

MÉRFÖLDKÖVEK

A nagyenergiás magfizikában a legfontosabb és legérdekesebb kérdéseket óriási gyorsítók, az úgynevezett relativisztikus nehézion-ütköztetők segítségével tehetjük fel a Természetnek. A fénysebességhez igen közeli sebességű nehézionokat, azaz héliumnál nehezebb atommagokat ütköztetünk egymással. Ezen ütközések során az anyag olyan állapotba jut, amilyen egy szempillantással a Világegyetemünk keletkezése, azaz néhány mikromásodperccel a Nagy Bumm után uralkodott. Emiatt a nagyenergiás gyorsítókban zajló nehézion-ütközéseket – a bennük uralkodó óriási energiasűrűség és hőmérséklet miatt – Kis Bummoknak is nevezhetjük.

OTKA

A cikk az OTKA és az Élet és Tudomány közös pályázatán első helyezést ért el.

Az USA Brookhaveni Nemzeti Kutatóintézetének RHIC gyorsítója, valamint az ütközésekben létrejövő új anyagot vizsgáló négy kísérlete, a BRAHMS, a PHENIX, a PHOBOS és a STAR kísérlet valóban új, korábban nem vizsgálható világot nyitott meg a tudományos kutatás előtt az eddig soha nem tapasztalt tulajdonságokkal rendelkező ősi-új anyag, az erősen kölcsönható kvark-gluon plazma létrehozásával és tulajdonságainak feltárásával.

A RHIC gyorsító a világon az első és a mai napig egyetlen olyan ütköz-

potainak kísérleti meghatározása – a hétköznapi ész számára szinte elképzelhetetlenül forró hőmérsékleteken és óriási nyomásokon. Ma már tudjuk, hogy ezekben a kísérletekben a hőmérséklet eléri a 4 terakelvint (4×10^{12} kelvint, mintegy 4 billió Celsius fokot), a nyomás pedig a 10^{34} pascalt, ami a szokásos légköri nyomásnál egy csillagászati nagyságú, 10^{29} -szeres szorzófaktorral nagyobb.

Új jelenség

Kutatásaink első mérföldköve egy új jelenség felfedezése volt: arany-arany ütközésekben a nagyenergiás részecskesugarak a várakozások szerint ellentétes irányú párokban keletkeznek. Tehát ha egy részecskesugarat egy adott irányba kirepülni látunk, akkor tudjuk, hogy az ellenkező irányban is létrejött a párja, ennek a lendületét ellensúlyozó részecskesugár. A várakozásokkal ellentétben azonban ezen párok egyik felét gyakran nem észleltük, pontosabban a nagy transzverz lendületű részecskék mért száma a várakozásoknak csupán 20 %-a volt. Ennek az egyik lehetséges magyarázata az, hogy az ütközésben keletkezett anyag elnyeli a rajta átfutó részecskesugarakat. Az is lehetséges magyarázat volt

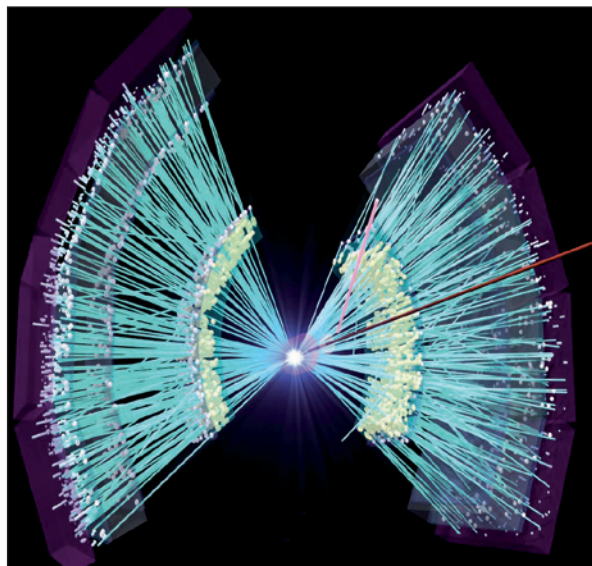
gokban lecsökken az ilyen részecskesugarak keletkezési valószínűsége. A helyes magyarázat kiválasztásához további vizsgálatokra volt szükség. Azt azonban már 2002-ben tudtuk, hogy ezt a jelenséget – a részecskesugarak számának lecsökkenését – korábban soha nem észlelték a nagyenergiás fizikában.

Új anyag

Kutatásaink második mérföldköve egy új anyagforma felfedezése volt. Deutérium-arany ütközésekben végeztünk ellenpróbát. Ha valóban az Au+Au ütközésekben keletkező új anyag nyelte el a nagyenergiás részecskesugarakat, akkor csökkentve az ütköző nehézionok méretét, a fenti elnyomás kikapcsolható. Mivel a kis deuteron és a nagy arany nehézion ütközése során a nagy energiájú részecskesugarak elnyomását nem tapasztaltuk, ezért az ellenpróba eredményeként eldőlt, hogy az új jelenség helyes magyarázata a részecskesugarak elnyelődése az Au+Au ütközésekben keletkezett új anyagon. Tehát az új anyag nagyon átlátszatlan, igen opálosnak bizonyult. A négy RHIC kísérlet eredményei egybecsengően ezt a lehetőséget támasztották alá.

A legforróbb anyag: folyadék

2005. a Fizika Nemzetközi Éve volt. A RHIC-nél dolgozó kutatók összefoglaló tanulmányokban értékelték a kísérletek első szakaszának, a 2000-ben megkezdett adatgyűjtési és elemzési munkának az eredményeit. Mind a négy kísérlet egybecsengően állapította meg: a RHIC



Arany-arany ütközés a RHIC gyorsító PHENIX kísérletében

tető, amelyet kifejezetten a nagyenergiás nehézionfizikai kutatások céljából építettek: fő feladata az erősen kölcsönható anyag halmazáll-

azonban, hogy a nagy lendületű részecskesugarak száma azért kevesebb a vártnál, mert a fényhez igen közeli sebességgel mozgó atomma-

Au+Au ütközéseiben új anyag jött létre, és a várakozásokkal ellentétben ez az új anyag nem gáz, hanem folyadék halmazállapotú. A 2005 áprilisában a Nuclear Physics című folyóiratban közlésre elfogadott cikkünk, mely szerint a RHIC-nél létrehozott anyag inkább folyadékként, mint gázként viselkedik, a harmadik mérőldkövet jelentette, és elméletileg váratlan, új kísérleti alapismerettel bővítette a kvantumszíndinamikáról (QCD-től), az atommagokat alkotó protonok és neutronok, valamint az őket alkotó kvarkok és gluonok közötti kölcsönhatásról alkotott tudásunkat. Ez a meglepő felfedezés megerősítette a RHIC-nek és a kísérleti nagyberendezéseknek az értékét és fontosságát. A kísérletekben 2005-ig mért legmagasabb hőmérséklet mintegy 2 terakelvin volt, ami akkori világrekord az ember által előállított hőmérsékletek területén. A legforróbb ember által előállított anyag tehát folyadék halmazállapotúnak bizonyult. Ezt az eredményt, melyben egy mintegy

zet tovább hevítjük, vizgőzt kapunk. Ha a gőzt irdatlan magas, 2 terakelvines hőmérsékletekig még tovább hevítjük, akkor újra folyadék halmazállapotú anyagot kapunk. Ekkor azonban a folyadék mibenléte, szabadsági fokai még nem voltak bizonyítottan ismertek számunkra.

2006-os felfedezéseinkről a Scientific American folyóirat 2006. májusi számának címlapján, vezető hírként számolt be. A különböző szubatomi részecskék folyási képének részletes vizsgálata során azt tapasztaltuk, hogy ebben a tökéletes folyadékban az erősen kölcsönható elemi részecskéket felépítő kvarkok jelentek meg, mint szabadsági fokok. Mai tudásunk szerint ugyanis az erősen kölcsönható szubatomi részecskék kvarkok kötött állapotai. Alapvetően kétféle típusú erősen kölcsönható részecskét figyelhetünk meg: a három kvark által létrehozott kötött állapotokat barionoknak, míg a kvark-antikvark kötött állapotokat mezonoknak nevezzük. A folyási kép elemzése meglepő viselkedést mutatott ki: ha nyalábirányra merőleges mozgás kinetikus energiáját egy kvarkra vonatkoztatva határoztuk meg, és a folyás jellemzőjét is elosztottuk a részecskét alkotó kvarkok számával, teljes adategybeesést tapasztaltunk. Elérkeztünk kutatásaink negyedik mérőldkövéhez: megállapíthattuk, hogy a RHIC arany-arany ütközéseiben létrejövő új anyagforma kvarkok folyadéka.

Tökéletesen folyékony

Végül 2007 során értünk kutatásaink 5. mérőldkövéhez, azaz meghatároztuk, mennyire tökéletesen folyik a kvarkfolyadék. Azt tapasztaltuk, hogy a folyás csillapodására jellemző mennyiség, a kinematikai viszkozitás mintegy egy-negyede a korábban ismert legto-

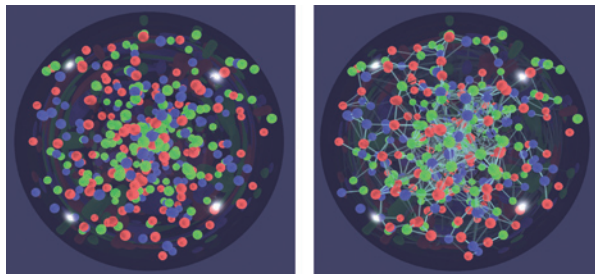


A BNL madártávlati képe a RHIC gyorsítóval
(FOTÓ: BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY)

kéteesebben folyó anyagnak, az ultra-hideg, szuperfolyékony ^4He -nak. A kísérleti kutatások kezdetekor gondolni sem mert senki arra, hogy a RHIC gyorsító ütközéseiben előállított, több mint 2 terakelvin hőmérsékletű ősi-új anyag, a kvarkok folyadéka tökéteesebben folyik majd, mint a 4 kelvin alatti, ultra-hideg hőmérsékleten megjelenő szuperfolyékony ^4He .

A kvark-gluon plazma fénye

2010 februárjában az Amerikai Fizikai Társulat ülést tartott Washington DC-ben, az Egyesült Államok fővárosában. Ennek során a PHENIX kísérlet és a Brookhaveni Nemzeti Kutatóintézet sajtótájékoztatón jelentette be, hogy bizonyítani tudjuk a kvarkokból és gluonokból álló, régóta keresett kvark-gluon plazma létrejöttét a RHIC arany-arany ütközéseiben. Megállapítottuk, hogy ez az anyag a várakozásoktól eltérően erősen csatolt, és ezért nem gáz, hanem folyadék halmazállapotú. Megmérteük ugyanis a kvark-gluon folyadék színeképét és ezzel meghatároztuk annak kezdeti hőmérsékletét is, mely elérte a 4 terakelvint. Ez az óriási hőmérséklet jóval magasabb, mint a korábban ismert hadronokból álló anyag 2 terakelvines határhőmérséklete, az úgynevezett Hagedorn-hőmérséklet, amely felett nem létezhetnek az atommagot alkotó, korábban jól is-



A Nap központjánál mintegy 250 000-szer forróbb, mintegy 4 terakelvines hőmérséklet jött létre a RHIC arany-arany ütközéseinek kezdetén. A protonok és a neutronok megolvadtak, és létrejött az erősen csatolt, tökéletesen folyó kvarkfolyadék, a régóta keresett kvark-gluon plazma, amit a jobb oldali ábra mutat.

(KÖSZÖNJÜK JEFF MITCHELL, A PHENIX KÍSÉRLET ÉS A BNL SZÍVESSÉGÉT)

1 millió amerikai dollár értékű beruházással felépített gyorsító négy, összesen szintén körülbelül 1 millió dollár beruházással felépült kísérlete ugyanazt a meglepő felfedezést tette, az Amerikai Fizikai Intézet 2005-ben a fizika legfontosabb eredményének nevezte meg. Egyszerűsége és fontossága alapján ez az eredmény méltónak tűnik arra, hogy bekerüljön a középiskolai és általános iskolai tananyagba. Ha a jeget hevítjük, megolvad és víz lesz belőle. Ha a vi-

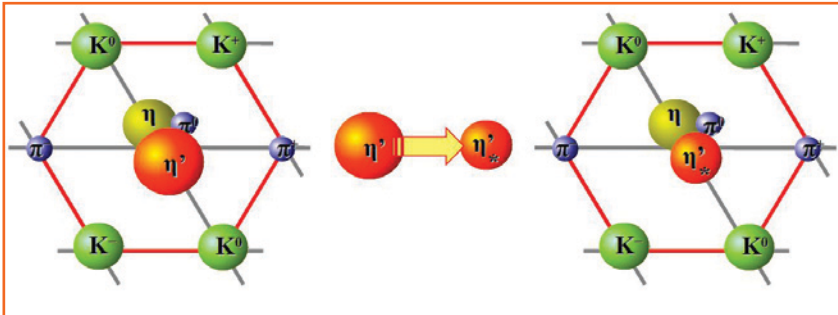
mert részecskék: tehát biztosan megolvadtak a protonok és a neutronok.

„Ezek az adatok a RHIC-nél előállított kvark-gluon plazma hőmérsékletének első kísérleti meghatározását jelentik” – nyilatkozta Steven Vigdor, az USA Brookhaveni Nemzeti Kutatóintézetének RHIC programért felelős igazgatóhelyettese a washingtoni sajtótájékoztató kapcsán. A forró kvark-gluon levesben az univerzum legalapvetőbb kötéseit közvetítő, az atommagok protonjait és neutronjait összetartó kvarkok és gluonok nagyon rövid időre kiszabadulnak az erős kölcsönhatás börtönéből, és egymásba ütközve tolongani és kollektív áramlást mutatva folyni kezdenek. Ilyen eredményeket kizárólag alapkutatásokkal lehet elérni. Erre hívta fel a figyelmet az Egyesült Államok Energetikai Minisztériumának Tudományos Hivatalát vezető Dr. William F. Brinkman is: „Ez a kutatás lényeges és új ismereteket adott az anyag legalapvetőbb struktúrájáról és az univerzum keletkezésének első pillanatairól. A kísérlet eredményei egyértelműen bizonyítják, hogy megéri a hosszú távú, nagy-szabású alapkutatásokra áldozni.”

A RHIC-nél azonosított, az erősen kölcsönható kvark-gluon plazmáról alkotott képet egy régóta keresett, tűnékeny szimmetria vizsgatásának igazolásával tovább gazdagítottuk 2010 októberében. Kimutattuk, hogy az egyik szubatomi részecske – az úgynevezett η' mezon – rekord-idő, mintegy 10^{-22} másodperc alatt veszíti el tömegének jelentős részét a RHIC gyorsító arany-arany nehézion ütközései során. Ez a világon a leggyorsabb, kísérletileg kimutatott tömegcsökkenés. Ez a tömegcsökkenés egyben egy olyan szimmetriának a visszatérését is jelzi az erősen kölcsönható, forró és sűrű hadronanyagban, amelyet a korábbi mérésekben meg nem nyilvánuló, megsérült szimmetriának tapasztaltunk.

Villámgyors tömegcsökkenés

Az η és az η' mezonok ugyanis szinte ikertestvérek – azonos kvarkokból, hasonló módon épülnek fel. Azonban a szokásos kísérleti körülmények között, az elemi részecskék kölcsönhatásaiban az $\eta'(958)$ mezon majdnem kétszer nehezebb tömegű, mint iker-



Ez az ábra az u, d és s kvarkokból felépülő 9 pszeudoskalár mezont jelzi. A golyócskák méretei a részecskék tömegeivel arányosak. A bal oldali ábra a szubatomi részecskék korábbi reakciókban mért, szokásos tömegeinek felel meg. A középső rész az η' mezonok tömegének csökkenését jelzi az USA Brookhaveni Nemzeti Kutatóintézetében, a BNL RHIC gyorsító 200 GeV-es arany-arany ütközéseiben létrejövő forró és sűrű hadronanyagban. A jobb oldali ábra az η és az η' mezonok közti szimmetria helyreállítását jelzi.

testvére, az $\eta(548)$ mezon. Az Amerikai Fizikai Társulat vezető folyóirata, a Physical Review Letters 2010 októberi számában közli eredményeinket, melyek az η' mezon tömegének a forró és sűrű hadronanyagban történő jelentős, legalább 20%-os tömegcsökkenéséről számolnak be, közvetett megfigyelések alapján. Amikor a folyékony kvark-gluon plazma levese tágulni, hűlni kezd, mezonokká és barionokká alakul át a hadronizációnak nevezett folyamat során, és egy szempillantásnál is sokkal rövidebb idő, mintegy 10^{-22} másodperc alatt létrehozza az η és az η' mezonokat, valamint további részecskék sokaságát.

A STAR és a PHENIX kísérletek adatainak elemzéséből kimutattuk, hogy ebben a forró és sűrű hadronanyagban az η' mezonok tömege mérési hibán belül megegyezik az η mezonok tömegével. Ez a jelenség olyan, mintha egy ikerpár túlsúlyos tagja egy szempillantás alatt megszabadulna súlyfeleslegétől, és tökéletes alakú, karcsú ikertestvéréhez válna hasonlóvá.

Ez a tömegcsökkenés az $U_A(1)$ szimmetriának a helyreállítását jelzi, melyet korábban elveszetteknek véltünk: a „tékozló” Goldstone-boszon, az η' a hadronanyagban módosulva visszatér ideális tömegű társához. Eredményeink szerint ez a szimmetria közelítőleg helyreáll a nehézion-ütközésekben létrehozott forró és sűrű hadronanyagban. Történik mindez a kvarkleves megjelenési hőmérséklete alatt, a rács-QCD

számítások elméleti jóslataival összhangban.

A nagy energiájú részecskefizikának mára három fő központja alakult ki a világban. Ezek közül az egyik az Egyesült Államok, ahol a BNL RHIC gyorsítója az ütköztethető atommagok méretének és a kísérletek intenzitásának flexibilitása miatt emelkedik ki a mezőnyből, és a tökéletes kvark-folyadék felfedezésével került a világ élvonalába. Az európai CERN LHC gyorsítója az ütközések óriási energiája miatt emelkedik ki, főleg a Higgs-bozon felfedezésével írhatja majd be a nevét a fizika történetébe. A harmadik központ Japán, ahol a J-PARC komplexumban a neutrínók egymásba alakulásának megfigyelésétől, és az ütközések időegységre eső óriási száma miatt várhatunk tudományos áttöréseket.

Az ezekben a központokban folyó alapkutatások eredményei sokféleképpen szűrődhetnek majd be a mindennapi életünkbe, valahogy úgy, mint például az internet és a világháló, melyet a CERN fizikusai találtak fel, hogy rendet tegyenek az adatok tengerében. Hogy a mai részecske- és magfizikai kutatások hogyan kerülnek majd be a mindennapi életünkbe, azt ma még lehetetlen pontosan előre jelezni. Két dolog azonban szinte biztosan megállapítható. Egyrészt a hatásuk a világháléhoz hasonlóan óriási és váratlan lehet. Másrészt az is biztos, hogy aki nem vesz részt ezekben a kutatásokban, az szinte menthetetlenül lemarad.

CSÖRGŐ TAMÁS