

RÉSZLETES KUTATÁSI BESZÁMOLÓ 2002--2005

1. Rács QCD termodinamikája

A kvantum-színdinamika (QCD) nemeltűnő hőmérsékleten és barionsűrűségnél fontos szerepet tölt be a részecskefizikában. Segítségével írjuk le azokat a folyamatokat, melyek a korai világegyetemben, a neutroncsillagokban és a nehézion ütközésekben zajlanak le. A QCD egy aszimptotikusan szabad elmélet. Ez egyben azt is jelenti, hogy a QCD magas hőmérsékletű és nagy sűrűségű viselkedését partonok (kvarkok és gluonok) segítségével írjuk le, szemben az alacsony hőmérsékletű és kis sűrűségű tartománnyal, amelyben a tipikus szabadsági fokok a hadronok (barionok, mezonok). A két különböző szabadsági fokokkal rendelkező tartományt fázisoknak (kvark-gluon plazma, illetve hadronikus fázis) nevezzük, melyek közötti átmenet vizsgálata alapvető fontosságú. Ezen két fázison túl a közelmúltban számos elképzelés született arra vonatkozóan, hogy a nagy sűrűségeknel fellépő szín-szupravezetés milyen további fázisokat eredményez.

A kísérleti fizikusok a CERN-ben és Brookhaven-ben jelentős erővel kutatják a fenti fázisátmenetet és próbálják egyértelműen igazolni a kvark-gluon plazma létét. A kísérleti munkák mellett alapvető fontosságú, hogy elméletileg is minél többet tudjunk meg a kvark-gluon plazmáról. Nagyléptékű rácsszimulációk segítségével már eddig is számos kérdést sikerült tisztázni, és várható, hogy az átmeneti hőmérséklet vagy az állapotegyenlet meghatározása először ezen Monte-Carlo szimulációk segítségével fog megvalósulni.

A QCD nemeltűnő sűrűségek mellett (melynek hangolására a barionikus kémiai potenciált szokás használni) könnyen definiálható téridő rácson. Lényegesen több problémát okoz a jól definiált elmélet állapotösszegének a kiszámítása. Ezen mennyiség kiszámításához semmilyen fontossági minta vételezésen alapuló Monte-Carlo eljárás nem használható. Ennek oka az előjel problémában keresendő. Nemeltűnő barionikus kémiai potenciál mellett az integrálási mérték – az euklideszi Dirac-operátor determinánsa - komplex értékeket vesz fel. Ez a komplexitás az állapotösszegben megjelenő tagok erős oszcillációjához vezet, mely gyakorlatilag kiszámíthatatlanná teszi az állapotösszeget. Az OTKA támogatási ideje előtti 20 évben számos javaslat született a probléma kezelésére. Sajnos az összes javaslat eredménytelennek bizonyult.

A kutatási terület új lendületet nyert két 2002-ben publikált dolgozatunk révén. Ebben a két dolgozatban kidolgoztuk az úgynevezett átfedést javító multiparaméteres átsúlyozás módszerét. Ezen módszer azon a megfigyelésen alapul, hogy a zérus vagy imaginárius kémiai potenciál mellett történő, fontossági minta vételezésen alapuló Monte-Carlo eljárással nyert konfigurációk fizikailag hasonlóak a fázisdiagramm magas hőmérsékletű, nemzérus kémiai potenciál mellett fellépő konfigurációihoz. A hasonlóság a komplex Boltzmann súlyok eloszlásából következik. Az első fizikai alkalmazás során, mely 2002-ben került publikálásra, meghatároztuk a 4 ízt (flavour) tartalmazó QCD fázisgörbét. A második alkalmazás során, melyet ugyancsak 2002-ben publikáltunk, a 2+1 ízt tartalmazó QCD kritikus pontját lokalizáltuk. Ezen munka lényege az átfedést javító multiparaméteres átsúlyozás alkalmazása mellett az állapotösszeg Lee-Yang gyökeinek véges méret analízise. Ebben a két munkában még a fizikainál nehezebb kvark tömegek szerepeltek, melyek nem túl nagy számítógépes kapacitással is kezelhetők. Az analízist 2004-ben elvégeztük fizikai kvarktömegekre is. (A dolgozatok jelentőségét mutatja, hogy az elmúlt évek leghivatkozottabb rács cikkei közé tartoznak, pl. a 2+1 ízt tartalmazó QCD kritikus pontját lokalizáló eredmény 2003-ban a leghivatkozottabb munka volt.)

A fenti analízisek számítási szempontból legköltségesebb része, a módosított fermion mátrix diagonalizálása. Kidolgoztunk egy eljárást, mely tetszőleges kémiai potenciál mellett megadja a fermionmátrix komplex értékű determinánsát. Ez lényegesen csökkenti a számítási igényt és elkerüli az egyes Riemann-síkok választásából adódó többértelműséget. A módszert publikáltuk. Az alkalmazott eljárás során a CPU költségek a rácsállandó inverzének a 9-ik hatványával növekednek, míg a memóriaigény a rácsállandó inverzének a 6-ik hatványával skálázik. A gépidőigény növekedése megfelel a rácstérelméletben szokásosnak. A rácsállandó csökkentése nemcsak a rács térfogatának növekedését eredményezi, hanem a kisebb kvarktömeg a Monte-Carlo szimulációkban fellépő konjugált gradiens eljárás konvergenciáját is lassítja. A memóriaigény növekedése meghaladja a rácstérelméletben szokásos mértéket (a memóriaigény általában a rácsállandó inverzének a 4-ik hatványával skálázik). Ez különösen fontossá teszi az eljárás parallelizálását. Bár ezt a munkát lényegében elvégeztük, ki kell várnunk, hogy a rendelkezésre álló gépidő elegendő legyen nagyobb rácsok (itt elsősorban a 6-os térirányú kiterjedésre kell gondolni) vizsgálatához.

Ugyanezt - az átfedést javító multiparaméteres átsúlyozás módszerét - használtuk a QCD állapotegyenletének meghatározásakor. Ennek fizikai oka az, hogy az átsúlyozás során nemcsak a hadronikus fázis és a kvark-gluon plazma közötti átmenetre jellemző konfigurációsokaság képezhető le nemeltűnő kémiai potenciálra, hanem a hadronikus illetve kvark-gluon plazma fázisokra jellemző konfigurációsokaságok is. Az állapotegyenlet meghatározásában központi szerepet játszó nyomás arányos az állapotösszeg logaritmusával. Maga az állapotösszeg direkt meghatározása nehéz, lényegesen egyszerűbb a valamely paraméter szerinti derivált kiszámítása. A deriváltakat számos hőmérsékletre megadjuk, majd a hőmérséklet szerint integrálunk. Így kapjuk meg a nyomást a hőmérséklet függvényében. Az állapotegyenlettel kapcsolatos munkákban a fent vázolt integrál módszert használtuk. Az integrálás az úgynevezett állandó fizika vonala mentén történt. Ezen munkák előtt az irodalomban általános volt az olyan integrálási görbék választása, melyek mentén az elmélet fizikai tartalma változott (például, ha az állapotegyenletben szereplő magas hőmérsékletű, de még mindig hadronikus fázist, illetve az átmeneti hőmérsékletnél négyszer magasabb hőmérséklettel rendelkező fázist lehűtöttük volna zérus hőmérsékletre, a piontömegek egy kettes faktor erejéig eltértek volna). A kvark-gluon plazma önkölcsönhatása miatt a nyomás kisebb az ideális gáz nyomásánál. Ezzel a különbséggel egy nagyságrendbe esik az állandó fizika vonalának mellőzéséből származó hiba. Ez mutatja, hogy mennyire lényeges, hogy az analízis az állandó fizika vonala mentén történjen. Az állapotegyenletre vonatkozó rövidebb analízist 2002-ben, az átfogóbb, részletesebb eredményeket 2004-ben publikáltuk.

A fenti munkák 0.20-0.25 fm rácsállandójú rácsokat használtak. A rács fizikai kiterjedése térbeli irányban kb. 3 fm volt. A számolások során - ha nem is mindig - a fizikai kvarktömegeket is képesek voltunk elérni. Az egyetlen, igaz rendkívül nehéz feladat, amely még hátramaradt, az a kontinuum limesz elérése. Ezen határérték elérése egyre kisebb és kisebb rácsállandóknál történő Monte-Carlo szimulációkkal, majd az eredmények extrapolálásával valósítható meg. Az extrapoláció rácsállandó függése ismert (pl. nem javított bozonikus valamint staggered fermionikus esetekben a rácsállandó négyzetétől függ az eltérés, nem javított Wilson fermionok a rácsállandóban lineáris függést mutatnak; a javított hatások rácsállandó függése a fentieknél kedvezőbb).

Ezen eredmények és megfontolások alapján láttunk neki ahhoz a kutatási témához, amely a QCD termodinamikájának kontinuum határesetét vizsgálja fizikai kvarktömegek mellett. Az általunk választott hatás a bozonikus szektorban fagráf szintű Symanzik javítást, a

fermionikus szektorban stout javított staggered kvarkokat alkalmaz. A választást a fizikai motivációkon kívül a rendelkezésre álló gépidő mennyisége is indokolta. Mivel a fermionikus hatás a rácsállandóban négyzetes viselkedést mutat, ezért nem szükséges a bozonikus hatás fagráf szintű Symanzik javításán túlmenni. Az általunk alkalmazott hatás legfontosabb tulajdonsága a fermionikus szektorban a stout javítás. Ezen javítási eljárás legfőbb következménye az íz (taste és nem flavour!) szimmetriasértés nagyfokú redukálása. Ez az íz szimmetriasértés vezet ahhoz a nemfizikai spektrumhoz, melyben egyetlen pszeudo-Goldstone bozonként interpretálható pion jelenik meg, míg a számos nehezebb pion csak a kontinuum limeszben adja vissza az elvárt fizikai tartalmat. A stout javítás a pionok közötti felhasadást jelentősen lecsökkenti, így a véges hőmérsékletű vizsgálatokhoz (melyek tipikus átmeneti hőmérséklete meg kell, hogy haladja a pionok tömegét) elengedhetetlen. A stout hatás legnagyobb előnye az irodalomból ismert más simítási eljárásokkal szemben az analitikus, zárt formában felírható alakja. Ez az alak lehetővé teszi a fermionikus erő explicit felírását, és ezen erő hibrid Monte-Carlo eljárásba való beépítését. Ezt elvégeztük, és az erőt egy egzakt RHMC (racionális hibrid Monte-Carlo) algoritmus révén implementáltuk. Az eredmények publikálásra kerültek.

Ezzel a hatással és a rendelkezésre álló gépidővel meghatározható az átmenet rendje két különböző rácsállandó mellett (a rács időirányú kiterjedése 4 és 6); megadható az állapotegyenlet három különböző rácsállandó mellett; (a rács időirányú kiterjedése 4, 6 és 8) végül kiszámítható az átmenethez tartozó hőmérséklet négy különböző rácsállandó mellett (a rács időirányú kiterjedése 4,6,8 és 10). A 2002-től 2005-ig terjedő, az OTKA fenti pályázata által támogatott időszakban, megadtuk a QCD állapotegyenletét fizikai kvarktömegek esetén két különböző rácsállandó mellett (ez az eredmény már publikálásra is került), valamint meghatároztuk a hadronikus fázis és a kvark-gluon plazma fázisok közötti átmenet rendjét ugyancsak fizikai kvarktömegekre két különböző rácsállandó mellett (ez az eredmény még nem került publikálásra, a megjelentetés éppen folyamatban van).

2. Egzotikus hadronok spektroszkópiája

Évtizedek óta nyitott kérdés, hogy a két- és háromkvark kötött állapotok mellett (mezonok és barionok) vannak-e több kvarkból álló hadronok. 2003-ban Japánban sikerült egy nukleonra és kaonra bomló rezonanciát észlelni. A pozitív kísérleti eredményt tucatnyi megerősítés követte. Mivel a hadronok szerkezetét, spektrumát a QCD Lagrange-függvénye egyértelműen megadja, és a konkrét meghatározás során az egyetlen szisztematikus módszer a rácstérelmélet, kézenfekvőnek tűnt, hogy a pentakvarkok kérdését is a rács QCD segítségével vizsgáljuk meg. Az első ilyen irányú publikációnkban lefektettük a pentakvarkok tanulmányozásához szükséges eljárásokat. Két operátort használtunk, melyek a pentakvarkok kvantumszámaival rendelkeznek. Diszkutáltuk a keresztkorrelációs eljárás fontosságát, és felhívtuk a figyelmet a szórási állapotok és a rezonanciák között fennálló térfogatfüggésbeli különbségekre. A spektrumban a várt helyen egy állapot mutatkozott, melynek interpretálása során tisztáztuk az egyértelmű észleléshez szükséges lépéseket.

A munka jelentőségét mutatja, hogy az elmúlt évek leghivatkozottabb rácseredményei közé tartozik. A rácsirodalom legelső pentakvark cikkeként 2004-ben a valaha írt rács munkák között a második leghivatkozottabb volt.

Következő dolgozatunkban elvégeztük ezeket, az első dolgozatban diszkutált analíziseket. Ahogy fent említésre került, ezen lépések elengedhetetlenek az eredmények egyértelmű értelmezéséhez. A keresztkorrelátor több tucat nemeltűnő elemet tartalmazott. Az operátorok

közé felvettünk nemtriviális térbeli szerkezettel rendelkező objektumokat is. Részletesen analizáltuk a keresztkorrelátorok diagonalizálása után származtatott energiaszintek térfogatfüggését. A magunk elé tűzött cél túlmutatott egy adott fizikai kérdés analízisén. Szerettük volna a kérdéskört elméletileg lezárni, mielőtt a legnagyobb szignifikanciával rendelkező, pozitív pentakvark jelet észlelő JLab-beli kísérlet a statisztika megtízszerezésével az elméleti fizikusok számára már csak posztdikciókat (és nem predikciókat) tesz lehetővé. A rácstérelméleti eredményünk negatív volt. A széles operátorbázis alapján a térfogatfüggés szórási állapotokat mutatott, és nem láttunk jelet a pentakvark tömegének megfelelő helyen. A számos pozitív kísérleti eredmény ellenére vállaltuk a kockázatot, és publikáltuk a negatív elméleti eredményt. Azt jósoltuk (az általunk használt kvarktömegek és rácsállandók mellett), hogy nem létezik pentakvark rezonancia. Ez a kockázatos lépés helyesnek bizonyult. Hét héttel az elméleti dolgozatunk (archívumbeli) megjelenése után a JLab sajtóközleményt bocsátott ki, melyben kijelentette, hogy az eddigi eredményeikkel ellentétben, a kísérleteik az összes többi kísérletet lényegesen meghaladó statisztika mellett sem észlelték a várt helyen a pentakvark rezonanciát. Rácseredményünk korrekt predikciónak bizonyult.

3. Ultranagyenergiás kozmikus sugárzás vizsgálata

Mintegy 40 évvel ezelőtt észleltek először a GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) határon túli kozmikus sugárzásokat. Az elmúlt 40 év kísérletei tucat számra figyeltek meg ilyen ultra nagy energiás kozmikus sugarakat (ezen sugarak energiája a proton tömegét több mint tíz nagyságrenddel haladja meg). Azért meglepő ez az eredmény, mert ilyen energián a kozmikus protonok kölcsönhatnak a kozmikus háttérfotonokkal és delta rezonancián keresztül pionkeltés mellett elveszítik energiájuk jelentős részét. A folyamat tipikusan 50 Mpc távolság után következik be. Ezen folyamat az észlelésekkel összevetve egy rendkívül meglepő paradoxonra vezet, hiszen a pionkeltés miatt ilyen energiájú részecskék nem terjedhetnek 50 Mpc-nél messzebbre, ugyanakkor semmilyen ismert forrás nincs a Föld 50 Mpc-es környezetében.

Két dolgozatban részletesen tanulmányoztuk a folyamatért esetleg felelőssé tehető Z-robbanás mechanizmust. Az ultranagyenergiás kozmikus neutrínók lényeges energiavesztés nélkül tudnak akár az univerzum méretével is összemérhető távolságokon propagálni. Ezen neutrínók a föld közelében kis százalékban kölcsönhatnak a mindenütt jelenlévő kozmikus háttérneutrínókkal. A kölcsönhatás során egy nagyenergiás Z-bozon keletkezik (innen az elnevezés: Z-robbanás, Z-burst). A föld felé nagy energiával közeledő Z-bozon a LEP gyorsítónál megismert módon elbomlik. Ezen bomlástermékek között számos nukleon is lehet, melyeket a földi detektorok észlelnek. Mivel a háttérneutrínók tömege határozza meg azt az energiát, amellyel a bejövő ultranagyenergiás neutrínóknak rendelkezniük kell a Z-bozon keltéséhez, ezért az észlelt spektrum érzékeny erre a tömegre. Az elméleti és a kísérleti eredmények összevetéséből jóslatot lehet mondani a legnehezebb neutrínó tömegére. A munka aktualitását és a nemzetközi közösség érdeklődését mutatja, hogy a két dolgozat közül az egyik majdnem 100, a másik pedig már 100-at meghaladó hivatkozással rendelkezik.

A neutrínók más módon is lehetőséget adnak a GZK paradoxon megválaszolására. Egy erősen kölcsönható neutrínó forгатókönyv szerint a neutrínó-kvark hatáskeresztmetszet az energia növelésével drámai módon megnő (egy lehetőség az elektromos szfaleronokon keresztül történő hatáskeresztmetszet növekedés). Ezen megnövekedett hatáskeresztmetszet neutrínók által indukált záporokat kelt, melyet GZK határon túli eseményekként értelmezünk. Ezt az elképzelést részletesen kidolgoztuk és publikáltuk.

Az ultranagyenergiás neutrínók fluxusa meghatározható az észlelt protonspektrum alapján. Ezen észlelések egy torlódást mutatnak a GZK határ közelében. Ez annak tudható be, hogy azok a protonok, melyek a CMB fotonjaival kölcsönhatva energiájuk egy részét elvesztették, és immár a GZK határ alatti energiával rendelkeznek, kölcsönhatás és energiavesztés nélkül haladnak tovább. A spektrum ezen része feldúsul. A feldúsulás mértéke megadja az útközben keltett pionok mennyiségét és energiáját. Mivel a pionok neutrínókra (is) bomlanak a minimális neutrínóspektrum kiszámítható. Az analízist ezen úgynevezett kozmogenikus ultranagyenergiás neutrínókra elvégeztük és alsó korlátként publikáltuk.

Egy következő dolgozatban tovább vittük a gondolatmenetet, és megadtuk a fenti fluxus alapján a neutrínó-nukleon hatáskeresztmetszet felső korlátját. Ez a korlát abból a tényből származtatható, hogy nem észlelünk horizontális záporokat. Ezen horizontális záporok úgy keletkezhetnének, hogy a kozmogenikus neutrínók mélyen behatolnak az atmoszférába. Ez csak horizontális irányból lehetséges, hiszen vertikális irányban a levegőréteg igen vékony, néhány ezer méter. Mivel a kozmogenikus fluxus alsó korlátként értelmezhető, és horizontális irányban nem látunk záport, ez a hatáskeresztmetszetre egy felső korlátot jelent, melyet meghatároztunk.

Összefoglalásként érdemes megjegyezni, hogy a tudományos munkák valódi értéke csak hosszabb idő eltelte után kristályosodik ki. A tudományos közösség azonnali reagálása gyakran félrevezető. Az OTKA támogatás hasznosulását azonban mindenképp jelzi, ha megemlíjtjük, hogy már a támogatási időszak alatt a fenti 3 nagyobb témakör eredményeire közel 1500 hivatkozás érkezett.