

A kvarkanyag nyomában – nagy energiás nehézion-fizikai kutatások a PHENIX kísérletben

Nagy Márton, Vértesi Róbert

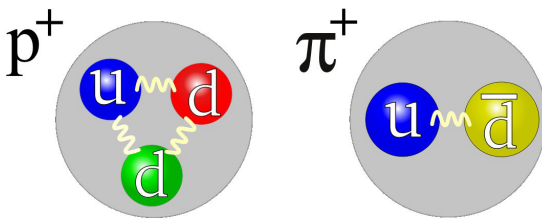
MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, 1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29-33.

Az amerikai RHIC részecskegyorsítónál működő PHENIX kísérlet napjaink egyik meghatározó nehézion-fizikai kísérlete, amely alapvető felfedezésekkel segített közelebb jutni a nehézion-fizika céljához: az erősen kölcsönható anyag fázisszerkezetének, és így magának az erős kölcsönhatásnak a megismeréséhez. Jelen cikkben áttekintjük ezt a kísérleti berendezést és néhány olyan mérést, amelyek elvezettek az anyag új halmazállapotának, a kvark-gluon plazmának és nem várt tulajdonságainak kimutatásához. Bemutatjuk a jet-elnyomás és az elliptikus folyás jelenségét, valamint egy HBT-effektuson alapuló mérést.

A kvarkanyag

Az erős kölcsönhatás

Az erős kölcsönhatás térelmélete (kvantált mezőket leíró elmélete) a kvantum-színdinamika (QCD). Anyagi építőköve a kvark (illetve antikvark), amelyből kettő vagy három alkot egy hadront. A kvarkok ún. színtöltéssel rendelkeznek, ami az erős kölcsönhatás forrása. A színtöltés lehet „piros”, „zöld” és „kék”, ami természetesen csak analógia: ahogyan ez a három szín együtt fehéret ad, a három színtöltés összege is semleges állapot. (Minden színhez van antiszín, és együtt szintén a semleges „fehéret” adják ki.) A kvarkok elektromos töltéssel is rendelkeznek, melyek értéke érdekes módon nem egész: $+2/3$ ill. $-1/3$ elemi töltésegység. A hadronok azonban minden esetben egész töltést hordozhatnak csak. A barionok, mint pl. a nukleonok, három (anti)kvarkból épülnek fel, a mezonok pedig kvark-antikvark párok (lásd 1. ábra).



1. ábra: A hadronok kvarkszerkezete. A bal oldalon egy barion (a proton), a jobb oldalon pedig egy mezon (a pozitív pion) látható. A színes kvarkokat összetartó gluonokat a rugók jelképezik, az „amtikék” színnek az ábrán a sárga felel meg. Az eredeti ábra forrása: Wikimedia Commons

A QCD-ben az erős kölcsönhatást közvetítő részecske, a gluon maga is hordoz színtöltést. (Ez az elektrodinamikával ellentétes helyzet: ott a közvetítő részecske, a foton elektromosan semleges.) A gluonok színtöltése a QCD-ben olyan visszacsatoláshoz vezet, amelynek eredménye egy sajátos kettősség: kis távolságon (nagy kölcsönhatási energiáknál) a kvarkok közti csatolás gyenge (ez az ún. aszimptotikus szabadság). Nagy távolságon viszont az erőhatás a gluonok felszaporodása

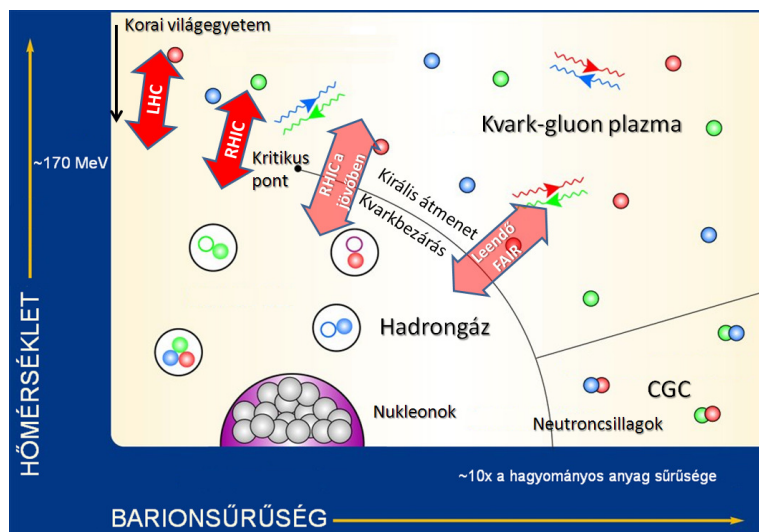
miatt nagyon megnövekedne, ezért van az, hogy a kvarkok egymástól nem távolodhatnak el, hanem mindig színsemleges kötött állapotokat hoznak létre (kvarkbezárás). A hadronokat tehát egyfajta „zsáknak” tekinthetjük, amin belül a kvarkok lényegében szabadon mozognak, de onnan kiszabadulni nem tudnak.

A térelméleti számítások során a kölcsönhatásokat általában perturbációs számítás segítségével, a szabad megoldások körüli sorfejtéssel írjuk le. A QCD alkalmazásában pont az jelenti a nehézséget, hogy kis energián az erős kölcsönhatás túlságosan is erős a perturbatív megközelítéshez. Ebben a tartományban effektív modellek, illetve numerikus számítás (rács-QCD) használható.

A kvark-gluon plazma

Mind a korai fenomenológiai elgondolások, mind a rács-QCD számítások szerint valószínűnek látszott, hogy (igen magas hőmérsékleten) az erősen kölcsönható anyagnak van egy olyan fázisa („halmazállapota”), ahol a hadronokba zárt kvarkok kiszabadulnak, és egyetlen forró, kvarkokból és gluonokból álló közeget alkotnak, az ún. kvark-gluon plazmát (QGP) [1]. Ilyen létezhetett a világegyetem korai időszakában, amikor az anyag még nem hűlt ki eléggé a hadronok kialakulásához. A 2. ábra az erősen kölcsönható anyag valószínűsített fázisdiagramját mutatja a hőmérséklet-barionsűrűség síkon. (A barionsűrűség az olyan kvarkok sűrűségének felel meg, amelyeknek nincs antikvark-párjuk a rendszerben.) A normál atommagok (a 2. ábrán is feltüntetve) nagyon kis hőmérsékletű, közepes barionsűrűségű rendszernek felelnek meg. Fázisátalakulást nagyon nagy sűrűség vagy hőmérséklet esetén várunk.

Ultrarelativisztikus energiájú ütközések során létrejöhet az a hőmérséklet és nyomás, ahol a kvark-gluon plazma kialakul. A nagy energiás nehézion-ütköztetők legfontosabb célja az anyag ezen állapotának létrehozása és tanulmányozása: az ütközések korai szakaszában uralkodó állapotokról a kirepülő, ismert típusú részecskék impulzus szerinti eloszlásaiból (spektrumaiból), illetve a megfigyelt részecske-párok korrelációiból információt szerezhetünk.



2. ábra: A QCD elméleti számítások alapján összeállított fázisdiagramjának vázlata. A napjaink kísérletei számára elérhető tartományokat a nyílak jelzik. Az eredeti ábra forrása: http://www.ice.csic.es/es/view_research_line.php?RID=18

A PHENIX kísérlet

A RHIC gyorsító

Az Amerikai Egyesült Államokban, Brookhavenben lévő RHIC (relativisztikus nehézion-ütköztető) a világ egyik legnagyobb, rendkívül sokoldalú részecskegyorsítója, amelynek – más feladatai mellett – a kvark-gluon plazma előállítása, tulajdonságainak meghatározása, illetve kvarkanyag-hadronanyag fázisátmenet feltérképezése a célja.

A gyorsító egy 3,8 kilométer hosszú szinkrotrongyűrű, amely változó elektromos tér segítségével (a részecskével együtt haladó potenciálhullámok „hátára ültetve”) gyorsíthat protonokat vagy elektronjaiktól megfosztott nehézionokat. Az ionok az elektronok lefosztása után több gyorsító lépcső – tandem van de Graaff, egy gyorsító szinkrotron, majd az AGS (váltakozó gradiensű szinkrotron) – bejárása után kerülnek a RHIC gyorsító és tároló gyűrűbe. A 3. ábrán láthatjuk a RHIC gyorsító komplexum vázlatát. 2001-es beindítása óta a RHIC arany-arany illetve réz-réz ütközésekben vizsgálta az erősen kölcsönható anyag tulajdonságait, továbbá kontrollméréseket végzett deutérium-arany ütközésekben. Protonok protonokkal való ütközését is vizsgáljuk: egyrészt ezek is kontrollként szolgálnak a nehézion-ütközések eredményeinek értelmezéséhez, másrészt a RHIC gyorsító képes – a világon egyedülálló módon – polarizált protonok ütköztetésére is, amelyek – egy teljesen más kutatási irány részeként – betekintést nyújtanak a proton spinszerkezetébe. A nukleononkénti maximális tömegközépponti ütközési energia nehézionokra 200 GeV, protonokra 500 GeV. Történtek mérések kisebb energiákon is: a gyorsító ütközési energiáját igen széles határok között lehet változtatni, ami alkalmassá teszi későbbi kutatásokra is.

A két, egymással szemben haladó nagy energiás nyaláb összesen hat pontban keresztezi egymást, itt nyílik lehetőség az ütközések tanulmányozására. Ezek közül négy ponton létesítettek detektorokat, ezek nevei: BRAHMS, PHOBOS, STAR és PHENIX. A legkisebb kísérlet a PHOBOS. Ez a kísérlet az ütközések során keletkező leginkább előrefelé (nyalábirányban) kirepülő (azaz nagy *pszeudorapiditású*) részecskéket is észlelte. 2005-ben befejezte az adatgyűjtési prog-

ramját, azóta szétszerelték, de az adatainak elemzése még egy ideig tovább folytatódik. A BRAHMS kísérletet is arra tervezték, hogy nagy pszeudorapiditás- és transzverzimpulzus-tartományt fedjen le, 2006-ban gyűjtöttek utoljára adatokat. A két nagyobb, hosszú távra tervezett kísérlet mögött két gyökeresen eltérő filozófia áll: a STAR gyakorlatilag egy nagy szolenoid-mágnesbe helyezett gáztöltésű detektor, amely majdnem a teljes térszöveget lefedi, és így a kirepülő töltött részecskék pályáját (ebből pedig az impulzusát) rekonstruálja. A PHENIX kísérlet sokféle részecske – töltött hadronok, fotonok, elektronok és müonok – nyomon követésére és azonosítására képes, ezek mérésére külön detektorok szolgálnak. Emellett jóval kisebb holtidővel működik, mint a STAR kísérlet, így több ütközést (*eseményt*) tud rögzíteni. Mindezekért cserében a térbeli lefedettségben (*akceptanciában*) kellett áldozatokat hozni.

A négy RHIC kísérlet 2005-ben jelentette be az anyag új állapotának felfedezését. Az eredeti elgondolással szemben azonban nem szabadon mozgó kvarkokat és gluonokat tartalmazó „ideális kvarkgázt”, hanem erősen csatolt, folyadékszerű kvarkanyag létét sikerült kimutatni [2]. A négy kísérleti együttműködés közül a PHENIX-ben van intézményesített magyar részvétel az MTA KFKI RMKI, az ELTE és a Debreceni Egyetem részéről [3].

A PHENIX kísérlet felépítése

Három fő csoportra szokták osztani a PHENIX kísérlet detektorait: globális detektorok, központi kar és a müondetektorok. A globális detektorok egyrészt *triggerelésre* (az érdekes események kiválogatására) szolgálnak, másrészt segítségével lehet meghatározni az ütközési pont (*vertex*) nyalábirányú koordinátáját, az ütközési paraméter irányát (az erre merőleges síkot *reakciósíknak* szokás nevezni), továbbá nehézion-ütközésekben az ütközések *centralitását*, vagyis azt, hogy mennyire lapolnak át az ütköző magok. (Ha teljesen átfednek, akkor *centrális*, ha alig sűrűlik egymást, akkor *periferiális* ütközésről beszélünk. A centralitás mértékét százalékban szokták kifejezni: 0 % jelenti a legcentrálisabb, ~92 % a PHENIX számára látható legperiferiálisabb ütközéseket.)



3. ábra: A gyorsítókomplexum vázlata: a RHIC gyűrű és az előgyorsítók. Az ábra forrása: <http://www.rarf.riken.go.jp/rarf/rhic/acc/rhic.html>

A legfontosabb globális detektor a koincidencia-számláló (BBC, Beam-to-Beam Counter) detektor. Ez az előreszórt részecskék összöltését, repülési idejét és irányeloszlását méri, így meg tudja határozni a centralitást (centrálisabb eseményekben több töltött részecske keletkezik, mint periferiálisakban), a repülési időből a koordinátát, valamint a szögeloszlás-aszimmetriából közelítőleg a reakciósiót is. Másik fontos globális detektor a ZDC (Zero Degree Calorimeter), amely az előrerepülő (semleges) neutronok összenergiáját méri, így hozzájárul a centralitás-meghatározáshoz és a triggereléshez. (A ZDC üzemeltetésében, karbantartásában a magyar csoport is részt vesz.) A reakciósiók pontosabb meghatározását egy később beépített új, RXP nevű detektor (reakciósió-detektor) végzi.

A nyalábirányra közelítőleg merőleges irányban elhelyezkedő, 2×90 azimutális szöget lefedő központi kar tartalmazza a legtöbb speciális detektort. Ezek a nagy energiás kísérletekben megszokott módon vannak elrendezve: belül vannak a nyomkövető (tracking) detektorok, kívül pedig a részecskéket elnyelő kaloriméterek. Az ütközésből kirepülő töltött részecskéket először egy dipólomágnes tere téríti el, majd a pályákat egy driftkamra (DC, Drift Chamber) észleli. A PHENIX kísérlet sajátossága, hogy a mágneses tér aktív térfogatában gyakorlatilag nincsen detektor. Ez praktikusán lehetetlenné teszi a vertexen kívüli, másodlagos bomlások rekonstruálását, cserében a kis impulzusokat pontosabban lehet mérni, mivel a töltött részecskék kevésbé szóródnak a detektorok anyagán. (Jelenleg tervezés alatt áll egy ütközési ponthoz közeli szilícium pixeldetektor (vertex-detektor, VTX), amellyel lehetővé válik majd a vertexen kívüli bomlások rekonstruálása.) A driftkamrát elhagyó töltött részecskék pontosabb helymeghatározását három réteg, az ütközési ponttól különböző távolságokra elhelyezett sokszálas proporcionális kamra (PC, Pad Chamber) végzi.

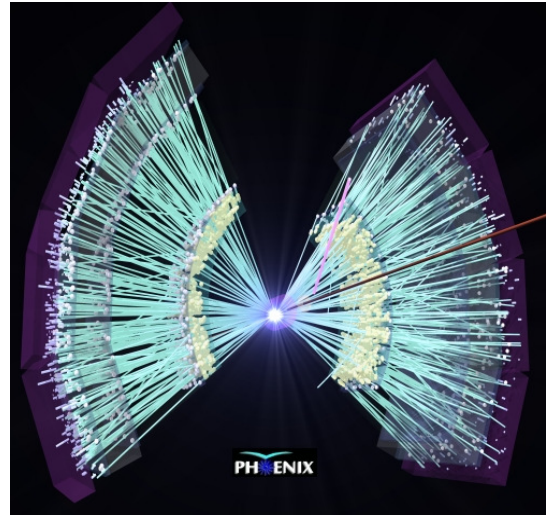
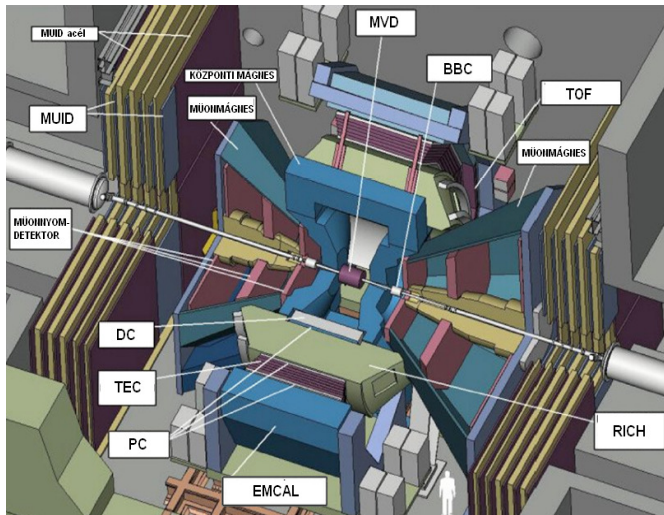
A töltött részecskék azonosításához még szükség van sebességük vagy energiájuk ismeretére is. Az elektronokat –

mivel ezek szinte mindig közel fénysebességgel haladnak – egy Cserenkov-detektor (RICH, Ring-Imaging Cherenkov) azonosítja. A töltött hadronokat repülési idő alapján azonosító műanyag-szcintillációs TOF detektor (Time-of-Flight) 2001 óta rendelkezésre áll, később a nagy impulzusú hadronok azonosítására egy aerogél Cserenkov-detektort (ACC) is üzembe helyeztek. A töltött részecskék mellett semlegesek is keletkeznek – főleg fotonok, amelyek pozícióját és energiáját elektromágneses kaloriméter (EMCal) méri. Ennek két része van: mintavevő ólom-szcintillátor (PbSc) és homogén, Cserenkov-alapú ólomüveg (PbGl). Az EMCal hozzájárul a hadronok repülési idő alapján történő azonosításához is a TOF-nál pontatlanabb időméréssel, de nagyobb akceptanciával.

A PHENIX-ben a müon-azonosító (a többi fajta részecskét elnyelő) acéllemezek és a közjük helyezett gázdetektorok, amelyek együtt a MuID (Muon Identifier) detektort alkotják, előreszóródó irányban helyezkednek el egyrészt helyszűke miatt, másrészt mert így a központi mágnes vasmagja lehet az első elnyelő réteg. (A müonok a nyomkövető detektorokban jelet hagynak, de minden más részecskénél könnyebben áthatolnak az anyagon.) Az azonosított müonok mérésével ezután pl. a nehéz kvarkok bomlásai vizsgálhatók. A detektorok térbeli elhelyezkedését a 4. ábra szemlélteti.

A PHENIX tehát, noha kis akceptanciával, de sokféle különböző részecske mérésére alkalmas. Indítása óta – részben a felfedezések által motiválva – új detektorokat is helyeztek be, illetve fejlesztenek most is. Ezek együttes teljesítőképessége sok most még megválaszolatlan kérdés vizsgálatára teszi alkalmassá a PHENIX kísérletet az elkövetkező években.

A kvark-gluon plazma létezésének megsejtése óta sok olyan lehetséges jelet, szignatúrát vizsgáltak elméleti úton, ami ennek az új anyagformának a megjelenésére enged következtetni. Itt két témát tekintünk át: a kemény („hard”) folyamatokat és a lágy („soft”) kinematikai tartományt.



4. ábra: Balra a PHENIX kísérlet háromdimenziós metszete. Jobbra egy nehézion-ütközés rekonstrukciója a központi karban. (A nyálábtengelyt a vörös vonal jelzi.). Az ábrák forrása: <http://www.phenix.bnl.gov>

Kemény folyamatok vizsgálata

Partonok energiavesztése

A QCD perturbatív megoldása alapján – az aszimptotikus szabadság miatt – nagy mozgási energia esetén lehet kvantitatív modelleket alkotni. Keménynek hívjuk az olyan folyamatokat, amelyek a perturbatív számítások érvényességi tartományába esnek (tehát általában nagy energia- és impulzusátadású szórások eredményei). Több számítás egybehangzó eredménye szerint a kvark-gluon plazma egyik fontos jellemzője, hogy a nagy mozgási energiájú *partonok* (kvarkok vagy gluonok) számára „átlátszatlan”: ezek az anyaggal való kölcsönhatás során energiájuk jelentős részét elveszítik. Ennek megnyilvánulása a *jet-elnyomás* (jet quenching) jelensége. (*Jet*nek hívjuk az egy nagy energiájú partonból származó hadronok záporát, ezekből tehát nehézion-ütközésekben a közeg hatása miatt kevesebbet várunk.) Kísérletileg ezt az effektust úgy lehet megfigyelni, hogy mérik valamilyen típusú részecskék spektrumát nehézion-ütközésben, és ezt összehasonlítják az ugyanolyan energiájú proton-proton ütközésben mért, a nehézion-ütközésekben történő nukleon-nukleon ütközések átlagos számával felskálázott spektrummal. Az így képzett arány az adott részecske *nukleáris módosulási tényezője* (R_{AA}). Ha ez eltér 1-től, az azt jelzi, hogy valamilyen, az elemi proton-proton ütközésekhez képest új effektus van jelen: a kvark-gluon plazma jelenlétére a nagy energiájú részecskék hozamának (számának) csökkenése, vagyis az R_{AA} 1-nél kisebb értéke utal.

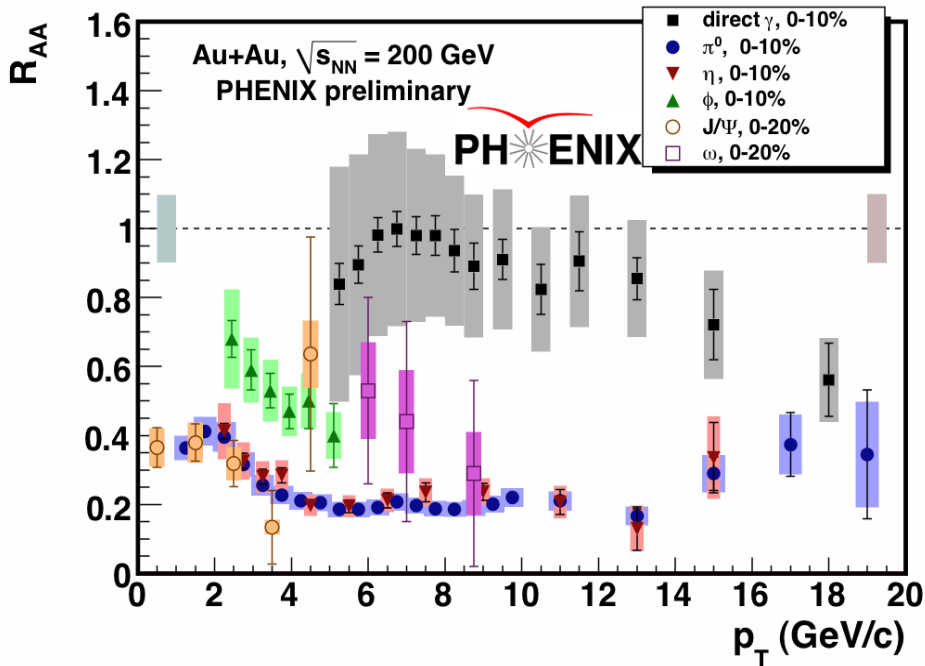
A PHENIX kísérlet egyik első, nagy jelentőségű eredménye éppen a töltött hadronok, valamint a semleges pionok elnyomódásának megfigyelése volt arany-arany ütközésekben ($R_{AA} < 1$) [4]. A különböző részecskék R_{AA} értékeit az 5. ábrán láthatjuk a transzverzális (nyalábra merőleges) impulzus (p_T) függvényében. Jól látható, hogy centrális ütközésekben mind a semleges pion, mind az h mezon

jelentősen elnyomódik a perturbatív QCD számára érdekes p_T 4 GeV/c tartományban. Ennek felfedezése után szükség volt valamilyen ellenőrző mérésre: deutérium-arany ütközésekben nem jelentkezett hasonló elnyomás, ami az itt keletkező rendszer kisebb méretével van összefüggésben: eszerint viszont arany-arany ütközésekben valóban új anyagforma által okozott jelenséggel állunk szemben. További fontos kontroll a direkt fotonok spektrumának megmérése, amelyben a magyar csoport is aktívan közreműködött.

Direkt fotonok

A kvarkanyag a fotonok számára lényegében átlátszó, és így a *direkt fotonok* (azok a fotonok, amelyek nem hadronok bomlásából származnak), értékes, a reakció korai szakaszának dinamikájára is érzékeny információt hordoznak. A direkt fotonok a rendszer időfejlődése során számos forrásból jöhetnek, ezek kísérleti elkülönítése nem lehetséges. A fotonkeltés fő forrásai a kemény folyamatok, illetve a QGP hőmérsékleti sugárzásából megjelenő *termikus fotonok*. A kemény fotonkeltés perturbatív QCD segítségével számolható: nagy impulzusoknál a kemény folyamatok dominálnak, míg a termikus fotonok nagyrészt alacsonyabb impulzusnál jelennek meg.

A direkt fotonok spektrumának mérése nagy kísérleti kihívás. Első lépcsőként a fotonokat kell jó hatásfokkal kiválogatni az EMCal-ban észlelt beütések közül: ehhez töltött részecskevévét, illetve repülési időn és záporalapon alapuló sztochasztikus logikát használó fotonazonosítást alkalmazunk. Mindezek után rendelkezésünkre áll az *inkluzív* foton-spektrum. Következő lépésként a fotonokat adó háttér-folyamatokat kell megismernünk, ami gyakorlatilag a fotonokra bomló semleges hadronok spektrumának meghatározását jelenti. Legfontosabb ezek közül a p^0 gg bomlási csatorna, amely a fotonpárok invariáns tömegének meghatározásával rekonstruálható. Szimuláció segítségével korrekciókat kell alkalmaznunk a detektor és az észlelési folyamat tökéletlenségeire is.



5. ábra: A PHENIX által mért nukleáris módosulási tényezők különböző típusú mezonokra és direkt fotonokra (fekete négyzet).

Miután így megkaptuk a direkt fotonok spektrumát, meghatározható a nukleáris módosulási tényező is, az 5. ábra ezt is mutatja. Jól látható, hogy a direkt foton R_{AA} közepes p_T -nél 1 körül van, ami megerősíti, hogy a többi hadronfajta elnyomását tényleg a színtöltésen alapuló erős kölcsönhatás közegbeli hatása okozza [5]. (A $p_T > 12$ GeV/c tartományban fellépő látszólagos elnyomás más effektusokra vezethető vissza.)

A lágy kinematikai tartomány

A jet-elnyomás jelenségének feltérképezésével kiderült, hogy valóban újfajta anyag keletkezik 200 GeV-es nehézion-ütközésekben. A perturbatív QCD-re jellemzőnél kisebb impulzusú („lágyabb”) folyamatok vizsgálata segít ezen anyag jobb megismerésében.

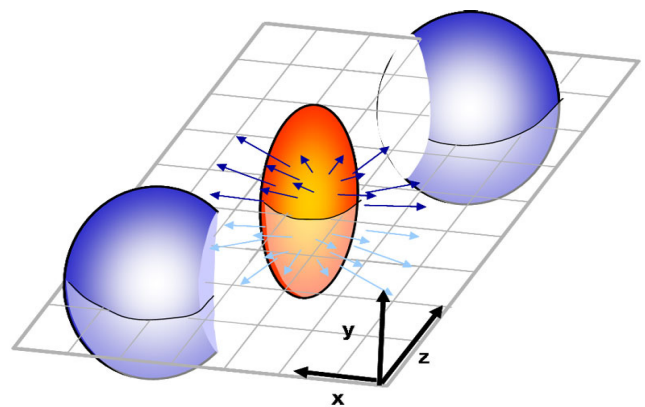
Elliptikus folyás: hidrodinamikai kép

A nehézion-ütközésekben megmért jelentős *elliptikus folyás* (a kirepülő részecskék impulzus-eloszlásának azimutális aszimmetriája), illetve ennek skálázása az egyik legmeglepőbb új eredmény volt a RHIC-nél. Ez arra utal, hogy kollektív mozgás (folyás) alakul ki, tehát – sok korábbi jóslattal ellentétben – a keletkező anyag inkább valamilyen erősen csatolt folyadék, mintsem gáz. A 6. ábra szemlélteti ezt a jelenséget: folyadék közegben a kezdeti nyomás-anizotrópia átmeny végállapotú impulzuseloszlás-anizotrópiába.

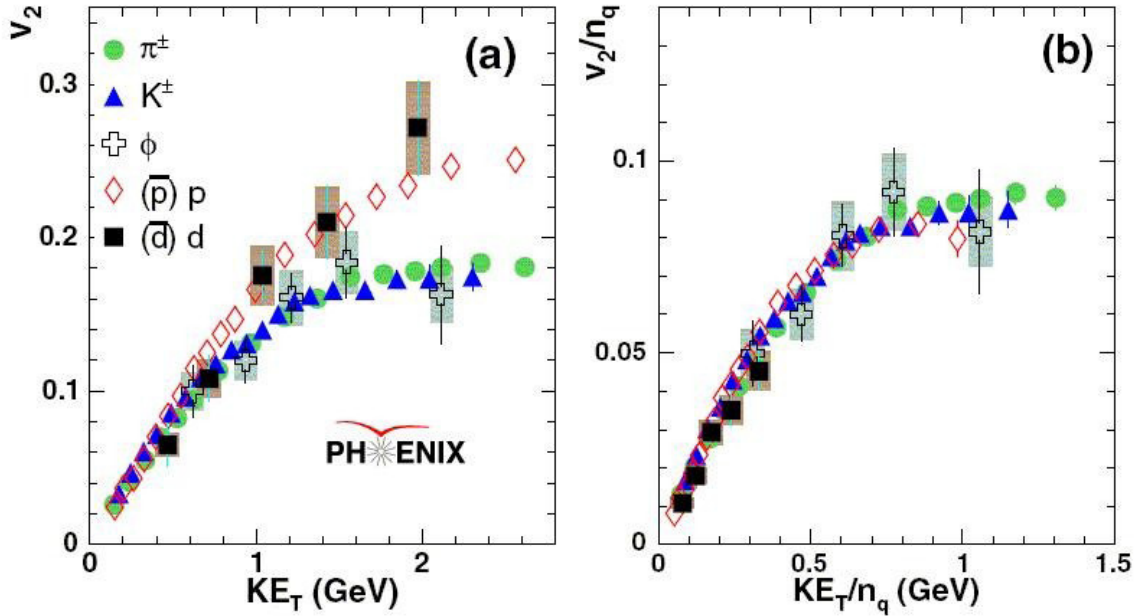
Ha azonosított részecskék elliptikus folyását mérjük a transzverzális impulzus függvényében, akkor ezek egymáshoz képesti skálázási tulajdonságai új dolgokat árulnak el. (Ehhez a méréshez a driftkamra (DC) és a PC kamrák nyújtotta precíz pálya-meghatározásra, illetve a DC által mért impulzusból és a – precíz kalibrációval optimalizált – TOF és EMC repülési idő méréseiből kapott részecskeazonosításra

van szükség. A reakciósíkot a BBC, illetve az RXP detektor határozza meg.)

A 7. ábrán különféle azonosított részecskék elliptikus folyása látható a transzverzális energia (a transzverzális impulzusból számolt relativisztikus energia) kinetikus része függvényében. A jobb oldali ábra azt mutatja, hogy ha ezt a transzverzális energiát, illetve a mért elliptikus folyást a részecskékben található kvarkok számával átskálázzuk, akkor a mért pontok közös görbére esnek függetlenül a részecsketípustól. A legérdekesebb a ritka (strange) kvarkokból álló F -mezon: az, hogy ennek is hasonló az elliptikus folyása, mint a többi hadronnak, azt jelzi, hogy a folyás kvarkszinten alakul ki, ami arra bizonyíték, hogy valóban kiszabadult kvarkok folyadékával állunk szemben [6].



6. ábra: Az elliptikus folyás jelenségének illusztrációja. Látszik a reakciózóna jellegzetes ellipszoid alakja. (Az x-y sík a reakciósík.)



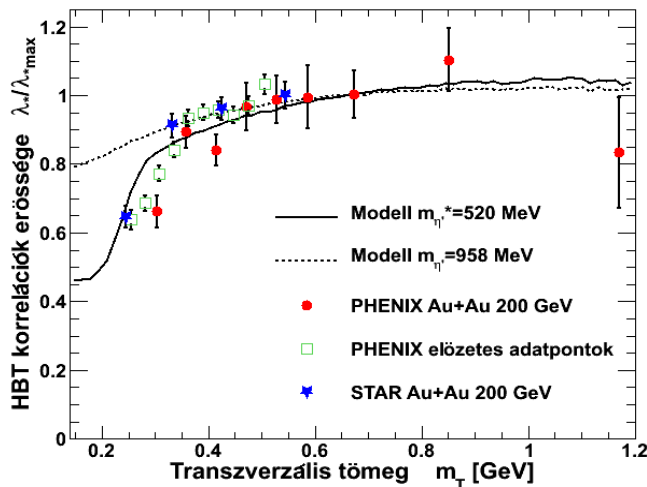
7. ábra: Különböző hadronok elliptikus folyása a PHENIX mérései alapján. A bal oldalon a mérési eredmények láthatók, jobb oldalon a kvarkszám-skálázás.

Kvantummechanikai korrelációk

A Hanbury-Brown - Twiss (HBT) effektus egy kvantummechanikai impulzustér-korreláció, amely abból ered, hogy a pionok bozonok, tehát a kétrészecske-hullámfüggvényük szimmetrikus a részecskék felcserélésére nézve, és emiatt a pionok nagyobb eséllyel jelennek meg egymáshoz közeli impulzussal. A pionok HBT-korrelációjának mérésével le lehet „tapogatni” a rendszer térbeli struktúráját. (Az elmélet alapján a korrelációs függvény lényegében a pionkeltés téridőbeli eloszlásának Fourier-transzformáltja.) A pionforrás méreteire és alakjára így kapott mérési eredmények alátámasztják az elliptikus folyás jelenségével kapcsolatosan megismert folyadékképet. A korreláció erőssége pedig a pionra bomló, a rendszer időfejlődésének időskálájánál jóval hosszabb életű rezonancia-részecskék arányára érzékeny.

A királis szimmetria és az h' mezon

Egy igen érdekes, a magyar csoport számára is nagy jelentőségű, folyamatban lévő mérés a HBT-korrelációk erősségének transzverzális impulzustól való függésének meghatározása 200 GeV-es arany-arany ütközésekben. Ez kapcsolatban van egy ritka részecskefajttával, a h' (a pionhoz és a kaonhoz hasonló, ám sokkal nagyobb tömegű) mezonnal: a várakozás szerint ez a nagy energiás ütközések során kisebb tömeggel keletkezik, és ennek jeleként a HBT-korrelációk erőssége kis p_T -nél lecsökken. A h' nagy tömege ugyanis a QCD vákuumának nemtriviális struktúrájából származik, ami a várakozások szerint eltűnik a forró közegben (helyreáll a QCD ún. királis szimmetriája). Ezért ez a tömegcsökkenés végülis a QCD vákuumának a fázisátmenet során bekövetkező változására utalhat. A 8. ábrán egy ilyen mérés eredményeit láthatjuk [7].



8. ábra: STAR és PHENIX mérések a HBT-korrelációk erősségének transzverzális impulzustól való függésére. A legvalószínűbb közegbeli tömeghez tartozó modell-számítást a folytonos, a 958 MeV-es tömeghez tartozót a szaggatott vonal mutatja.

Szimulációink szerint az h' vákuumbeli (958 MeV-es) tömegének erőteljes, legalább ~ 200 MeV-es csökkenése szükséges az adatok megfelelő leírásához [8]. (Elméleti várakozások szerint szinte minden hadron tömege módosulhat az erősen kölcsönható, forró hadronanyagban, de tudomásunk szerint ez az első, egy adott hadron tömegének jelentős megváltozására utaló kísérleti jel.) Az állításunk pontosításához azonban a mérések folytatására, a h' más bomlási csatornáinak vizsgálatára, további részletek tisztázására van szükség.

Kitekintés

Noha – jelentős részben a RHIC, azon belül a PHENIX kísérlet mérései alapján – most már sok mindent tudunk a kvarkanyagról, még bőven vannak felderítetlen területek. Az elkövetkező években a CERN-LHC várhatóan átveszi a részecske- és nehézionfizika frontvonalbeli kutatását, legalábbis ami az ütközési energiát illeti, azonban várható, hogy a RHIC, azon belül a PHENIX megtartja élvonalbeli szerepét. A RHIC – mivel egyedülálló módon képes polarizált protonok ütköztetésére is – a részecskefizikai alap kutatásban mindenképpen nélkülözhetetlen lesz. A nehézion-fizika területén is számos olyan kérdés van, amelynek megválaszolására az LHC kevésbé alkalmas. Talán

a legfontosabb ilyen a kvarkanyag-hadronanyag fázisátmenet kritikus pontjának megtalálása (lásd a 2. ábrát). Erre a PHENIX-ben is indul kísérleti program, melynek fő eleme a fázisdiagramnak az ütközési energia variálásával (csökkenésével) történő feltérképezése. Ezen célok hatékonyabb megvalósítását is szolgálja a nagyszabású RHIC-II program, amely többek közt a gyorsító luminozitásának növelését célozza. A következő 10-15 évre már készen áll a fejlesztések és kutatások stratégiai terve. Várható tehát, hogy az elkövetkező évtizedekben is a nagy részecskefizikai kísérletek egészséges versengése vezet minket a természet törvényeinek alaposabb megértése felé.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki a PHENIX együttműködés tagjainak, a magyar PHENIX csoportnak. Kutatási munkánkat az OTKA T49466 és NK73143 pályázatok, a Fulbright Magyar-Amerikai Oktatási Csereprogram és a PHENIX kísérlet támogatja. A RHIC gyorsító és a PHENIX kísérleti berendezés létesítését és üzemeltetését az USA Energiaügyi Minisztériuma finanszírozza. Minden további támogatónk fogadja hálás köszönetünket. A PHENIX kutatásait támogató szervezetek teljes felsorolását [3] tartalmazza.

Irodalomjegyzék

- [1] Edward V. Shuryak: *Quantum chromodynamics and the theory of superdense matter*; *Phys. Rept.*, 61:71–158, 1980.
- [2] K. Adcox et al. (PHENIX Collaboration): *Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration*; *Nucl.Phys.A757:184-283, 2005.*
- J. Adams et al. (STAR Collaboration): *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.A757:102-183,2005.*
- B. B. Back et al. (PHOBOS Collaboration): *The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC*; *Nucl.Phys.A757:28-101,2005.*
- I. Arsene et al. (BRAHMS Collaboration): *Quark gluon plasma and color glass condensate at RHIC? The Perspective from the BRAHMS experiment*; *Nucl.Phys.A757:1-27,2005.*
- [3] <http://phenix.elte.hu>
- [4] K. Adcox et al. (PHENIX Collaboration): *Suppression of hadrons with large transverse momentum in central Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=130$ GeV*; *Phys.Rev.Lett.88:022301,2002.*
- [5] S. S. Adler et al. (PHENIX Collaboration): *Centrality dependence of direct photon production in $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Au+Au collisions*; *Phys.Rev.Lett.94:232301,2005.*
- [6] S. Afanasiev et al. (PHENIX Collaboration): *Elliptic flow for phi mesons and (anti)deuterons in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV*; *Phys.Rev.Lett.94:232301,2005.*
- [7] S. S. Adler et al. (PHENIX Collaboration): *Bose-Einstein correlations of charged pion pairs in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV*; *Phys.Rev.Lett.94:232301,2005.*
- [8] R. Vértesi, T. Csörgő, J. Sziklai: *Significant in-medium h' mass reduction in $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Au + Au collisions*; *Nucl.Phys.A830:631C-632C,2009.*