

Doktori értekezés tézisei

Erősen kölcsönható anyag vizsgálata effektív modellekben

Herpay Tamás

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar
Fizika Doktori Iskola

Témavezető: Dr. Szépfalusy Péter, az MTA r. tagja, professzor emeritus

Doktori iskola vezetője: Dr. Horváth Zalán, az MTA r. tagja, egyetemi tanár
Doktori program vezetője: Dr. Vicsek Tamás, az MTA r. tagja, egyetemi tanár

Komplex rendszerek fizikája tanszék

2006. December

Bevezetés

A kvark modell szerint az erősen kölcsönható részecskék (hadronok) hat különböző „ízű” kvarkból, az ún. u , d , s , c , b , t kvarkokból épülnek fel, melyek dinamikáját a kvantumszíndinamika (QCD) írja le. A QCD egy *Yang Mills* (nem Abeli) mértékelmélet, melyben a kvarkok közti kölcsönhatást a gluonok mint mértékbozonok közvetítik. Alacsony energiaskálán ez a kölcsönhatás nagyon erős, így ekkor a kvarkok be vannak zárva a hadronokba (confinment). Azonban ez az erős kölcsönhatás a nem Abeli mértékelméletekre jellemző aszimptotikus szabadság miatt az energiaskála növekedésekor egyre gyengül és így azt várjuk, hogy elegendően nagy energiasűrűség (hőmérséklet és/vagy sűrűség) esetén a kvarkok, gluonok kiszabadulhatnak (deconfinment) a hadronokból és az erősen kölcsönható anyag új, nem hadronikus formáit hozzák létre. Az ősrobbanást követő 10^{-6} másodperc környékét jellemző magas hőmérséklet és kis sűrűség mellett a kvarkok és gluonok kvark-gluon plazma állapotban voltak. Ilyen extrém körülmények nagyenergiás nehézion ütközésekben is kialakulhatnak, ami alapján jelenleg is folynak kísérletek a QGP kimutatására a brookhaveni RHIC gyorsítóban, és részben ezért épül a CERN új LHC gyorsítója, valamint a darmstadti GSI-ben egy új speciális gyorsító. Elméleti szempontból a QGP állapot kialakulása numerikus rácsstérelméleti szimulációkkal vizsgálható, hiszen ez egy erősen nem-perturbatív jellegű folyamat és ilyen folyamatok leírására jelenleg nincs analitikus módszer a QCD -ben. Azonban számos jel utal arra, hogy a QGP kialakulásával párhuzamosan helyreáll a QCD globális szimmetriája, az ún. királis szimmetria is amely a hadronikus fázisban sérül. Ez a kérdés pedig numerikus szimulációk mellett az erős kölcsönhatást leíró ún. királis effektív modellekben is vizsgálható, mert az ilyen modellek konstrukciójának alapgondolata éppen az, hogy ugyanolyan globális szimmetriával rendelkeznek mint maga a QCD . Ezen modellek közös vonása, hogy az alacsony energián domináns erősen kölcsönható részecskék dinamikáját írják le, viszont a mértékszimmetriát nem tartalmazzák és így jóval egyszerűbbek mint a QCD . Ez lehetővé teszi, hogy segítségükkel analitikus (közelítő) módszerekkel vizsgáljuk a királis szimmetria spontán és explicit sérülését. Az ilyen kutatások pedig különösen alacsony kvark tömegek mellett jól kiegészítik a numerikus rácsstérelméleti szimulációkat, ahol azok a korlátozott számítástechnikai teljesítmény miatt a nagy korrelációs hosszak igényét nem tudják kielégíteni. Doktori munkám során két effektív elmélet, a királis perturbációs számítás és a lineáris szigma modell segítségével vizsgáltam a királis szimmetria sérülését a hőmérséklet függvényében.

A természetben hat különböző kvark íz fordul elő, viszont a hadronos anyagra jellemző hőmérséklet tartományban elegendő a relatíve könnyű u, d, s kvarkok termikus fluktuációit figyelembe venni. Ekkor a királis szimmetria azt jelenti, hogy zérus kvark tömegekre a QCD Lagrange függvénye invariáns a kvarkíz térben végzett globális, ún. királis $SU(3)_A \times SU(3)_V$ transzformációkra. Ez a szimmetria azonban alacsony hőmérsékleten spontán sérül, mert az alapállapot nem invariáns $SU(3)_A$ axiálvektor transzformációkra, ami miatt a hadronok multiplettekbe rendezése az $SU(3)_V$ szimmetria alapján lehetséges, és nyolc darab goldstone bozon (pionok, kaonok, éta mezon) jelenik meg a spektrumban. A hadron spektrumban azonban csak közelítőleg teljesül az $SU(3)_V$ szimmetria, amit az okoz, hogy a nem nulla kvark tömegek miatt a QCD királis szimmetriája expliciten is sérül, és így a pion, kaon, éta mezonok tömege is csak közelítőleg nulla (pszeudo Goldstone bozonok). Doktori munkámban azt vizsgáltam, hogy a szimmetriasértő tömegek függvényében, milyen a királis szimmetriát jellemző rendparaméterek hőmérsékletfüggése. Ez a lineáris szigma modell szintjén azt jelenti, hogy a pion, kaon tömegek függvényében határoztam meg a skalár mezon terek várhatóértékének hőmérsékletfüggését.

A munka célkitűzése

A lineáris szigma modell keretein belül megvizsgálni, hogy izospin szimmetrikus esetben, nulla kémiai potenciál mellett a pion, kaon tömegek függvényében a hőmérséklet növelésekor milyen módon áll helyre az erős kölcsönhatás királis szimmetriája. Ennek eredménye egy olyan fázisdiagramon foglalható össze, amely megadja, hogy az $m_\pi - m_K$ sík egyes tartományaiban a királis szimmetria első vagy másodrendű fázisátalakulással, illetve sima folytonos átmenettel áll helyre a hőmérséklet növelésekor.

Alkalmazott módszerek

- A lineáris szigma modell paramétereinek m_π, m_K tömegek függvényében való rögzítéséhez a királis perturbációs számítás segítségével határoztam meg a paraméterezésre használt fizikai mennyiségek m_π, m_K függését.
- A termodinamikai számolásokat a véges hőmérsékletű kvantumtérelmélet keretein belül végeztem.

- A véges hőmérsékletű állapotegyenleteket az optimalizált perturbációs számítás segítségével felösszegzett propagátorokkal írtam fel.
- A paraméterezés és a véges hőmérsékletű számolások során fellépő integrálokat, nem lineáris egyenletrendszereket numerikusan oldottam meg.

Tézisek

- I. Kidolgoztam egy olyan új módszert a lineáris szigma modell paraméterezésének elfolytatására a fizikai pion, kaon tömegektől az $m_\pi - m_K$ síkra, amely a királis perturbációs számítás alkalmazásával figyelembe veszi a paramétereket meghatározó bomlási állandók és tömegek m_π , m_K függését is.
- II. Nulla hőmérsékleten, egy-hurok rendben felírt egyenletekkel paramétereztem az $SU(3)_L \times SU(3)_R$ lineáris szigma modellt, amely lehetővé teszi a véges hőmérsékletű számolásokban a teljes hurok integrál figyelembe vételét.
- III. A pion, kaon tömeg fizikai értéke mellett a királis szimmetria helyreállítására sima, folytonos átmenetet kaptam, összhangban más effektív elméletek és a legújabb rács szimulációk eredményeivel.
- IV. A véges hőmérsékletű számolások két különböző közelítésében meghatároztam a királis szimmetria fázisdiagramját az $m_\pi - m_K$ síkon, nulla barionikus kémiai potenciál mellett.
- V. Megtaláltam a fázishatár alacsony pion tömegekre várt skálázási tulajdonságát, melynek segítségével becslést adtam a trikritikus pont helyzetére.

Következtetések

A lineáris szigma modellben, mint effektív elméletben végzett vizsgálataim alátámasztották azt a legújabb kontinuumra extrapolált rácseredményt, mely szerint a fizikai pontban a hőmérséklet növelésekor, nulla barionikus kémiai potenciál mellett sima folytonos átmenet során áll helyre a királis szimmetria. A két különböző közelítésben kapott fázisdiagram és az irodalomban eddig megjelent eredmények összehasonlításából pedig azt kaptam, hogy a fázishatár alacsony pion tömegekre várt skálázási tulajdonsága csak akkor figyelhető meg, ha a modell paraméterezését a királis perturbációs számítással összhangban végezzük, valamint a véges hőmérsékletű számolásokban a teljes hurok integrált figyelembe vesszük.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk

Referált folyóiratban megjelent cikkek

- T. Herpay, A. Patkós, Zs. Szép and P. Szépfalusy, Mapping the boundary of the first order finite temperature restoration of chiral symmetry in the $(m_\pi - m_K)$ -plane with a linear sigma model, *Phys. Rev. D* **71**:125017, (2005)
- T. Herpay and Zs. Szép, Resummed one-loop determination of the phase boundary of the $SU(3)_R \times SU(3)_L$ linear sigma model in the $(m_\pi - m_K)$ plane, *Phys. Rev. D* **74**:025008, (2006)

Konferencia kiadványok

- T. Herpay, A. Patkós and Zs. Szép, Sensitivity of the chiral phase transition of QCD to the scalar meson sector, arXiv:hep-ph/0509150, *Gribov Memorial Volume; Quarks, Hadrons and Strong Interactions*, eds. Yu L Dokshitzer et al., p. 284-294, (2005)
- T. Herpay and Zs. Szép, The boundary of the first order chiral phase transition in the $(m_\pi - m_K)$ plane, arXiv:hep-ph/0608318, megjelenés alatt a Strong and Electroweak Matter (SEWM 2006) kiadványában

Konferencia előadások

- 2nd Vinna Central European Seminar on Particle Physics and Quantum Field Theory, Bécs, 2005
- XIII. Országos Magfizikus Találkozó, Jávorkút, 2006