

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Physikiai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LVI. évfolyam

12. szám

2006. december

VOLT-E (VAN-E) FÁZISÁTMENET A BIG BANG (LITTLE BANG) SORÁN?

Fodor Zoltán, Katz Sándor
ELTE TTK Elméleti Fizikai Tanszék

Általában nem vitatott nézet, hogy a legalapvetőbb fizikai elmélet az elemi részek fizikája. A részecskefizikusok a természet legkisebb építőköveit keresik, azok tulajdonságait kívánják megérteni, és bíznak abban, hogy az ezekből felépülő bonyolultabb rendszerek leírásához is el lehet majd jutni. A megismerés során a kísérletek és az elméleti vizsgálatok szoros kölcsönhatásban – és egymásra utalásban – haladnak. A kísérletek által felfedezett részecskéket és kölcsönhatásokat az elméleti fizikusok foglalják egységes képbe, a kikristályosodó alapvető egyenleteket is ők oldják meg. A kísérletek alapja legtöbbször részecskék ütköztetése részecskegyorsítóban. Ilyenkor néhány nagyenergiás részecske vesz részt a vizsgált folyamatban. Sokkal több nagyenergiás elemi részecskével találkozhatunk például a korai Világegyetemben (Big Bang, „Nagy Bumm”, az angol nyelvtől elszakadva „Ösrobbanás”), vagy az azt legközelebből utánzó földi kísérletekben a nehézionok ütközése során (Little Bang, „Kis Bumm”).

Igen fontos, alapvető kérdés, hogy volt-e, van-e – az erős kölcsönhatás miatt fellépő – „fázisátmenet” a Big Bang és a Little Bang során. Erre a kérdésre keresett és talált egy nagy visszhangot keltett választ kutatócsoportunk (*Yasumichi Aoki, Endrődi Gergely, Fodor Zoltán, Katz Sándor és Szabó Kálmán*). Az eredmény a sokak által a világ legrangosabb tudományos folyóiratának tartott *Nature*-ben jelent meg ez év októberében, melyhez ugyanazon folyóiratszámában a 2004. évi fizikai Nobel-díjas, *Frank Wilczek* írt egy figyelemfelkeltő kísérőcikket.

Az erős kölcsönhatást mai tudásunk szerint leíró fizikai elmélet a kvantum-színdinamika. A kvantum-színdinamikai kölcsönhatás rendkívül erős. Egy „legyengített”, leánykolt fajtája felel a magerőkért, azok „hétköznapi” megnyilvánulásaiért: az atombomba pusztító erejéért és a Napban felszabaduló óriási energiáért.

Az elektromágneses kölcsönhatáshoz hasonlóan itt is töltések játsszák a fő szerepet. Amíg azonban elektromos

töltés csak egyetlen fajta van (amely, persze, lehet pozitív vagy negatív), a kvantum-színdinamikában többfajta töltés is szerepel (ezek mindegyike is lehet pozitív vagy negatív). Érdekes módon nemcsak az azonos fajtájú, egyenlő mennyiségű pozitív és negatív töltések keveréke eredményez semleges rendszert, hanem több, különböző fajtájú töltés megfelelő arányú vegyítése is. Ez emlékeztet a színek elméletére: a három alapszín keveréke fehér, azaz „semleges” színt eredményez. Ezen analógia miatt szokás az erős kölcsönhatás elméletét kvantum-színdinamikának (kvantum-kromodinamikának) hívni. Az elektrodinamikai töltést hordozó elektron kvantum-színdinamikai analogonjainak – három van belőlük, kvarkoknak hívjuk őket – három különböző töltését szintöltésnek, sőt, gyakran piros, zöld és kék szintöltésnek nevezzük. Természetesen a gondolatmeneteinkben említett szintöltéseknek semmi közük sincs a valódi színekhez, az elnevezés pusztán a mondott analógián alapul.

Az erős kölcsönhatás – ahogy már említettük – „rendkívül erős”. Álló töltéseinek szétválasztásakor, azaz két kvark eltávolításakor, az elektromosságban szokásos $1/r$ típusú, a távolsággal csökkenő potenciál helyett egy minden határon túl növekvő lineáris potenciál jelenik meg. Ez azt is jelenti, hogy szintöltéseket közönséges körülmények között nem lehet (makroszkopikus távolságra) szétválasztani. Egy ilyen szétválasztáshoz a potenciál legyőzésére, óriási energiára volna szükség. Ezzel függ össze, hogy a természetben csak zérus szintöltésű részecskéket detektálhatunk. Ez megvalósulhat például úgy, hogy egy összetett részecskében egy adott szintöltés pozitív és negatív járuléka kioltják egymást. Az ilyen részecskéket legegyszerűbben egy kvark (pozitív szintöltésű részecske) és egy anti-kvark (negatív szintöltésű részecske) kötött állapotként értelmezzük, és mezonoknak hívjuk (például π - vagy K-mezonok). A másik lehetőség az, hogy a három szint egyforma arányban keverjük. Az ilyen részecskéket három, különböző szintöltésű kvark (vagy három antikvark)

kötött állapotaként értelmezzük, és barionoknak hívjuk (ilyen például a proton vagy neutron). Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy az erős kölcsönhatás erőssége, a statikus kvarkok között ható lineáris potenciál minden határon túli növekedése felel azért, hogy a protonokban található három kvark bezáródott. A szokásos anyag (protonok, neutronok) az úgynevezett bezáró (angolul confined) vagy más néven hadronikus fázisban található.

Ahogy láttuk, közönséges körülmények között nem nyílik lehetőség szabad kvarkok észlelésére. A már említett F. Wilczek, valamint D.J. Gross és H.D. Politzer azt ismerték fel, hogy az energia növekedésével az erős kölcsönhatás egyre „gyengül”. Ezért a felismerésért kaptak 2004-ben Nobel-díjat. A lineárisan növekvő potenciál statikus kvarkok esetén maradéktalanul érvényesülő bezáró hatásával szemben az egyre magasabb hőmérsékleteken fellépő egyre nagyobb energiák a kölcsönhatás gyengüléséhez vezetnek, a színtöltések egyre jobban eltávolodhatnak egymástól, mígnem ezt az eltávolodást már nem is a visszahúzó potenciál, hanem a rendszerben lévő többi részecske, az azokon való szóródás, az azokkal történő ütközés korlátozza. Ilyen állapotban a színtöltött részecskék lényegében már nem is érzik a bezárást. Egy új fázis jelenik meg, melyet felszabadító (angolul deconfined) fázisnak nevezünk.

A bezáró és a felszabadító fázisok között rendkívül lényeges különbségek vannak. Alacsony hőmérsékleten – a bezáró fázisban – csak semleges színtöltésű részecskéket találunk, a kvarkok közötti potenciál minden határon túl nő, és az ilyen állapotban (fázisban) levő kölcsönható gáz mindössze néhány szabadsági fokkal rendelkezik. Magas hőmérsékleten – a felszabadító fázisban – a domináns részecskék színtöltöttek, a potenciál nem bezáró, és az ilyen állapotban (fázisban) levő kölcsönható gáz sok tucat szabadsági fokkal rendelkezik. Az állapot jellegét meghatározó külső feltételek, például a hőmérséklet változtatását kísérő – ennyire jelentősen eltérő állapotok közötti – állapotváltozás során általában jellegzetes fázisátmenetet szoktunk észlelni.

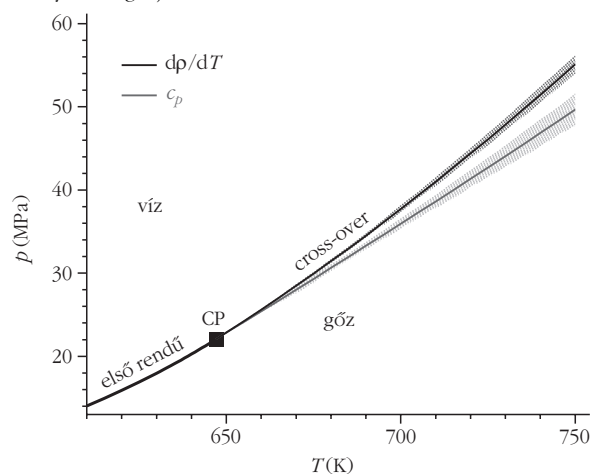
Közismert fázisátmenet például a víz és a gőz közötti átmenet, melyet a hőmérséklet–nyomás, (T, p) , diagramon az 1. ábra illusztrál. (Az ilyen típusú diagramokat fázisdiagramnak szokás nevezni, mert egy anyag különböző fázisait jelzi a külső paraméterek függvényében.) Amint az ábra mutatja, alacsony hőmérsékleten a rendszer a vízfázisban található. Viszonylag kis nyomáson, a rendszert felmelegítve egy úgynevezett elsőrendű víz–gőz fázisátmenetet észlelünk. Az elsőrendű fázisátmenetek tipikusan nem folytonosak, nem analitikusak. A víz–gőz fázisátmenet során a sűrűség nem folytonosan változik, hanem ugrik (légköri nyomáson az 1 gramm/köbcentiméter értékről egy nagyságrendekkel kisebb értékre), illetve a fajhő végtelenné válik (a látens hőt közölni kell a rendszerrel még mielőtt annak hőmérséklete akár a legkisebb mértékben is változna). Ezt az elsőrendű fázisátmeneti tartományt folytonos vonal mutatja. Érdeemes megjegyezni, hogy szennyezésmentes esetben és gyors hőmérsékletváltozás mellett az elsőrendű fázisátmeneteket túlhűlés vagy túlmelegedés jellemzi. Például a gőzfázis a kritikus hőmérséklet alá hűl, majd rendkívül gyors-

an vízcseppek jelennek meg. Ezen cseppek növekedése viszi át a rendszert az egyik fázisból a másikba. (A fordított irányú átmenet során lehetséges túlmelegedés jelensége, ismert módon, felléphet víz mikrohullámú sütőben történő melegítésekor.)

A fázisdiagram egyik legérdekesebb tulajdonsága a kritikus „végpont” megjelenése. A víz 374 Celsius fokon és 0,32 kg/l sűrűsége opálóssá válik, makroszkopikus méretű korrelációk alakulnak ki. Érdeemes megjegyezni, hogy ez az állapot akár egy gázláng segítségével is megvalósítható (bár a fellépő nagy nyomás miatt meglehetősen erős tartályra van szükség). Ebben a kritikus végpontban másodrendű fázisátmenetet észlelünk. Itt a változások folytonosak, de nem analitikusak. A rendszer kritikus tulajdonságokat mutat, például a korrelációs hossz végtelenné válik.

Ha a hőmérséklet–nyomás diagramon még ezeknél az értékeknél is magasabb (T, p) értékeket vizsgálunk, akkor egy analitikus átmenetet tapasztalunk (ezt szokás crossover-átmenetnek is nevezni). A víz és a gőz közötti tipikus különbségek részben megmaradnak, az átmenet nem ugrásszerű, hanem folytonos és analitikus. A rendparaméternek tekinthető sűrűség a crossoveren való áthaladáskor is gyorsan változik, de a fázisátmenetekre jellemző szingularitás nem jelenik meg. A sűrűség nem ugrásszerűen, hanem folytonosan változik, de a változásban van egy meredek szakasz, melynek legmeredekebb pontját a víz forráspontjának tekinthetjük. A fajhőnek is van egy maximuma (amely az elsőrendű fázisátmeneti tartománnyal ellentétben már nem végtelen). Az átmeneti hőmérsékletet, a víz forráspontját ezzel a maximummal is definiálhatjuk. Ahogy az 1. ábra mutatja, a két definíció

1. ábra. A víz sematikus fázisdiagramja hőmérséklet (T) nyomás (p) síkon. A fázisvonal azon p - T értékeket jelöli, ahol a két fázis (víz és gőz) tud együtt létezni. Közönséges légköri nyomáson (1 atm.) 100 Celsius fokon, a légköri nyomás felénél 82 fokon. A víz és gőz közötti fázisvonal végét egy kritikus pont jelöli. Ezen p - T értékpárnál a fázisátmenet másodrendű. Ilyen T és p értékek esetén a víz opálóssá válik, a korrelációs hosszak végtelen nagyok lesznek. A jelenséget kritikus opaleszcenciának hívjuk. Ezen kritikus ponthoz tartozó (T, p) értékeknél is nagyobb hőmérsékleten és nyomáson már csak egy analitikus átmenetet tapasztalunk, melynek átmeneti hőmérséklete a vizsgált mennyiségtől függ. Más átmeneti hőmérsékletet ad a fajhő maximuma (alsó, világosabb vonal és a bizonytalanságát jelző sáv), és megint mást a sűrűség hőmérséklet szerinti deriváltjának maximuma (felső, sötétebb vonal és a bizonytalanságát jelző sáv).



megegyezik az első és másodrendű fázisátmenetek esetén. Az analitikus átmenet (crossover) viszont más forráspontot, átmeneti hőmérsékletet eredményez attól függően, hogy melyik definíciót használjuk.

A víz fázisdiagramja arra a kérdésre mutatja a választ, hogy mi történik a vízzel, ha egyre jobban melegítjük, vagy egyre jobban összenyomjuk. A kérdést a részecskefizikában sokkal általánosabban is feltehetjük. Mi történik a „semmivel”, a vákuummal, ha egyre jobban „melegítjük”?

A vákuum melegítése (energia bepumpálása) azzal jár, hogy tömeggel rendelkező részecskék jelennek meg. Ez az $E = mc^2$ képlet szerinti energia-tömeg ekvivalencia következménye. Természetesen óriási hőmérsékletekre van szükség, hogy az erős kölcsönhatásban részt vevő részecskék a melegítés hatására megjelenjenek a vákuumban. Tipikusan 10^{12} Celsius fok körüli értékre kell gondolnunk. Ha a hőmérsékletet tovább növeljük, akkor egy fázisátmenetet tapasztalunk: a bezárt kvarkok a már leírt módon kiszabadulnak.

Ilyen magas hőmérsékletek uralkodhattak a korai Világegyetemben (Big Bang), annak körülbelül 10 mikroszekundumos korában. Nehézionok ütköztetése révén sikerült ilyen magas hőmérsékleteket földi körülmények között is előállítani. Jelenleg az Egyesült Államok Brookhaven National Laboratory-jának (BNL) Relativisztikus Nehézion Ütköztetője (Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC) szolgáltatja a legmagasabb hőmérsékleteket. Igaz, ez a magas hőmérséklet csak a másodperc töredékéig áll fenn, a rendszer igen nagy sebességgel kitágul és lehül (Little Bang).

Mit tudunk mondani az erős kölcsönhatás miatt megvalósuló átmenetről? A bezáró és a felszabadító fázis közötti különbség olyan jelentős, hogy évtizedekig meg volt győződve a tudományos közvélemény arról, hogy közöttük egy elsőrendű fázisátmenetnek kell történnie. Egy ilyen, a korai Világegyetemben végbement elsőrendű fázisátmenetet az Univerzum gyors tágulása miatt a már említett túlhűlés jellemez. A hadronikus, bezáró fázis cseppecskéi robbanásszerűen jelennek meg a felszabadító fázisban. Ez máig ható következményekkel járt volna.

Nézzünk néhányat az ilyen jellegű fázisátmenet következményei közül. A cseppecskék vonzó tömegcentrumokat képeznek, a Világegyetem tömegeloszlása ennek következtében megváltozik. Az atommagok képződése is inhomogén módon zajlik le. Egzotikus ritka kvarkokat tartalmazó csomagocskák keletkeznek. Az egymásnak ütköző cseppecskék gravitációs hullámokat keltenek. Kísérleti fizikusok egész generációja kereste ezen jelenségek mai megnyilvánulásait. Sajnos, a kísérletek nem voltak elég érzékenyek, legalábbis néhányan így értékelték azt a tényt, hogy a keresés ezidáig sikertelen maradt. Sokan mások viszont már kezdték feladni az elsőrendű fázisátmenetre vonatkozó képet. Voltak jelek, melyek arra utaltak, hogy talán egy analitikus átmenettel állunk szemben. Egyre többen vallották ezt a nézetet, noha egyértelmű bizonyíték sem ezt, sem az elsőrendű fázisátmenetre vonatkozó elképzelést nem igazolta. A helyzet elméleti bizonyítás szempontjából mindig is nyitott volt, és kísérleti evidencia sem volt, mely az egyik vagy a másik forgatókönyvet támogatta, vagy éppen kizárta volna.

Kutatócsoportunk elméleti számítások alapján megmutatta, hogy az átmenet a nagy nyomású víz átmenetéhez hasonlít, azaz analitikus átmenet, az elsőrendű átmenetekre vonatkozó elképzeléseket el kell vetni. Az Univerzum fejlődését egy folytonos átmenet segítségével kell megértenünk. A víz forrását nap mint nap látjuk, és egy egyszerű hőmérővel ellenőrizhetjük, hogy légköri nyomáson valóban 100 Celsius fokon történik. A víz kritikus pontjának helyét is a kísérletek adták meg, és a kísérletek mondják meg azt is, hogy mely hőmérséklet-nyomás értékek felett kapunk analitikus átmenetet. Elméletileg ezek meghatározása rendkívül nehéz, alapelvekből ezidáig nem is sikerült.

Hogyan lehetséges, hogy a víznél szemmel láthatólag lényegesen egzotikusabb, bonyolultabbnak tűnő kvantum-szindinamikai átmenetet sikerült mégis elméletileg megérteni?

A részecskefizika kölcsönhatásait (a már említett erős kölcsönhatás mellett ilyen a radioaktív béta-bomlásért felelős gyenge kölcsönhatás és az elektronok és fotonok kölcsönhatását leíró kvantum-elektrodinamika) a kvantumtérelméletek írják le. Ezek egyrészt *térelméletek*, azaz a dinamikai változókat, tereket, a geometriai tér pontjaihoz rendeljük. (Analogiát keresve szemléletes példa lehet a meteorológia. A hőmérséklet, nyomás, szélsébség a tér különböző pontjaiban más és más, és időben fejlődik.) A kvantumtérelméletek másik jellemzője, hogy *kvantumelméletek*. A legismertebb kvantumelmélet a kvantummechanika, amelyben a dinamikai változókat, az impulzust és a helyet nem számokkal, hanem egymással fel nem cserélhető operátorokkal jellemezzük. Ennek egyik jól ismert következménye a Heisenberg-féle határozatlansági reláció, valamint az is, hogy, ha a leírt objektum kötött állapot, annak energiája csak egymástól diszkrétül különböző értékeket vehet fel. A kvantumtérelméletek ezen két leírási mód ötvözéséből születtek. A dinamikai változók a terek, melyeket, a meteorológiával ellentétben, már nem számokkal, hanem egymással fel nem cserélhető operátorokkal írunk le. Ez az elmélet is meghatározott, kvantált energiaszintekkel rendelkezik. Az általa leírt objektumokhoz azonban már nemcsak meghatározott energiát rendelhetünk, hanem a térbeli és időbeli változások összekapcsoltsága miatt jól meghatározott (kvantált) impulzust, impulzusmomentumot és részecskeszámot is.

Felmerülhet a gondolat, hogy az elemi részecskéket kvantumtérelméleti objektumokként, mint térkvantumokat írjuk le. Rendkívül meglepő, hogy ezt az elképzelést két – legalábbis távolról nézve – egyszerű feltétellel kiegészítve az elemi részek világának szinte minden jelensége nagy pontossággal leírható. Az egyik feltétel az önellentmondásmentesség (ezt minden végső elmélettől természetesen elvárjuk). A másik feltétel, hogy az elmélet alapegyenleteit bizonyos transzformációknak változatlanul kell hagyniuk (szimmetriatranszformációk). A kvantum-elektrodinamikában ez a transzformáció az anyagtereknek egységnyi abszolút értékű komplex számmal való megszorozása. A gyenge kölcsönhatás esetében a szorzás 2×2 -es (speciális unitér) mátrixokkal, az erős kölcsönhatás kvantum-szindinamikai elmélete esetében pedig 3×3 -as (ugyancsak speciális

unitér) mátrixokkal történik. Ezeknek az egyszerű transzformációknak, ha szimmetriatranszformációk, jól meghatározott alakban leírható kölcsönhatások, dinamikai egyenletek felelnek meg. Ezek birtokában, az egyenletek megoldásával, elvileg lehetőség nyílik a megfelelő fizikai rendszer történéseinek leírására, így a kvantum-szindinamikai fázisátmenet közelítésektől mentes leírására is. A gyakorlatban egzakt megoldásokat csak kivételes esetekben sikerül találni, úgyhogy a feladatot még az egyenletekben rejlő információ kikutatására alkalmas közelítő módszer megtalálása, kidolgozása is nehezíti.

A részecskefizikai folyamatok közelítő leírásának egyik legfontosabb módszere a perturbációs számítás, a fokozatos közelítések módszere. Ezen módszer alkalmazásának első lépése az, hogy valamely fizikai mennyiséget közelítőleg kiszámítunk, majd ezt az eredményt a számítás további lépéseiben újra meg újra korrigáljuk. Amennyiben a korrekciók kicsik, és a közelítés során ráadásul még egyre kisebbekké is válnak, a módszer fokozatosan közelíti a végeredményt. A módszer alkalmazhatóságának feltétele – a fizikai probléma terminológiájával élve –, hogy a kölcsönhatás gyenge legyen. Sajnos, az erős kölcsönhatás – „erős”, a fokozatos közelítések módszere, néhány kivétellestől eltekintve, nem alkalmazható.

Alternatívát a rácstérelmélet kínál. Az alapvető rácstérelméleti közelítés abban áll, hogy a teret és időt nem folytonos változóként kezeli, hanem egy ráccsal helyettesíti. (Hasonló rácsot használnak az időjárás-előrejelzés készítése során. Meghatározott földrajzi helyeken és magasságokban mérik a hőmérsékletet, szélirányt, légnyomást, majd az adatok összesítése és persze jelentős számolás után készül el az előrejelzés.) A részecskefizikában az elmélet térerősségeit írjuk a rácpontokba. Láttuk, hogy kvantumelméleteket egymással fel nem cserélhető operátorok segítségével fogalmazhatjuk meg. Létezik azonban egy másik (*R. Feynman* Nobel-díjas amerikai fizikus nevéhez fűződő), pályaintegrálos megfogalmazás, amely jobban illeszkedik a rácsformalizmushoz. A kvantummechanikai átmeneti valószínűséget úgy határozzuk meg, hogy minden létező klasszikus pályára összeadjuk az $\exp(iS)$ fázisfaktorokat (i a képzetes egységgyök, S az adott klasszikus pályához tartozó hatás). A klasszikus fizikában egyetlen pálya valósul meg, és ezt a hatást minimális értéke választja ki. A módszer térelméleti általánosítása abban áll, hogy az $\exp(iS)$ fázisfaktorokat minden létező térkonfigurációra összegezzük. Mivel az $\exp(iS)$ fázisfaktorok erősen oszcillálnak, összegzésük numerikus módszerekkel nehéz. Ezért a jelenségeket általában imaginárius idő függvényeként vizsgáljuk, mely ekvivalens az $\exp(-S)$ Boltzmann-faktorok összegzésével. Ezen összeg tagjai már nem oszcillálnak, a számítás elvégezhető.

Meteorológiában a jóslatok annál jobbak, minél finomabbak a számításokhoz használt rácsok. Ez azt jelenti, hogy minél több pontban kell megmérnünk a hőmérsékletet, nyomást, szélességet, és ezeket a finom rácsra elvégzett méréseket használjuk a számítások során. A kvantumtérelméleti számítások nagyon hasonlóak. Minél finomabb a rács, annál pontosabb az eredmény. Numerikus számítások esetén a végtelen finomságú rácsot extrapolációval szoktuk elérni. Egyre finomabb és finomabb

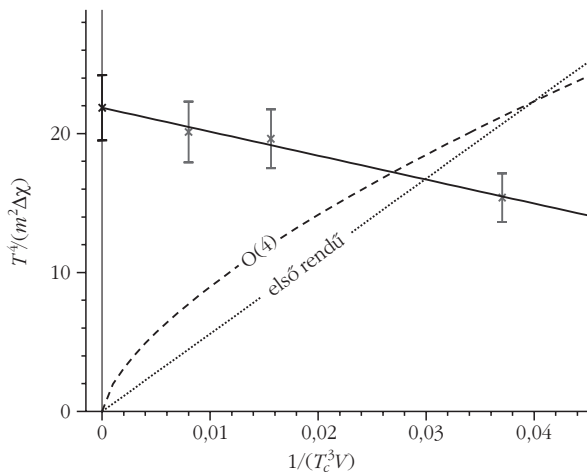
rácsokat használunk, majd az eredményeket, a rácsállandótól való függésük aszimptotikus alakjának ismeretében, a végtelen finom, azaz nulla rácsállandóhoz extrapoláljuk (kontinuum határeset).

Az egyes jelenségeket az állapotösszeg numerikus meghatározásának a révén, nagy számítógépekkel számítottuk ki. Manapság 10 milliárd dimenziós integrálokat számolunk. Másodperceként ezer milliárd műveletre van szükség, amely szuperszámítógépeknek való feladat.

A 21. század elejének emblematikus szuperszámítógépe volt például a japán Earth Simulator, Föld-számoló. Másodpercenként sok ezer milliárd műveletet végez, de, sajnos, az ára is a milliárd dollár nagyságrendjébe esik. Számunkra ez az irány nem volt járható. Ezért az ELTE-n kifejlesztettünk egy szuperszámítógépet, mely a részecskefizikai felhasználásokban versenyképes a japán géppel, de annak töredékébe kerül. Ez amiatt van, hogy mi személyi számítógépekből építkezünk, és nem készen veszünk a szuperszámítógépet. A személyi számítógépek a számítási képességeikhez képest – óriási piacuk miatt – nagyon olcsók. A hétköznapi életben a számítógépipar egyik húzóereje a számítógépes játékok iránti igény. E játékok megvalósítása során a háttérben olyan műveleti struktúrát használnak fel, amely matematikai értelemben nagyon hasonló (szakkifejezéssel: azzal lokálisan izomorf) a standard részecskefizikai elmélet egyik szimmetriatranszformációjához. Ameddig a személyi számítógépek gyártói arra törekednek, hogy a játékprogramok minél gyorsabban fussanak, és ennek megfelelően huzalozzák be a processzorokat, addig az ezeket felhasználó részecskefizikai számítások is egyre gyorsabbak lesznek. Persze, a programozás terén el kell menni a megfelelő szintig.

Miután az erős kölcsönhatás elméleti háttérét megértettük, és rendelkezünk a megfelelő számítógépes kapacitással, hozzákezdhetünk az eredeti kérdésünk megválaszolásához, nevezetesen, el kell döntenünk, hogy az erős kölcsönhatás magas hőmérsékletű átmenete elsődrendű fázisátmenet volt vagy egy analitikus crossover. A fázisátmenetekkel kapcsolatos kérdések vizsgálatához az úgynevezett véges méret skálázást szokás használni. A fázisátmenetekre jellemző szinguláris viselkedés csak végtelen térfogatú rendszerekben jelentkezik. Véges térfogaton semmilyen szingularitást nem látunk. A fajhő nem válik végtelenné (bár értéke elég nagy lesz), a víz sűrűsége nem ugrik (bár igen gyorsan változik). Az analitikus, crossover típusú átmenetekre viszont eredendően az ilyen gyors, de szingularitástól mentes változás jellemző mind véges, mind végtelen térfogaton. Hogyan tudunk akkor különbséget tenni véges térfogaton vagy térfogaton egy valódi fázisátmenet és egy analitikus, crossover típusú átmenet között? Erre a célra dolgozták ki a véges-méret-skálázás elméletét.

Egy valódi elsődrendű fázisátmenet esetén a fajhő (az átmeneti hőmérsékleten) a térfogat növelésekor a térfogattal arányosan, minden határon túl nő. A víz példájánál maradván: a sűrűség hőmérséklet szerinti deriváltja, bár nem végtelen (a sűrűség nem ugrik), de a rendszer méretének növelésével, ugyancsak a térfogattal arányosan divergál. A másodrendű fázisátmenetek hasonlóan viselkednek. Az említett fizikai mennyiségek a térfogat növelésé-



2. ábra. Az erős kölcsönhatás egyik (a víz fajhőjéhez hasonló) fizikai mennyiségének vizsgálata. A hőmérséklet függvényében a maximumot kerestük. A három pont a három különböző térfogaton kapott eredményt, illetve azok hibáját mutatja. A folytonos vonal jelzi a végtelen térfogati extrapolációt. A pontozott, illetve szaggatott vonal jelzi a várt viselkedést elsőrendű és másodrendű fázisátmenet esetén. A számítások teljesen más, analitikus átmenetre jellemző térfogatfüggést mutatnak.

vel a másodrendű fázisátmenet esetében is divergálnak. A legfontosabb különbség az, hogy ez a minden határon túl történő növekedés nem a térfogattal, hanem annak valamilyen, általában egynél kisebb, hatványával történik. A divergencia megjelenik, de enyhébb formában. Analitikus, crossover típusú átmenet esetén a kép teljesen más. A megfelelő fizikai mennyiségek nem nőnek a térfogat növelése során. Enyhe térfogatfüggést kell tapasztalnunk, mely nagy térfogatokra fokozatosan eltűnik.

Számításaink során egy, a sűrűség deriváltjához hasonló mennyiség hőmérsékletfüggését határoztuk meg három különböző térfogaton és négy különböző térbeli felbontás, rácsállandó mellett. (A konkrét mennyiség, amelyet vizsgáltunk, a kvarkterek kondenzátuma, mely a sűrűséggel analóg, illetve ezen kondenzátum hőmérséklet szerinti deriváltja volt. Elsőrendű fázisátmenet esetén a kondenzátum értéke ugrana, a kondenzátum hőmérséklet szerinti deriváltja pedig végtelenné válna.) A tipi-

kus térbeli felbontás a meteorológiai felbontásokhoz képest meglehetősen kicsiny $0,000\,000\,000\,000\,001$ cm. A négy különböző felbontást használva mindhárom térfogaton meghatároztuk a fenti fizikai mennyiség hőmérsékletfüggéséhez tartozó maximumot. Ez a három különböző térfogaton három különböző eredmény. A kérdés, hogy ez a három eredmény a fázisátmenetekre jellemző térfogatfüggést mutatja-e vagy sem. A 2. ábra illusztrálja a végeredményt. A sűrűség hőmérséklet szerinti deriváltjához hasonló mennyiség inverzét ábrázoljuk a térfogat inverzének a függvényében. (Az egyszerűbb ábrázolás kedvéért mindkét mennyiséget dimenziótlantítottuk a hőmérséklet és a kvarktömeg segítségével.) A három térfogathoz tartozó eredményt, valamint azok hibáját az ábra pontjai mutatják. A végtelen térfogati határesetet a függőleges tengely közvetlen környezete jelzi (hiszen a térfogat inverzének függvényében ábrázoltuk az eredményt). Valódi fázisátmenet esetén a vizsgált mennyiség a térfogat növelésekor minden határon túl nőne, azaz az inverze nullához tartana. Ez azt jelenti, hogy a három pontnak az origóhoz kellene tartania. A két vonal jelzi, hogy ez hogyan valósulna meg első-, illetve másodrendű fázisátmenet esetén. Ahogy látható, az eredmények egyáltalán nem ezt a fajta viselkedést mutatják. A térfogat növelésekor a vizsgált mennyiség konstans értékhez tart. Az erős kölcsönhatás átmenetéről így beláttuk, hogy az nem egy valódi szingularitással jellemezhető fázisátmenet, hanem egy analitikus, crossover típusú átmenet.

Összegzőképpen a következőket mondhatjuk. Az erős kölcsönhatás alacsony és magas hőmérsékleti viselkedése jelentősen eltér. A két tartomány közötti átmenetet alapelvek segítségével vizsgálhatjuk. A számítások elvégzéséhez a saját fejlesztésű szuperszámítógépek költségkímélő megoldást jelentettek. Az átmenetről sikerült megmutatni, hogy az nem a víz forrásához hasonló fázisátmenet, hanem egy analitikus, úgynevezett crossover. Az átmenet típusának meghatározása a korai Univerzum (Big Bang) és a jelenleg is folyó nehézionkísérletek (Little Bang) folyamatainak megértése szempontjából volt fontos.

RÉSZECSKEFIZIKA, AMI A NATURE SZERKESZTŐIT IS FELVILLANYOZTA!

Nincs emlékem arról, hogy valaha is megjelent volna egy elméleti részecskefizikai cikk a természettudományos „kutatási divatot” meghatározó hetilapban, a *Nature*-ben. 2006. október közepén megtörtént ez a csoda, sőt, a kiemelkedő érdekességű publikációkat megillető értelmező kommentárt egy Nobel-díjas fizikus írta. A cikket ugyan *Aoki* et al. szerzőmegjelöléssel fogják idézni, ám az ABC-sorrend miatt első helyre került japán kutató kivételével minden szerzője magyar.

Az eredményt és annak hátterét a nevezetes esemény apropóján a *Fizikai Szemle* olvasóinak is bemutató – a

kutatást vezető két kollégánk, *Fodor Zoltán* és *Katz Sándor* által írt – cikk nem igényel további értelmezést. Az én szubjektív megjegyzéseim az elsőrangú eredmény szokatlan publikálási helyválasztásának okát keresgélük.

„A *Nature* – politikai lap” – mondta egy-két éve a véres komolyság arckifejezésével egy kollégám. „Ha a *Nature* azt írja, hogy az emberi aktivitás tíz éven belül visszafordíthatatlanná teszi a globális felmelegedést, akkor egy hét sem kell, hogy a világ vezető politikai napilapjaiban ezt valamiképpen (esetleg szó szerinti fordításban) hírül adják. Ha egy-két hónap vagy év múlva az újság helyt ad va-