrelációk, stb.).

Az LHC-nél végzett mérések kiemelkedő jelentőségű sajátossága, hogy először nyílik alkalom részecskesugarak (jet-ek) és a közegen való áthaladásuk teljes rekonstrukciójára. Ez az erősen kölcsönható QCD anyag talán legtöbb információt nyújtó vizsgálati eljárása.

3. Kutatási módszerek

A hadronok és atommagok ütközéseinek kísérleti kutatása sokrétű és szerteágazó tevékenység, amely ma már csak csoportos munkával, együttműködésekben végezhető, mégis fontos szerepe maradt az egyéni kreatitásnak.

A munka első lépése a detektorok tervezése és fejlesztése, amely mindig a meglévő modelljeink alapján kitűzött optimális cél és a lehetőségeink között kötött kompromisszum. A PHOBOS és CMS kísérlet mérési tartományát, képességeit is kibővítettem az eseményválogatáshoz szükséges detektorok tervezésével, megépítésével, tesztelésével, illetve logikai kapcsolatainak megszervezésével. Ezek a technikai fejlesztések tették lehetővé a PHOBOS kísérlet d+Au ütközésekben elért eredményeit, valamint a CMS kísérlet beindulásakor a korai p+p fizikai program sikerét.

A detektorok működésének és a bennük lejátszódó folyamatoknak a pontos ismerete elengedhetetlen a kísérleti adatok korrigálásához és értelmezéséhez. Szinte minden mérőműszer alkalmat ad arra, hogy az eredeti specifikációit meghaladó pontosságot érjünk el megfelelő korrekciókkal, vagy a tervezett feladatán kívüli célokat is megvalósítsunk vele. Munkámban erre példa a PHOBOS Repülési Idő Fal jeleinek korrekciója, a CMS szilícium pixel detektorának egyetlen rétegével történő kvantitatív részecske-detektálás, vagy a részecskenyaláb tisztaságának monitorozására tervezett számláló adaptálása a CMS korai fizikai programjának precíz és hatékony eseményválogatási feladatára.

Egy-egy adott feladat jobb megoldása érdekében gyakran van szükség különböző detektorok kombinálására, mint például a PHOBOS kísérletben nyomkövetésre alkalmazott Spektrométer ionizációs energiaveszteségének és a Repülési Idő Fal sebességmérésének együttes használata részecske-azonosításra, a detektorok sajátosságait figyelembe vevő új elemzési eljárásokkal.

Az adatkiértékelés komplikált informatikai eszközeinek alkalmazása és fejlesztése mellett az azokban rejlő hibák feltárása és kijavítása is fontos része a kutatási módszereknek, ilyen például a PHOBOS kísérlet nyomkövetésének nagy távolságokra történő extrapolálása, vagy a mágneses térkép kiterjesztése és hibáinak korrigálása.

Az adatok értelmezésének, publikálásának, bemutatásának fontos kísérleti módszere a megfelelő változók alkalmazása, amelyek rávilágíthatnak a mérési adatok szabályosságaira, mélyebb összefüggéseire, rendszerezési lehetőségeire, és lehetőséget nyújtanak többé-kevésbé modellfüggetlen megállapítások megtételére.

Végül a kísérleti munka egyik legfontosabb eleme a szisztematikus bizonytalanságok felderítése és kiértékelése, illetve a csoportos munka ellenőrzésére felkért bizottságokban végzett aprólékos tevékenység, amelynek célja az adatok kiértékelésében vétett hibák kiszűrése. Ezt a munkamódszert hatékonyan alkalmazzák a nagy kísérleti együttműködések.

A fenti kutatási módszereket értekezésemben a fizikai eredmények bemutatásán keresztül ismertetem.

4. Új tudományos eredmények

1. **Jet quenching.** A brookhaven-i RHIC gyorsítónál működő PHOBOS kísérletben 200 GeV energiájú Au+Au ütközésekben kísérletileg megmutattuk, hogy a nagy (néhány GeV/c) transzverzális impulzusú részecskék keletkezési hatáskeresztmetszete csak töredéke annak, amit proton-proton ütközések eredményei alapján várnánk, figyelembe véve a nukleonok páronkénti ütközéseinek számát (N_{coll}) az Au+Au ütközésben [1], igazolva ezzel a *jet quenching* jelenségét. A fenti hatáskeresztmetszetet tehát nem az N_{coll} mennyiséggel, hanem közelítőleg az ütközésben résztvevő nukleonok N_{part} számával találtuk arányosnak. Ehhez a munkához az adatok felvételével és a detektor felbontását kompenzáló korrigálásával járultam hozzá.
2. **Kontroll kísérlet (d+Au).** A PHOBOS kísérletben megterveztem, megépítettem, üzembe helyeztem és sikeresen használtam egy új szcintillációs detektort, amelynek feladata a nagy transzverzális impulzusú részecskéket tartalmazó d+Au ütközések kiválogatása volt. Ezzel lehetővé tettem, hogy a *jet quenching* jelenségének vizsgálatában a kísérlet versenyképes maradjon, és a d+Au mérési programban releváns eredményeket tudjon elérni [2]. Ekkorra világossá vált, hogy a fizikailag fontos jelenségek nagy transzverzális impulzusnál (néhány GeV/c fölött) játszódhatnak le, ezek mérésére a PHOBOS nem volt igazán alkalmas a fenti fejlesztésem előtt.

Ennek az új, ún. Spektrométer *triggernek* a segítségével sikerült kísérletileg kimutatnunk, hogy a nagy transzverzális impulzusú részecskék elnyomása d+Au ütközésekben nem jelentkezik, az előzőleg megfigyelt Au+Au ütközésekkel ellentétben [3]. Ezzel bebizonyosodott, hogy a nagy p_T -vel rendelkező részecskék elnyomása nem a kezdeti állapot módosulása miatt történik, hanem valóban a nehézion-ütközésekben kialakult magas hőmérsékletű és erősen kölcsönható anyag miatt, amelynek tulajdonságai tehát vizsgálhatók a *jet quenching* tanulmányozásával. Az 1. tézisponttal együtt ez az eredmény igazolja, hogy a nehézion-ütközésben keletkezett nagy energiasűrűségű anyag nem állhat az atommagokhoz hasonlóan hadronokból, hanem fázisátalakulásnak kellett történnie, melynek során a hadronok alkotórészei kiszabadulnak, amit az erős kölcsönhatás ún. aszimptotikus szabadsága tesz lehetővé.

3. **Skálázás.** A 62.4 GeV és 200 GeV nukleonpáronkénti energiával ütköző Au+Au atommagok esetén megmutattuk, hogy a keletkezett töltött részecskék transzverzális impulzus spektrumai függenek az ütközés centralitásától és energiájától, de a kétféle függés faktorizálódik [4]. Megmutattuk továbbá, hogy a Cu+Cu és az Au+Au ütközésekben mért p_T -spektrumok hasonlóak, ha azonos N_{part} értéknél tekintjük őket, tehát a részecske-keltés kvantitatív tulajdonságai csak az ütköző rendszer méretétől függenek [5].

A keletkezett részecskék pszeudorapiditás-eloszlásait vizsgálva megfigyeltük, hogy a nyalábhoz képest kis szögekben keletkezett részecskék száma csak az egyik nyaláb (cél tárgy) energiájától függ, a másiktól (lövedék) független. Ez a megállapítás (anti)proton-proton, $p(d)+A$, illetve nehézion-ütközésekre is igaznak bizonyult [6, 7]. A transzverzális impulzus spektrumok kiértékelésében, az ezekről szóló publikációk elkészítésében, valamint a pszeudorapiditás-eloszlások szisztematikus vizsgálatában vettem részt.

4. **Azonosított részecskék.** A 2. tézispontban említett Spektrométer trigger és a PHOBOS Repülési Idő Falát felhasználva megmértem az azonosított töltött hadronok (pionok, kaonok, [anti]protonok) transzverzális impulzus spektrumát Au+Au ütközésekben 62.4 GeV energián [8] és d+Au ütközésekben 200 GeV energián [9]. Megmutattam, hogy a transzverzális tömeg szerinti skálázás teljesül a d+Au ütközésekre, míg az Au+Au ütközésekben sérül. A RHIC-nél felfedezett "barion anomáliáról" (a proton/pion arány egységnyi fölé növekedéséről) megmutattam, hogy az ütközési energia függvényében fokozatosan jelenik meg, valamint hogy a barionok lefékeződésének mértéke a RHIC energiákon nem látszik függni az ütközés centralitásától. Ez a publikációm [9] az egyetlen, azonosított részecske-spektrumokat ismertető cikk a PHOBOS kísérletről, és az egyetlen, a Repülési Idő Fal adatait használó analízis, melynek eredményeit számos konferencián is ismerttettem [10–12].
5. **A CMS kísérlet első eredményei.** Az LHC részecskegyorsító mellett működő CMS kísérletben megterveztem, megépítettem, üzembe helyeztem és sikeresen működtettem a Nyaláb-Szcintillációs Számlálókat (BSC) használó ún. *minimum bias trigger*eket, amelyek a CMS kísérlet legnagyobb hatásfokú (hatáskeresztmetszetű) triggeraiként az LHC beindulásakor alkalmassá tették a CMS kísérletet az első p+p ütközések regisztrálására és az ütközési frekvencia visszajelzésére az LHC felé. Emellett az események megbízható válogatásával lehetővé tették a fizikai program gyors beindítását az LHC működésének első fél évében.

Ezen technikai fejlesztés és hosszú felkészülés után koordinálhattam és megírhattam az LHC beindulása után a CMS kísérlet első két publikációját, melyek adatkiértékelése csoportosan történt. A töltött részecskék pszeudorapiditás-eloszlásának mérési módszerét a PHOBOS kísérletben szerzett tapasztalataim alapján dolgoztuk ki. A p+p ütközésekben 0.9, 2.36 [13] illetve 7 TeV [14] energián is azt találtuk, hogy a keletkezett töltött részecskék átlagos száma jelentősen meghaladta a széles körben használt modellek jóslatait, és ez az eltérés az ütközési energia függvényében növekedett. (A [13] és [14] publikációkban a töltött részecskék nyomkövetésével foglalkozó részt nem tekintem saját eredményemnek). Ezeket az adatokat több esetben elsőként publikáltuk az eddig laboratóriumban elért legnagyobb ütközési energiákon. A CMS első eredményeiről is én számolhattam be elsőként nemzetközi

konferencián [15]. A p+p ütközésekre kifejlesztett mérési módszert később sikeresen alkalmaztuk Pb+Pb ütközésekre is.

6. **Rekonstruált jet-ek vizsgálata.** Az 1. és 2. tézispontok tematikáját folytatva az LHC gyorsító beindulása előtt részletes vizsgálatokat végeztem a *jet quenching* tanulmányozásának lehetőségeiről nehézion-ütközésekben. Megvizsgáltuk a jet trigger alkalmazásának előnyeit a nukleáris módosulási faktorok mérésében [16], amelyet 2011-ben adatokon is megvalósított a CMS nehézion csoportja. Megírtuk a CMS nehézion-programjára vonatkozó terveinkről szóló összefoglaló kötetet [17], amelynek a nagy impulzusátadással járó jelenségek mérési lehetőségeiről szóló 7. fejezetét szerkesztettem. Az LHC-ben történt első Pb+Pb ütközéseket követően elemeztük a *jet quenching* jelenségét a rekonstruált jet-párok transzverzális energiájának aszimmetriája segítségével [18]; itt a - nehézion-mérésekben először ekkor alkalmazott - első szintű trigger logika megtervezését és felügyeletét, valamint az adatkiértékelés részletes belső dokumentációjának koordinálását végeztem.
7. **Fluktuációk és korrelációk.** A nehézion-ütközésekben keletkezett részecskék azimutuszög-eloszlásának aszimmetriáját, az elliptikus áramlást - illetve annak eseményenkénti fluktuációit - és az ütköző atommagok átfedési zónájának excentricitását vizsgálva részletes analitikus számításokat végeztem az ütközésben résztvevő nukleonok helyét figyelembe véve definiált excentricitás eseményenkénti fluktuációival, és annak centralitás-függésével kapcsolatban [19]. Ezzel sikerült tisztázni egy irodalomban létező fontos félreértést az elliptikus áramlás különböző méretű atommagokra vonatkozó összehasonlító vizsgálatait illetően.

A nehézion-fizika egyik minőségileg új jelenségét a PHOBOS kísérletben a töltött részecskék egy nagy transzverzális impulzusú (*trigger*) részecskéhez képest mért szögeloszlásában figyeltük meg. Kiderült, hogy a *trigger* részecskével azonos azimutuszögben keletkezett részecskék száma megnövekszik, és ez a jelenség független a polárszögük különbségétől, akkor is, ha ez a különbség igen nagy [20]. Ebben az analízisben az eredmények helyességének ellenőrzéséért voltam felelős, és azokat több konferencián is ismerttettem [21, 22]. A PHOBOS kísérletben szerzett tapasztalatok segítségével a CMS kísérletben 7 TeV energiájú p+p ütközésekben is találtunk hasonló jelenséget, amely az LHC első nem várt, minőségileg új megfigyelése volt. A közelmúltban egyébként az LHC nehézion-ütközéseiben is sikerült megfigyelni ezt a korrelációt.

A tézispontokhoz kapcsolódó közlemények

- [1] B.B. Back, ..., G.I. Veres, et al. Charged hadron transverse momentum distributions in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. *Phys.Lett.*, B578:297–303, 2004, nucl-ex/0302015.
- [2] G.I. Veres. Hadron p_T spectra from 0.03 GeV/c to 6 GeV/c from PHOBOS. *Acta Phys.Hung.*, A22:197–206, 2005.
- [3] B.B. Back, ..., G.I. Veres, et al. Centrality dependence of charged hadron transverse momentum spectra in d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. *Phys.Rev.Lett.*, 91:072302, 2003, nucl-ex/0306025.
- [4] B.B. Back, ..., G.I. Veres, et al. Centrality dependence of charged hadron transverse momentum spectra in Au+Au collisions from $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ GeV to 200 GeV. *Phys.Rev.Lett.*, 94:082304, 2005, nucl-ex/0405003.
- [5] B. Alver, ..., G.I. Veres, et al. System size and centrality dependence of charged hadron transverse momentum spectra in Au+Au and Cu+Cu collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ GeV and 200 GeV. *Phys.Rev.Lett.*, 96:212301, 2006, nucl-ex/0512016.
- [6] B.B. Back, ..., G.I. Veres, et al. The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC. *Nucl.Phys.*, A757:28–101, 2005, nucl-ex/0410022.
- [7] G.I. Veres. Bulk hadron production at high rapidities. *Nucl.Phys.*, A774:287–296, 2006, nucl-ex/0511037.
- [8] B.B. Back, ..., G.I. Veres, et al. Identified hadron transverse momentum spectra in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ GeV. *Phys.Rev.*, C75:024910, 2007, nucl-ex/0610001.
- [9] G.I. Veres et al. Identified hadron spectra from PHOBOS. *J.Phys.G*, G30:S1143–S1147, 2004.
- [10] G.I. Veres et al. Strangeness measurements with the PHOBOS experiment. *J.Phys.G*, G32:S69–S76, 2006.
- [11] B. Alver, ..., G.I. Veres, et al. Antiparticle to particle ratios and identified hadron spectra in Cu+Cu and Au+Au collisions. *J.Phys.G*, G34:S1103–1108, 2007, nucl-ex/0701064.
- [12] G.I. Veres et al. Strange hadron production at low transverse momenta. *J.Phys.G*, G30:S93–S102, 2004.
- [13] V. Khachatryan, ..., G.I. Veres, et al. Transverse momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 2.36 TeV. *JHEP*, 1002:041, 2010, hep-ex/1002.0621. kivéve a töltött részecskék nyomkövetéséből származó eredményeket.

- [14] V. Khachatryan, ..., G.I. Veres, et al. Transverse-momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. *Phys.Rev.Lett.*, 105:022002, 2010, hep-ex/1005.3299. kivéve a töltött részecskék nyomkövetéséből származó eredményeket.
- [15] G.I. Veres. Inclusive distributions of charged hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 2.36 TeV. 2010, hep-ex/1006.0948. Közlésre elfogadva a Lake Louise Winter Institute 2010 konferencia kiadványában; CERN-CMS-CR-2010-068; <http://cdsweb.cern.ch/record/1286310>.
- [16] C. Roland, G.I. Veres, and K. Krajczár. Simulation of Jet Quenching Observables in Heavy Ion Collisions at the LHC. *Int.J.Mod.Phys.*, E16:1937–1942, 2007, nucl-ex/0702057.
- [17] D. G. d’Enterria (Ed.), ..., G.I. Veres, et al. CMS physics technical design report: Addendum on high density QCD with heavy ions. *J.Phys.G*, G34:2307–2455, 2007. 7. fejezet.
- [18] S. Chatrchyan, ..., G.I. Veres, et al. Observation and studies of jet quenching in PbPb collisions at nucleon-nucleon center-of-mass energy = 2.76 TeV. *Phys. Rev.*, C84:024906, 2011, nucl-ex/1102.1957.
- [19] B. Alver, ..., G.I. Veres, et al. Importance of correlations and fluctuations on the initial source eccentricity in high-energy nucleus-nucleus collisions. *Phys.Rev.*, C77:014906, 2008, nucl-ex/0711.3724.
- [20] B. Alver, ..., G.I. Veres, et al. High transverse momentum triggered correlations over a large pseudorapidity acceptance in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. *Phys.Rev.Lett.*, 104:062301, 2010, nucl-ex/0903.2811.
- [21] G.I. Veres. Correlations with a high- p_T trigger over a broad η range. *PoS*, HIGH-PTLHC08:017.
- [22] G.I. Veres. Correlation and multiplicity measurements from RHIC to the LHC. *PoS*, HIGH-PT physics09:040.