

# Dinamikus fermionok és topologikus töltés a QCD véges hőmérsékletű átmenetében

Ismeretes, hogy az erős kölcsönhatást leíró kvantumszíndinamikában (QCD-ben) alapvető szerepet játszanak a Dirac operátor kis sajátértékeihez tartozó kvark állapotok. Ezek az állapotok szoros kapcsolatban vannak az alacsony energiás QCD két, máig igen kevésbé megértett alapvetőbb sajátosságával: a kvarkbezárással és a királis szimmetria spontán sérülésével. A Banks-Casher reláció szerint ugyanis a királis szimmetria sérülését jellemző rendparaméter arányos a nulla körüli kvark állapotok sűrűségével. Ugyanakkor általánosan elfogadott nézet, hogy ezeknek az alacsony kvark állapotoknak a létezéséért a gluontér topologikus gerjesztései, az instantonok felelősek.

Különösen érdekes kérdés, hogy milyen szerepet játszanak ezek az alacsonyan fekvő kvark állapotok a QCD véges hőmérsékletű bezáró-nem bezáró illetve a királis szimmetriát helyreállító átmenete során. Munkánkban azt vizsgáltuk, hogy milyen kapcsolat van a nagyjából azonos hőmérsékleten bekövetkező bezáró-nem bezáró illetve a királis átmenet között, valamint milyen szerepet játszanak mindebben az alacsony kvark módusok.

A dinamikus kvarkok elhanyagolásával kapott közelítő, ún. quenched elméletben a magas hőmérsékletű, nem bezáró fázisban spontán sérül a Polyakov hurok  $Z(N)$  szimmetriája. A kvarkok számára azonban a különböző  $Z(N)$  szektorok nem egyenértékűek: az  $SU(2)$  elméletben megmutattuk, hogy magas hőmérsékleten a +1-es szektorban nincsenek alacsony kvark állapotok, a -1-es szektorban azonban megmaradnak, így ott a Banks-Casher relációból láthatóan a királis szimmetria nem áll helyre. Dinamikus kvarkok jelenlétében a pályaintegrálban súlyfaktorként megjelenik a kvark Dirac operátor determinánsa is. Kimutattuk, hogy a két  $Z(2)$  szektor közötti különbségért a determinánsban a Dirac operátor legalacsonyabb sajátértékei felelősek: a kis sajátértékeket tartalmazó -1-es Polyakov szektort a determináns erősen elnyomja. A dinamikus kvarkok explicit  $Z(2)$  szimmetriasértéséért nagyrészt ez a mechanizmus felelős, így magas hőmérsékleten egyedül a királis szimmetriát mutató +1-es szektor marad meg. Ez a kép összhangban van az explicit dinamikus szimulációk eredményeivel.

A magas hőmérsékletű rendszerben egyre kevesebb instanton van jelen, és munkánkból kitűnik, hogy a megmaradó kis instanton sűrűséggel semmiképpen nincsenek összhangban -1-es (nem fizikai)  $Z(2)$  szektorban megmaradó alacsony kvark állapotok. Ennek a kérdésnek a részletesebb vizsgálatát a továbbiakban tervezzük.

A QCD alacsony hőmérsékletű fázisában az ún. királis véletlen mátrix modellek pontos statisztikus leírását adják a Dirac operátor kis sajátértékeinek. A magas hőmérsékletű fázisban azonban mindeddig nem volt ismert hasonló leírás. Munkánk során arra a meglepő következtetésre jutottunk, hogy a quenched  $SU(2)$  elméletben magas hőmérsékleten a Dirac operátor kis sajátértékei lényegében teljesen korrelálatlanok és általánosított Poisson statisztikát követnek. Ez azt jelenti, hogy az alacsony energiás kvark spektrumról minden statisztikus információt tartalmaz a spektrálsűrűség. Amennyiben ez az eredmény általánosan igaz az  $SU(3)$  mértékcsoport esetén és dinamikus kvarkok jelenlétében is, akkor ez a kvark spektrum olyan egyszerű, jól használható leírását fogja eredményezni, ami új fejezetet nyithat a QCD magas hőmérsékletű fázisának vizsgálatában. A dolgozatot, melyben erről az eredményről beszámoltunk, a Physical Review Letters közlésre elfogadta.

## Egzotikus hadronok rácson

A 2003-ban kísérletileg megfigyelni vélt egzotikus „pentakvark” hadron létezésének lehetőségét vizsgáltuk rác szimulációkban. Megelőző munkánkból kitűnik, hogy a feltételezhető legegyszerűbb öt-kvark állapotok létezése nagy bizonyossággal kizárható. Valószínűnek tűnt azonban, hogy amennyiben öt-kvark kötött állapotok léteznek a természetben, akkor azok nem a rácson egyszerűen megvalósítható, teljes forgásszimmetriával rendelkező hullámfüggvényűek. Az irodalom alapján a legvalószínűbbnek látszó lehetséges hullámfüggvény két egyes relatív pálya-impulzusmomentumú dikvarkot tartalmaz a Jaffe és Wilczek által leírt kombinációban.

Ennek a lehetőségnek a vizsgálatára eddigi munkánkat kiterjesztettük úgy, hogy térben nem-triviális öt-kvark hullámfüggvények használata is lehetővé váljék. Ezen, jelentős technikai nehézségekkel járó, számolás segítségével elsőként mutattuk ki a QCD alapelveiből kiindulva, hogy e fent leírt hullámfüggvényű öt-kvark állapotok létezése nagy valószínűséggel kizárható. Eredményünk összhangban áll a későbbi, nagyobb statisztikájú kísérleti eredményekkel, amelyekben ugyancsak nem sikerült kimutatni az adott kvantumszámokkal rendelkező egzotikus részecskék létezését. A konkrét fizikai eredményeken kívül vizsgálataink értékes tapasztalatokkal szolgáltak bonyolultabb hadronikus állapotok rácson történő vizsgálatához, például a kísérletileg jól ismert alacsony gerjesztett állapotok tanulmányozásához.

## **Nem hagyományos termodinamika a QCD magas hőmérsékletű fázisátalakulásában**

Az erősen kölcsönható anyag fázisszerkezetének pontos feltérképezése a jelenlegi nagyenergiás fizikai kutatások egyik fontos célkitűzése. A kvarkbezáró illetve szabad fázisok közötti átmenet leírása általában a hagyományos egyensúlyi termodinamikán alapul. Ez a leírás a kanonikus eloszlás következtében exponenciális részecskespektrumokat szolgáltat. Ugyanakkor a nehézion reakciókban kísérletileg meghatározott pion, kaon, stb. spektrumokban az exponenciális tartományok mellett hatványfüggvény viselkedésű tartományok is megfigyelhetők. Ez a hagyományostól eltérő részecskeeloszlás arra utalhat, hogy az extrém körülmények között jelen lévő erősen kölcsönható forró kvarkanyag a hagyományostól eltérő termodinamikai viselkedést mutathat. Ennek leírására alkalmazható a hatványfüggvény jellegű ún. Tsallis eloszlás. Munkánkban arra kerestünk választ, hogy a szokásos Boltzmann eloszlás helyett Tsallis eloszlást feltételezve hogyan módosulnak a rendszer alapvető termodinamikai tulajdonságai.

Ehhez először is szükség volt a Tsallis eloszlás megvalósítására rácstérelméleti szimulációkban. Ez technikailag úgy valósítható meg, hogy a termodinamikai rendszer hőmérsékletét nem rögzítjük, hanem Gamma eloszlás szerint fluktuál. Kis rácson végzett számításainkkal igazoltuk, hogy a szokásos Monte Carlo algoritmusok nem-triviális módosításával ilyen szimulációk elvégezhetők. Ugyancsak kis rácson sikerült kimutatnunk a bezáró és nem bezáró fázis közötti átmenet létezését.

A bezáró-nem bezáró átmenet tulajdonságainak pontosabb vizsgálatához, valamint az állapotegyenlet meghatározásához szükség lenne az számolások nagyobb rácson való megismétlésére (termodinamikai limesz). Ehhez azonban javítani kellene az algoritmus hatékonyságát is. Ez a munka pillanatnyilag folyamatban van, és az eddigi részeredmények alapján úgy látszik, hogy a számolások kivitelezhetők lesznek a rendelkezésre álló számítási kapacitás segítségével.

## **Casimir effektus vizsgálata rácson**

Rácstérelméleti módszerekkel vizsgáltuk erősen kölcsönható terek Casimir energiáját. Célunk egy szisztematikus nem-perturbatív numerikus módszer kidolgozása volt, amely - ellentétben az analitikus számolásokkal - bonyolultabb kölcsönható rendszerekre is használható. A módszert először a dobozba zárt szabad skalártér esetén teszteltük, melyre az analitikus közelítés is ismert. Megmutattuk, hogy zérus tömegű terekre periodikus határfeltételek esetén a rácstérelméleti szimuláció az analitikus számolásokkal kvalitatív összhangban van. Tömeges terek esetén, valamint Dirichlet határfeltétel használatánál azt találtuk, hogy a Casimir effektust teljesen elfedi a szimulációban jelen lévő statisztikus zaj. Jelenleg a határfeltételeket pontosabban figyelembe vevő módszer kifejlesztésén dolgozunk, melynek használatával ez a probléma remélhetőleg kiküszöbölhető lesz.