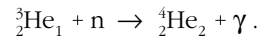


2. ábra. A legősibb atommagok gyakorisága. A függőleges tengelyre az előforduló ${}^2\text{He}_2$, ${}^3\text{He}_1$, ${}^1\text{H}_1$ és ${}^7\text{Li}_4$ atommagok tömegaránya van felmérve százalékban, a ${}^1\text{H}_1$ atommagra vonatkoztatva. A vízszintes tengelyen a számításoknál használt η paraméter értéke látható, ahol η a barionok és a fotonok számának az arányát jelenti.

A keletkező triton (${}^3\text{H}_2$) radioaktív mag, béta-bomlással átalakul ${}^3\text{He}_1$ maggá. A ${}^3\text{He}_1$ neutronbefogással átalakul ${}^4\text{He}_2$ maggá:



Azt gondolhatnánk, hogy a ${}^4\text{He}_2$ magnál bonyolultabb atommagok is képződhetnek. Ez azonban igen valószínűtlen, mert sem az ${}^5\text{He}_3$, sem a ${}^6\text{Li}_3$ atommag nem tud tartósan létrejönni, mert ha egy pillanatra ki is alakul, nukleonkibocsátással azonnal elbomlik. Legfeljebb még az történhet meg, hogy a ${}^4\text{He}_2$ befog egy ${}^3\text{H}_2$ -t és így ${}^7\text{Li}_4$ atommaggá alakul át, amely stabil. Ennek a valószínűsége viszont nagyon kicsi. Azok a neutronok, amelyek nem tudták magukat átmenteni stabil atommagokban keresve menedéket, elbomlanak, és így örökre eltűnnek. Hogy mennyi neutron marad meg a stabil magok fedezékében, az három dolgon múlik. Az egyik a neutron regenerálódásának a valószínűsége, a másik a neutron befogási valószínűsége, és végül a harmadik, a neutron bomlási valószínűsége. Az első két valószínűség a hőmérséklet csökkenésével együtt rohamosan csökken, míg a harmadik a hőmérséklettől gyakorlatilag független. A számítások eredményét a 2. ábrán mutatjuk be. Figyelemre méltóak az előfordulási gyakoriságok közötti, sok nagyságrendet kitevő különbségek. Az ősi atommagok gyakoriságának mért értéke jól egyezik az elméleti számítások eredményével. Ez volt a Táguló Univerzum Modelljének első sikere.

Befejezésképpen egy viszonylag új fejleményt említünk meg. Egy évtizeddel ezelőtt nagy pontossággal megmérték a neutron bomlási valószínűségét. Ez lehetővé tette, hogy meghatározzák a különböző neutrínók számát, ami 3-nak adódott. Ebből pedig az következik, hogy a részecskefizika standard modelljében szereplő részecskecsaládok száma is 3. Ez összhangban van minden eddigi tapasztalattal.

MAGYAR KUTATÓK RÉSZVÉTELE A PHENIX-KÍSÉRLETBEN – avagy hogyan csináljunk atommagból ősi-új anyagot?

Csőrgő Tamás
MTA KFKI RMKI

*Nehézionok:
új anyagot szétcsapó,
öklető bikák.*

*T.D. Lee Nobel-díjas fizikus verse,
a szerző fordításában*

A világ fizikusai nagy érdeklődéssel fogadják a nehézionfizika legnagyobb energiájú gyorsítóberendezésének, a Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumban (BNL, New York, USA) található Relativisztikus Nehézion-Ütköztető, angol

A *Fizikai Szemle* 2003/10. „CERN-szám”-ának folytatásaként közöljük a jelen írást.

mozaikszóval a RHIC (ejtsd rik) legújabb eredményeit. Ugyanis a RHIC arany–arany nehézion-ütközéseinek tanulmányozásával feltárulhat előttünk az anyag jelenlegi kísérletekben tanulmányozható legősibb formájának szerkezete. Az eredmények alkalmazhatóak az atommagok fizikájában, választ adva arra a kérdésre, hogy milyen módon változik a nagy sebességre felgyorsított

atommagokban a protonok és a neutronok felépítése. A RHIC mérései lényeges hozzájárulást adnak a részecskefizikához is, ugyanis a RHIC külön programot indított a polarizált, azaz meghatározott irányban pörgő protonok ütközéseinek tanulmányozására is. Ezzel választ lehet kapni arra az alapvető kérdésre, hogy miként is épül fel a protonok és a neutronok perdülete (szakszóval spinje), és hogy milyen nagy ebben a protonok alkotórészeinek, a kvarkoknak és a gluonoknak hozzáadéka, és ezen felül a virtuális részecske–antirészecske-párok „felbukkanásából és elmerüléséből” álló kvark–gluon-tenger járuléka. Fontosak az eredmények az asztrofizika számára is, a kvarkokból és gluonokból álló anyagok ugyanis megjelennek a legsűrűbb neutroncsillagok belsejében is, és hatást gyakorolhatnak a fekete lyukak kialakulásának körülményeire. Érdekesekek a RHIC mérései a Világegyetem történetét tanulmányozó kozmológusok számára is, mivel a RHIC az első olyan ember által épített eszköz, melynek segítségével az anyagot olyan körülmények között lehet tanulmányozni, amilyenek korábban csak az Ősrobbanás utáni szempillantásban, az első néhány mikroszekundumban léteztek. Sajátos matematikai tulajdonságai (nem-ábeli mértékelmélet) miatt az erős kölcsönhatás fizikáját leíró kvantum-színdinamika (QCD) halmazállapotainak kísérleti tanulmányozása még a szilárdtestfizikusok, a statisztikus fizikával és a termodinamikával foglalkozó kutatók számára is érdekességet jelent. Talán ez indokolja azt a fokozott érdeklődést is, amit az eredmények iránt a nemzetközi és a hazai tudományos népszerű újságírás is tanúsít.

Ahhoz, hogy képet alkothassunk magunknak a nehézion-fizika jelenlegi kísérleti élvonaláról, hasznos felidézni a New York melletti Long Islanden, a Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumban létrehozott RHIC-gyorsító néhány érdekese tulajdonságát. A RHIC-gyorsító 3,8 km kerületű gyűrűje jól látszik azokon az űrfelvételeken, melyek a gyorsító alagútjának kimélyítésekor készültek. Ebben a 3,6 m-rel a föld felszíne alatt futó alagútban két, közel kör alakú tárológyűrűben történik a nehézionok gyorsítása. A kék és a sárga jelzésű gyűrűben egymással ellentétes irányba futva, szupravezető mágnesek által terelve és elektromágneses hullámok által gyorsítva sok kör lefutása után érik el a nehézionok a kívánt végsebességet és lendületet. Mivel mind az 1740 szupravezető mágnesben ellenállás nélkül folyik az áram, nagy áramerősséget és igen erős mágneses teret lehet előállítani, így a gyorsítás után a nehézionok végsebessége nagyobb, mint bármely más nehézion-gyorsítóban. Azonban a szupravezetés létrehozásához a mágneseket igen alacsony hőmérsékleten, az abszolút nulla fok közelében, 4,5 K azaz a $-268,5$ °C alatt kell tartani, amihez folyékony héliummal való folyamatos hűtés és igen jó hőszigetelés szükséges. A gyorsított nyaláb nem folyamatos, hanem szaggatott, nehézioncsomagokból áll. A nehézion-ütközések akkor jönnek létre, amikor két ellentétes irányban haladó csomag átszeli egymást, és ennek során a két csomagból



1. ábra. A PHENIX-együttműködés kutatóinak egy része, háttérben a PHENIX-kísérlettel.

egy-egy, ellentétes irányban száguldó nehézion egymásnak csapódik. Az így létrejövő ütközés során a nehézionok összenyomódnak és felhevülnek. A létrejövő forró és összenyomott anyag kitágul és lehűl, majd amikor kellően ritkává és az erősen kölcsönható részecskék számára átlátszóvá, kölcsönhatás nélkülivé válik, a részecskék lendülete nem változik többé, azaz az anyag kifagy. A kísérletekben a kifagyás környéki hőmérséklet mérhető viszonylag egyszerűen. Még ebben a viszonylag hideg, kitágult állapotban is igen magas, átlagosan mintegy 110 MeV, azaz valamivel több mint 10^{12} (azaz 1 billió!) K hőmérséklet határozható meg a végállapotbeli részecskék sebességeloszlásából. Az elméleti várakozások szerint a protonokat és a neutronokat akkor lehet megolvasztani és kvarkokból és gluonokból álló plazmává alakítani, ha a hőmérséklet a reakció kezdeti szakaszában meghaladja a 170 MeV-et, ami mintegy 2 billió K-nek felel meg. Ez a hőmérséklet több mint 10^4 -szer nagyobb, mint a Nap központi hőmérséklete, a 16 millió K. Egyelőre még nincsen közvetlen bizonyítéka annak, hogy a RHIC nehézion-ütközései során sikerült-e elérni ezeket a hőmérsékleteket. Az azonban biztos, hogy ha el is lehet érni, akkor is csak igen rövid ideig lehet ezt a hőmérsékletet fenntartani. Ugyanis az erősen összenyomott állapotban keletkező anyag hirtelen kitágul és lehűl, kölcsönhatásmentessé, „kifagyottá” válik, a jelenlegi mérések szerint mintegy $2-3 \times 10^{-23}$ másodperc alatt. Ez az idő, 20–30 yoktoszekundum, roppant kicsi. Míg a fényjel 1 másodperc alatt a Föld egyenlítőjénél mintegy hét és félszer hosszabb távolságot tesz meg vákuumban, a nehézion-fizikai reakciók kifagyási ideje alatt egy ilyen fényjel csupán akkora távolságot tud megtenni, mint amekkora a legnagyobb atommagok sugara.

A RHIC-gyorsító által létrehozott nagyenergiás nehézion-ütközésekben több ezer végállapotú részecske keletkezik. A reakcióban keletkező anyag vagy anyagok tulajdonságait ezen részecskék észlelésével, négy nagy kísérleti berendezés segítségével tanulmányozzák a fizikusok. A keletkezett részecskék számának, fajtájának, lendületének eloszlásával és keletkezésük egymástól való függésé-



2. ábra. A PHENIX-együttműködésben résztvevő országok a világ térképén.

nek, a korrelációknak tanulmányozásával próbálunk következtetni arra, hogy létrejött-e ezekben az ütközésekben egy közegként viselkedő anyag, és ha igen, akkor ez milyen tulajdonságokkal jellemezhető.

A RHIC kék és a sárga jelzésű gyorsítógyűrűje hat helyen metszi egymást. Ha a gyorsítót fölülnézetben egy óra számlapjához hasonlítjuk, a páros óráknak megfelelő helyeken vannak a metszéspontok. Két metszéspontot, a 12 és a 4 órát a nyaláb vizsgálatára használnak fel, a másik négy metszéspontot foglalják el a kísérletek: 2 óránál található a BRAHMS nevű spektrométer, 6 óránál a STAR-detektor, 8 óránál a PHENIX, 10 óránál pedig a PHOBOS elnevezésű mérőberendezés. A négy detektor tulajdonságai részben kiegészítik, részben pedig átfedik egymást, így a tervezés szerencsés volta és a kivitelezés sikere nem csak azt tette lehetővé, hogy független kísérletekben ellenőrizhessék egymás eredményeit, hanem a detektorok egyedi tulajdonságai alapján egyfajta nemes vetélkedés is megindulhatott közöttük az ütközésben lezajló folyamatok részleteinek feltárásában.

Tekintsük röviden át ezeket, a mai kísérleti nagyenergiás részecske- és magfizika világszínvonalát meghatározó mérőeszközöket.

A BRAHMS-detektort létrehozó és működtető együttműködésben 6 ország 12 kutatóintézetének és egyetemének 52 kísérleti fizikusa vesz részt. Ez a berendezés kis térszöveget lát be, de forgatható, és a kiválasztott tartományban nagyon precízen képes meghatározni a részecskek impulzusát és korrelációit. A négy kísérlet közül a BRAHMS képes arra, hogy az ütköző nehézionok sebességéhez közeli nyalábirányú sebességgel (rapiditással) mozgó végállapotú részecskéket is detektáljon.

A PHENIX-együttműködésben 12 ország 57 kutatóintézetének mintegy 460 kutatója vett részt eddig összesen, ez a berendezés a legnagyobb súlyú kísérlet a RHIC-nél, mintegy 3000 tonna, méretei egy kétemeletes családi ház nagyságához hasonlóak. A többi három detektortól eltérően a PHENIX alkalmas az igen könnyű és nagy áthatoló-képességű leptonok, például a müonpárok eloszlásainak meghatározására, valamint a plazmában keletkező, direkt fotonok eloszlásainak vizsgálatára, melyek a reakció leg-sűrűbb és legforróbb zónájából is akadálytalanul, további kölcsönhatástól mentesen hírt tudnak hozni. Emellett a

PHENIX képes az erősen kölcsönható részecskékre, a hadronok azonosítására és spektrumaiknak, korrelációinak megmérésére is. Ebbe az együttműködésbe kapcsolódtak be intézményes formában magyar kutatók, a Debreceni Egyetem, az ELTE Atomfizikai Tanszék és a KFKI Részecske- és Magfizikai Kutató Intézet munkatársai.

A STAR-kísérlet a PHENIX mellett a RHIC-gyorsító másik nagy mérőberendezése, melyet 10 ország 39 kutatóintézetének 310 kutatójából álló együttműködése üzemeltet, súlya 1200 tonna, nagysága szintén egy 2 emeletes családi ház mérete. Specialitása az erősen kölcsönható részecskék fajtájának, számarányainak, impulzuseloszlásának és korrelációinak vizsgálata, a nyalábra merőlegeshez közeli irányokban, e merőleges sík teljes polár-szögében.

A PHOBOS-kísérlet a legkisebb fizikai méretű a négy RHIC-detektor közül, (elférne egy nagyobb íróasztalon), ebből fakadóan ez a berendezés volt a leggyorsabban üzembe helyezhető, és a PHOBOS publikálta az első cikket a RHIC-gyorsító méréseiről. Mindössze 3 ország 8 kutatóintézetének és egyetemének 107 kutatója vett részt a berendezés megalkotásában és üzemeltetésében. A cambridge-i Massachusetts Institute for Technology (MIT) munkatársaként a magyar Veres Gábor igen lényeges hozzájárulást adott a PHOBOS-detektor kibővítéséhez, a deuteron–arany ütközések vizsgálatára való felkészítéséhez, de ebben a kísérletben a hazai részvétel – legalábbis egyelőre – még nem intézményesült.

Magyar részvétel

2003. január 31-én együttműködési nyilatkozat rögzítette három magyar intézmény (a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Tanszéke, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Atomfizikai Tanszéke és az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutató Intézete) csatlakozását a RHIC-gyorsító PHENIX-kísérletéhez. Ennek alapján a fenti intézmények kutatói egyenjogú félként kapcsolódhattak be a PHENIX-kísérlet munkájába, és a magyar intézmények résztvevő félként kerülhettek fel a PHENIX-publikációkra. Itt hadd említsem meg például azt, hogy Ster András a KFKI RMKI kiküldetéseiben dolgozott a témán, de két évig csupán, mint egyéni résztvevő szerepelhetett a PHENIX-publikációin: lábjegyzetben közölték, hogy a KFKI RMKI még nem hivatalos résztvevője a kísérletnek. Az olvasó számára ez talán még kukacoskodásnak is tűnhet, azonban tudnia kell, hogy egy ilyen kísérlet irgalmatlan erőfeszítések, 300–400 ember 10–12 éves előkészítő munkája után jön létre, ezért a később csatlakozóknak meg kell dolgozniuk a befogadásukért. Tény, hogy a magyar intézetek csak az együttműködési nyilatkozat aláírása után kerültek fel a kísérletekről szóló közleményekben a résztvevő intézmények közé. Ez tehát nem független attól, hogy már korábban is értékes egyéni hozzájárulást adott, komolyan és vígan dolgozott a PHENIX-méréseken több, különösen debreceni, magyar kutató. Úgy látom, hogy a csatlakozás lehetőséget teremtett a magyar fizikushallgatók és diákok számára arra is, hogy bekapcsolódhassanak a világ vezető kísérleti laboratóriumában

végzett nehézion-fizikai kutatásokba: ebből a témából itthon is megírhatják diplomamunkájukat vagy doktori disszertációjukat anélkül, hogy közben évekre el kellene hagyniuk hazájukat, bár a néhány hónapos kinntartózkodásokat a munka jellege mindenképpen indokoltá teszi.

Az együttműködési nyilatkozat aláírásával több éves, két szálon futó előkészítő munka gyümölcse érett be.

Az előkészítésben az egyik kezdeményező szerepet *Dávid Gábor*, magyar származású amerikai fizikus, a Brookhaveni Nemzeti Laboratórium (BNL) munkatársa játszotta, aki a kutatási téma kezdetétől, azaz a kísérlet megépítésére beadott pályázatok megírásától, 1989-től résztvevő a PHENIX-kísérletben, csoportvezető és a részecskesugarak elnyomásának kísérleti szakértője. Ennek egyik megnyilvánulása az, hogy Dávid Gábor 19 PHENIX analízisjegyzet és 6 technikai jegyzet (belső munkaanyagok) társszerzője, és több PHENIX cikk-előkészítő csoport munkatársa. A szakterület világkonferenciáján, a *Quark Matter* (Quark Matter) konferenciasorozaton a PHENIX eredményeit ismertető plenáris előadó. 1996-tól – sok esetben saját szabadsága és költsége terhére – évente hazalátogat, hogy előadásokat, intenzív kísérleti kurzusokat tartson a Debreceni Egyetemen. Az általa kinevelt magyar diákok igen elismertek a PHENIX-kísérleten belül, különösen *Tarján Péter*, a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Tanszékének doktorandusza. A debreceni csoport tagjai részt vettek a semleges pionok spektrumának meghatározásában, ami az Au+Au ütközésekben a részecskesugarak elnyelődésének kísérleti észleléséhez vezetett. A 2003-ban elvégzett ellenőrző mérések szerint a részecskesugarak a jóval kisebb méretű deuteronnak arany magokkal történő (d+Au) ütközéseiben nem nyelődnek el. E két mérés eredményeinek egybevetéséből következik, hogy az Au+Au ütközésekben létrejött egy olyan sűrű és ragacos anyag, amely képes arra, hogy elnyelje az elméleti számítások, a perturbatív QCD által megjósolt nagyenergiájú részecskesugarak energiáját. Ebben a nagy jelentőségű kísérleti felfedezésben Dávid Gábor vezető szerepet játszott a PHENIX-kísérleten belül. *Tarján Péter* doktorandusz teljes erővel a PHENIX-kutatásain dolgozik, fizikailag is Brookhavenben tartózkodik. Kezdeményező szerepet tölt be a PHENIX-es fiatal kutatók között, több kísérleti munkaanyag, 3 belső analízisjegyzet és egy technikai jegyzet társszerzője. *Veszprémi Viktor*, aki szintén a Debreceni Egyetem doktorandusza, két kísérleti analízisjegyzet és egy technikai jegyzet, PHENIX-es munkaanyag társszerzője. Fontos hozzájárulásai közül ki szeretném emelni az úgynevezett „aranytáblás” események kiválasztásában, az ólom-szcintillátor (PbSc) kaloriméter kalibrációjában és adatainak feldolgozásában, a semleges pionok spektrumának meghatározásában való részvételüket, mely eredményt a PHENIX a *Quark Matter 2002* konferencián bemutatta. A debreceni kutatók a PHENIX perturbatív QCD alkalmazásaihoz kapcsolódó „foton” és „hard” munkacsoportjának kutatásaiban vesznek részt.

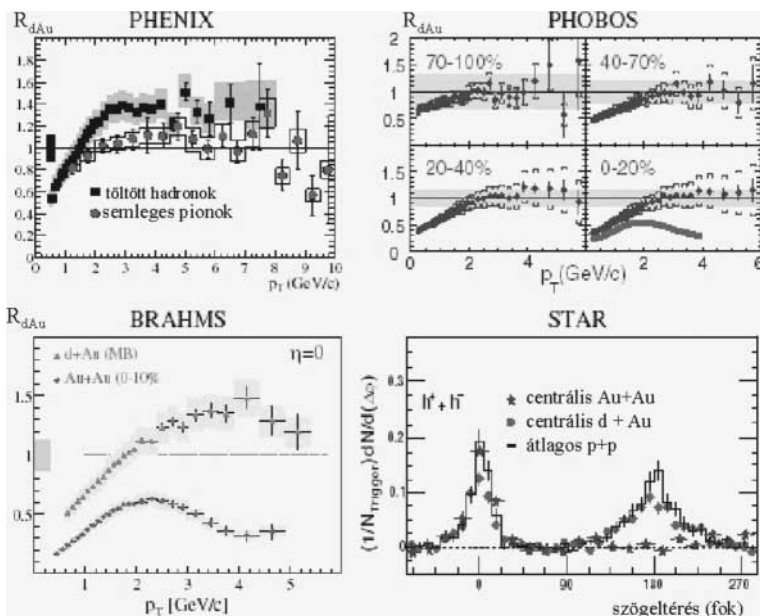
A PHENIX–Magyarország együttműködés szervezőjeként, a kísérleti együttműködés intézményesítésének kialakítójaként a szerző indította el az együttműködés másik, budapesti szálát. 1996-tól Világbanki OTKA-pályázzal ösztöndíjas volt a New York-i Columbia Egyete-

men, majd ugyanott Fulbright Advanced Research Award nyerteseként kutatói ösztöndíjas is, fogadója mindkét esetben *Gyulassy Miklós*, aki a Columbia Egyetem magyar származású professzora, és a nehézion-fizika világhírű elméleti szakértője. A szerző elméleti tevékenysége mellett együttműködést alakított ki *W.A. Zajccal*, a PHENIX-kísérlet tudományos vezetőjével, a Columbia Egyetem professzorával, aki 1998-ban Magyarországra látogatott, a KFKI Részecske- és Magfizikai Kutató Intézetben és az ELTE-n találkozott a PHENIX iránt érdeklődő kísérleti és elméleti kutatókkal. E látogatás után a PHENIX Ügyvezető Tanácsa (Executive Council) jóváhagyta, hogy megindulhasson az előkészítő munka a magyar kísérleti fizikuscsoport csatlakozására. *W.A. Zajccal* és *Zimányi Józseffel* 1998-tól több pályázatot adott be a PHENIX-hez történő csatlakozás anyagi háttérének megteremtésére. 2000-tól indult be az első sikeres OTKA-téma ezen a területen *Zimányi József* témavezetésével, majd 2001-től egy újabb OTKA-pályázat nyert a szerző témavezetésével. Aktív támogatói közül kiemelkedik *Gyulassy Miklós* professzor, aki közben elnyerte az MTA külső tagja címet is, és aki az első lépésektől folyamatosan segítette a PHENIX–Magyarország együttműködés kialakítását, és támogatta a kutatási program beindítását.

Mostanáig pályázati forrásokból sikerült biztosítani az együttműködés anyagi háttérét. A PHENIX-kísérlet során a magyar kutatók részvétele a nullafoki kaloriméter szoftverrendszerének és kalibrációjának, a semleges pionok lendületeloszlása és spektruma feldolgozásának, a kvantumstatistikus korrelációs mérések kiértékelésének területére koncentrálódik. A szerző 2002 júliusában előadást tartott a PHENIX Institutional Board (IB) előtt a párizsi PHENIX-kollaborációs összejövetelen, ahol ismertette a magyar kutatók által eddig elvégzett munkát, a csatlakozni kívánó magyarországi csoportokat, és kérte a KFKI RMKI, a Debreceni Egyetem és az ELTE kutatócsoportjainak a felvételét a PHENIX-be, majd válaszolt az IB-tagok kérdéseire és megjegyzéseire. Ezek után a PHENIX IB a PHENIX–Magyarország együttműködést egyhangú szavazással befogadta az együttműködők körébe.

A PHENIX–Magyarország együttműködést az IB-ben az alábbi személyek képviselik: *Csörgő Tamás* tudományos tanácsadó (KFKI RMKI), *Kiss Ádám* egyetemi tanár (ELTE Atomfizikai Tsz.) és *Tarján Péter* doktorandusz (Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Tsz.). Az együttműködés kereteit szabályozó memorandum szövegét 2003. január 31-én írta alá *W.A. Zajc*, a PHENIX tudományos vezetője, *E. O'Brian*, a PHENIX-operációk vezetője, *S.H. Aronson*, a BNL Fizikai Főosztály vezetője, *Szőkefalvi-Nagy Zoltán*, akkor az MTA KFKI RMKI tudományos igazgatóhelyettese, jelenlegi igazgatója, *Zimányi József*, a KFKI RMKI tudományos tanácsának elnöke, *Csörgő Tamás*, a PHENIX–Magyarország témavezetője, *Patkós András*, az ELTE Atomfizikai Tanszék mb. tanszékvezetője és *Pálinskás József*, a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Tanszék vezetője.

A PHENIX–Magyarország együttműködés felépítésének keretében *Ster András*, a nullafoki kaloriméter (ZDC) magyar szakértője, mint egyéni résztvevő, csatlakozott elsőként magyarországi magyarként a PHENIX-kísérlethez, a



3. ábra. A PHENIX bal felső ábrán látható mérési eredménye szerint a d+Au ütközésekben a töltött hadronok is hasonló arányban keletkeznek, mint a proton–proton ütközésekben. Alatta látható a BRAHMS ezt megerősítő mérési eredménye, kisebb transzverz impulzustartományban. Ezen ábra alsó részén látható az Au+Au mérési eredménye is, amely a hadronok keltésének, a részecske sugaraknak az elnyomását jelzi ebben a reakcióban. A jobb felső sarokban a PHOBOS eredménye jelzi, hogy a frontális és a kevésbé frontális d+Au ütközések hasonlóak egymáshoz, és hogy egyikben sem keletkezik a részecskesugarakat elnyelő, ragacsos anyag. Végül a jobb alsó sarokban a STAR-kísérlet mérési eredménye azt jelzi, hogy a reakcióból kifelé, a legnagyobb transzverzális lendületű részecske által kijelölt 0 fok felé induló részecskesugarak hasonlóan viselkednek az elemi p+p, az összetettebb d+Au és a legfrontálisabb Au+Au ütközésekben is, minden esetben a mintegy 20 fokos nyílásszögű kúpon belül maradnak. Azonban a közegen teljesen áthaladó, 180 foknál kilépő részecskesugarak másképpen viselkednek az Au+Au ütközésekben, mint a p+p és a d+Au ütközésekben. Míg a p+p és a frontális d+Au ütközésben is megmaradnak a mintegy 30 fokos nyílásszögű kúpon belül, a frontális Au+Au ütközésekben ez a sugár teljesen elnyelődik, fókuszált részecskekeltés nem tapasztalható, mivel hiányzik a 180 foknál mérhető csúcs.

KFKI Részecske- és Magfizikai Kutató Intézet színeiben. Ster elkészítette a PHENIX ZDC (Geant) szimulációs kódját, és integrálta azt a PHENIX integrált szimulációs környezetébe (PISA). Továbbfejlesztette a ZDC off-line és online kalibrációs kódjait, és részt vett az adatfelvételen a mérések beindulása óta. A cikk írójával együtt egy PHENIX-es belső analízisjegyzet társszerzője, akivel a PHENIX kétrészecske Bose–Einstein-korrelációs analízis témakörében több előadást is tartottak a PHENIX belső munkacsoportjaiban. Hidas Pál 2002-től lépett be a KFKI RMKI PHENIX-csoportjába. Három hónapot töltött Brookhavenben, az átlagosnál nagyobb részt vállalt az adatok felvételében, fejlesztette a ZDC on-line kalibrációs kódját. A cikk szerzője Hidas Pállal és Ster Andrással együtt bekapcsolódott a PHENIX-cikkek belső vitáiba, számos javítást, pontosítást eszközöltek a publikációk megjelenése előtt.

Az ELTE Atomfizikai Tanszéke munkatársai közül Kiss Ádám tanszékvezető, Deák Ferenc kutató és Csanád Máté diplomamunkás kapcsolódott be idáig a PHENIX adatfelvételi munkáiba. Csanád Máté részt vett a ZDC on-line monitoring programjának fejlesztésében, teljesítette a „ZDC Subsystem Service” szolgálati előírásait, több javítást eszközölt belső, előkészületi PHENIX-cikkeken.

A PHENIX–Magyarország tudományos együttműködés nyitott további kutatók, doktoranduszok és diplomamun-

kát író fizikus- és mérnökhallgatók befogadására. Azt is hangsúlyozni szeretném, hogy fontos célnak tartom a mérési adatok feldolgozásában, kiértékelésében való részvételünk elmélyítését, azért hogy magyar kutatók által végzett munka lehessen majd évente egy-két PHENIX-közlemény kiinduló pontja, bekerüljünk a közleményeket előkészítő bizottságokba. Fontos célnak tartom, hogy a témán dolgozó, PhD-fokozatot szerző fiatal kutatók legalább két PHENIX-közlemény előkészítéséhez járuljanak lényegesen hozzá fokozatuk megszerzéséig. Fontosnak tartom azt is, hogy lehetőleg ne csupán a kísérleti munkához értsenek jól (bár önmagában ez is óriási kihívás), hanem elméleti alapokkal is rendelkezzenek, és az adatok értelmezéséhez a kísérleti teljesítmény mellett legalább egy-egy elméleti jellegű közleménnyel is hozzájáruljanak doktori fokozatuk megszerzése előtt.

Eredmények

A legnagyobb presztízsű fizikai szakfolyóirat, a *Physical Review Letters* 2003. augusztus 15-én címlapfotóján közölte a négy RHIC-kísérlet legújabb eredményeit. A PHENIX-, a STAR-, a PHOBOS- és a BRAHMS-kísérlet egybecsengő mérései közvetett bizonyítékot adnak egy igen ragacsos, ősi-új anyag kísérleti előállításáról a RHIC arany+arany nehézion-ütközéseiben, valamint arról, hogy ez az anyag a deuteron+arany ütközésekben nem jön létre. Ezeket az eredményeket, és az értelmezésüket a 3. ábra ismerteti. Az elméleti számítások szerint [16] egy részecskének 20 GeV-es energiával kell rendelkezni ahhoz, hogy ebben a közegben, mintegy 5 fm hosszú úton lefékeződve 5 GeV-es végállapotú, megfigyelhető energiája maradhason, tehát mintegy 3 GeV energiát veszít femtométerenként. Mivel egy GeV = $1,6 \times 10^{-10}$ J és 1 fm = 10^{-15} m, ez a fékeződési ráta hétköznapi körülmények között alkalmazva elég lenne ahhoz, hogy egy 100 km/óra sebességgel száguldó, 650 kg tömegű személygépkocsit 1 m hosszú fékúton megállítson. Ez az oka annak, hogy a keletkezett anyag igen ragacsos, hasonlóan magas fékeződési rátát még nem észleltünk korábban a nagyenergiás nehézion- és részecskefizikában.

A PHENIX-együttműködés eddig 20 referált fizikai szakfolyóiratban megjelent tudományos közleményt publikált, melyek közül 15 a *Physical Review Letters*-ben jelent meg, a dolgozatok témája a RHIC Au+Au ütközéseiben keletkező részecskék számának és energiaeloszlásának vizsgálata, az azonosított részecskék keletkezésének függése az ütközések frontálisságától, a pionpárok korrelációinak, intenzitás-interferenciáinak vizsgálata, az elektroneloszlás mérése, a töltéseloszlás, valamint a transzverz impulzus és az energia fluktuációinak, ingadozásainak vizsgálata, a transzverz irányú elliptikus folyás meghatározása, valamint a Λ - és anti- Λ -részecskék eloszlásai-

nak meghatározása, a részecskesugarak elnyelésének fel-fedezése, a semleges pionok nagy transzverz impulzusú eloszlásainak meghatározása arany–arany valamint proton–proton ütközésekben, a bájos kvark–antikvark kötött állapotok, a J/ψ mezonok keltésének meghatározása arany–arany reakciókban, a protonok és az antiprotonok skálaviselkedéseinek tanulmányozása, valamint a részecskesugarak elnyelődésének hiánya a deuteron–arany ellenőrző kísérletben. Ezekbe a kutatásokba a magyar kutatók egyenjogú félként kapcsolódhattak be. Azt is érzékeltetni szeretném azonban, hogy a PHENIX-kísérlet sikeréhez az egész világra kiterjedő, globálisnak nevezhető, rendkívüli mértékű összefogásra és együttműködésre, mintegy 400 kutató 10 éves előkészítő munkájára volt szükség, melyben a vezető szerepet nem a magyar kutatók játszották, és a kísérlet sikeréhez szükséges anyagi áldozatok sem elsősorban a magyar adófizetőket terheltek. Mégis, az ütközések centralitásának meghatározása, melyben magyarok is fontos szerepet játszottak, számos kísérleti eredmény értelmezéséhez szükséges. Az egyik legérdekesebb eredmény, a részecskesugarak elnyelődése az arany–arany ütközésekben és elnyelődésük hiánya a deuteron–arany ütközésekben, közvetlenül kapcsolható magyar kutatók, a Dávid Gábor (BNL) által vezetett debreceni magyar csoport aktivitásához.

Ez az eredmény tehát közvetett bizonyítéka annak, hogy a RHIC arany+arany nehézion-ütközéseiben létrejött egy ragacsos, sűrű anyag, amely természetes körülmények között korábban Világegyetemünk keletkezése utáni néhány milliomod másodpercben jelenhetett meg. További kutatások szükségesek ahhoz, hogy részletesebben feltérképezhessük ezen anyag tulajdonságait, és ezek alapján eldönthessük, hogy ez azonos-e az elméleti számítások alapján várt kvark–gluon-plazmával, vagy pedig az anyag váratlan, eddig még nem tapasztalt, új formájával állunk-e szemben. A kutatások folytatódnak. 2005-ben hazánkban, Budapesten rendezhetjük meg *Lévai Péter* elnökletével, a szerző társelnökségével a nagyenergiás nehézion-fizika világkonferenciáját, a *Quark Matter 2005* konferenciát, mely kapcsán tájékoztatni fogjuk az érdeklődő olvasókat a kvarkanyag kutatásának legújabb fejleményeiről, és a megfigyelt ősi-új anyag részletesebb tulajdonságairól. Viszontlátásra 2005-ben!

Ezúton is szeretnénk megköszönni támogatóinknak, különösen Gyulassy Miklós és W.A. Zajc professzoroknak, továbbá az amerikai és a magyar adófizetőknél, valamint a támogatást nyújtó szervezeteknek, a Fulbright Magyar–Amerikai Oktatási Cselekedési Bizottságnak és a Fulbright Legacy Fundnak, az Országos Tudományos Kutatási Alapnak, a Magyar Tudományos Akadémiának, az USA National Science Foundationnek és a Department of Energy-nek, hogy támogatták a magyar csoport bekapcsolódását PHENIX-kísérlet kutatásaiba.

Irodalom

1. B.B. BACK ET AL. (PHOBOS COLLABORATION): *Charged particle multiplicity near mid-rapidity in central Au+Au collisions at $\sqrt{s} = 56$ and 130 AGeV* – Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 3100
2. A BNL RHIC legújabb eredményeiről szóló sajtótájékoztató web-
lapja: www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/2003/bnlpr061103.htm
3. A RHIC-gyorsító honlapja: www.bnl.gov/rhic/
4. A BRAHMS-kísérlet honlapja www.rhic.bnl.gov/brahms/
5. A PHENIX-kísérlet honlapja www.phenix.bnl.gov/
6. A PHOBOS-kísérlet honlapja www.phobos.bnl.gov/
7. A STAR-kísérlet honlapja www.star.bnl.gov/
8. Csörgő Tamás honlapja: www.kfki.hu/~csorgo/
9. A BNL RHIC nehézion-fizikai programjában résztvevő, és publikációkon már szereplő magyar kísérleti fizikusok névsora: Csanád Máté (ELTE), Csörgő Tamás (MTA KFKI RMKI), Deák Ferenc (ELTE), Kiss Ádám (ELTE), Hidas Pál (KFKI RMKI), Tarján Péter (Debrecen), Veszprémi Viktor (Debrecen), Zimányi József (KFKI RMKI), a PHENIX–Magyarország együttműködés kereteiben. Veres Gábor (MIT/ELTE) amerikai intézetén keresztül résztvevő a PHOBOS-kísérletben. Köszönetünk és tiszteletünk jeléül itt szeretnénk megemlíteni Dávid Gábor (BNL) nevét is.
10. A *Physical Review Letters* 2003. augusztus 15-i számában a címlapon közölte a RHIC mind a négy kísérletének legújabb eredményeit: http://ojs.aip.org/prl/covers/91_7.jsp
11. S.S. ADLER ET AL. (PHENIX COLLABORATION): *Suppressed π^0 Production at Large Transverse Momentum in Central Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV* – Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 072301
12. B.B. BACK ET AL. (PHOBOS COLLABORATION): *Centrality Dependence of Charged-Hadron Transverse-Momentum Spectra in $d + Au$ Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV* – Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 072302
13. S.S. ADLER ET AL. (PHENIX COLLABORATION): *Absence of Suppression in Particle Production at Large Transverse Momentum in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV $d + Au$ Collisions* – Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 072303
14. J. ADAMS ET AL. (STAR COLLABORATION): *Evidence from $d + Au$ Measurements for Final-State Suppression of High- p_T Hadrons in $Au+Au$ Collisions at RHIC* Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 072304
15. I. ARSENE ET AL. (BRAHMS COLLABORATION): *Transverse-Momentum Spectra in $Au+Au$ and $d+Au$ Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV and the Pseudorapidity Dependence of High- p_T Suppression* – Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 072305
16. P. LÉVAI, G. PAPP, G. FAI, M. GYULASSY, G.G. BARNAFÖLDI, I. VITEV, Y. ZHANG: *Discovery of Jet Quenching at RHIC and the Opacity of the Produced Gluon Plasma* – Nucl. Phys. A698 (2002) 631–634

PÁLYÁZATI FELHÍVÁS

Az Európai Fizikai Társaság (EPS) pályázatot hirdet fizikus, fizika szakos hallgatók részére (PhD hallgatók is pályázhatnak). A pályázaton magyar hallgatók is részt vehetnek. A pályázatot elnyert hallgatók 3–6 hónapot tölthetnek az EMSPS (*European Mobility Scheme for Physics Students*) programban résztvevő egyetemeken valamilyenként. Az ösztöndíj összege 500 EUR/hó.

A pályázati feltételekről, a csatolandó dokumentumokról (ajánlólevél a küldő, nyilatkozat a fogadó intézmény koordinátoraitól), továbbá a mobilitási programban résztvevő intézményekről, a pályázók a következő honlapon tájékozódhatnak: <http://www.kfki.hu/~emsp>

Az intézményi EMSPS koordinátorok (nevük, elérhetőségük szintén megtalálható a fenti honlapon) további felvilágosítással szolgálnak az érdeklődő hallgatóknak.

A pályázatot ez év március 20-ig kell eljuttatni lehetőleg elektronikus formában a következő címre:

Mária Lázár, EMSPS Secretariat c/o

EPS Budapest Secretariat, H-1051 Budapest, Nádor u. 7.
tel/fax: + 361 317 3510 / 317 6817

e-mail: mlazar@office.mta.hu

Erdélyi Gábor

EMSPS Mobilitási Bizottság,

Debreceni Egyetem Szilárdtestfizika Tanszék