

Doktori értekezés tézisei

**Véges sűrűségű és hőmérsékletű, erősen
kölcönható anyag vizsgálata királis
kvarkmodellben**

Kovács Péter

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar
Fizika Doktori Iskola

Témavezetők: Dr. Csikor Ferenc, DSc., egyetemi tanár
Dr. Szép Zsolt, PhD., tudományos munkatárs

Doktori iskola vezetője: Dr. Horváth Zalán
Doktori program vezetője: Dr. Csikor Ferenc

ELTE TTK Atomfizika tanszék

2008. Március

Bevezetés

A kvantumszindinamika, amely az erős kölcsönhatás fundamentális leírására szolgál, alapvető tulajdonsága – az aszimptotikus szabadság – alapján az az általános elvárás, hogy a normál körülmények között tapasztalt hadronikus anyag magas hőmérsékleten a természet manapság ismert legkisebb építőköveinek a kvarkoknak és a gluonoknak szabad, vagy közel szabad gázába megy át. Ez a kvark-gluon plazma nem csak magas hőmérsékleten, hanem magas bariokémiai potenciálon is megjelenik. A hőmérséklet-kémiai potenciál síkban tehát feltételezhetően létezik egy fázishatár, amely a hadronikus és kvark-gluon fázist szeparálja. A magas hőmérsékletű és/vagy kémiai potenciálú fázis vizsgálata a QCD keretein belül, az ebben a határesetben kicsi csatolási állandónak köszönhetően, perturbációs számítással elvileg megvalósítható. A szokásos véges hőmérsékletű perturbációs számítás azonban csak $T \approx 10^5$ GeV érték vagy a fölött használható, amely olyan magas érték, hogy a létező (RHIC) és hamarosan induló kísérletekben (LHC) nem tudják majd elérni, tehát a perturbációs számításból kapott eredmények a közeljövőben valószínűleg kísérletileg nem tesztelhetők. A tisztán hadronikus fázis, amelyben az erős kölcsönhatás másik alapvető tulajdonsága a kvarkbezárás miatt a kvarkok nem túl nagy energiákon két kvarkot tartalmazó mezonokba, vagy három kvarkot tartalmazó barionokba vannak bezárva, és főleg az átmenet a két fázis között, ami szoros kapcsolatban van a királis fázisátalakulással, még ennél is nehezebben tanulmányozható a fundamentális modell keretein belül. Itt érdemes megjegyezni, hogy bár a királis fázisátalakulás és az átmenet a kvark-gluon plazmába két külön jelenség, de számos jel mutat arra, hogy a kvark-gluon plazma kialakulásával párhuzamosan a királis szimmetria is helyreáll. Mivel az átmenet részletei, például a fázisátalakulás rendje, vagy a fázishatár pontos alakja alapvető jelentőségű az erős kölcsönhatás természetének megismerésében, ezért az utóbbi évtizedekben rengeteg közelítő módszert és modellt alkottak a királis fázisátalakulás/fázishatár vizsgálatára. Az egyik legfontosabb kérdés a fázishatárral kapcsolatban, hogy a határ mentén az átalakulás vajon szingularitásmentes, elsőrendű, másodrendű, esetleg ezek kombinációja. Amennyiben az átalakulás szingularitásmentesen folytonos a fázishatár egy szakaszán és elsőrendű egy másik szakaszán, akkor a kettő közötti pontban az átalakulás másodrendű és a pontot kritikus végpontnak (CEP) hívjuk. A fázishatárról a jelenlegi elképzelés az, hogy $\mu_B = 0$ -n szingularitásmentes az átalakulás, azonban abban már nincs teljes egyetértés, hogy μ_B növelésével az átalakulás rendje végig, egészen a $T = 0$ tengelyig, változatlan marad, vagy átmegy elsőrendű átalakulásba. A fenti kérdést átfogalmazva, még tisztázatlan,

hogy a kritikus végpont létezik-e vagy sem. Doktori munkám során a fázishatár és a kritikus végpont meghatározásával foglalkoztam szimmetrikus és aszimmetrikus maganyag estén.

A munka célkitűzése

A királis kvarkmodell keretein belül kívántam megvizsgálni mind izospin szimmetrikus, mind izospin szimmetriát sértő esetben a királis fázisátalakulás tulajdonságait. Az előzetes elképzelések alapján a μ_B - T síkon a két fázist elválasztó határvonal mentén az átalakulás szingularitásmentes kis bariokémiai és elsőrendű nagy bariokémiai potenciálok estén, a kettőt pedig egy másodrendű kritikus pont választja el egymástól. Ez alapján a célkitűzések között szerepelt a CEP helyének meghatározása, valamint a fizikailag releváns értéktartományban az izospin és ritka kémiai potenciálok fázishatárra gyakorolt hatásának feltérképezése.

Alkalmazott módszerek

- A modell paramétereinek izospin szimmetrikus és izospin szimmetriát sértő esetekben való meghatározására egy-hurok szintű, $T = 0$ hőmérsékletű optimalizált perturbációs számítást, míg az m_π - m_K tömegsíkra való elfolytatásához a királis perturbációs számítás eredményeit használtam.
- A modell egyenleteinek felírásához véges hőmérséklet és kémiai potenciálok esetén a véges hőmérsékletű kvantumtérelmélet és a soktestprobléma elemeit használtam fel.
- A felmerülő egy-hurok integrálokat nulla hőmérsékleten dimenziós regularizációval, míg véges hőmérsékleten a reziduum-tétel segítségével, majd a visszamaradó egy változós integrálokat numerikusan számítottam ki.
- A paraméterezés és véges hőmérséklet esetén adódó nem lineáris egyenletrendszereket (állapotegyenletek és sajátenergiát meghatározó önkonzisztens egyenletek) numerikusan kezeltem.

Tézisek

- I. Meghatároztam a királis kvarkmodell paramétereit egy-hurok szinten Herpay Tamás 2006. évi *Erősen kölcsönható anyag vizsgálata effektív modellekben* című doktori értekezéséből kiindulva, és azt kiegészítve konsztituens kvarkokkal úgy izospin szimmetrikus, mint izospin szimmetriát sértő esetben. Ennek a paraméterezési eljárásnak köszönhető, hogy m_π, m_K, T, μ_B , valamint μ_B, μ_Y, μ_I, T paraméterek széles tartományán létezik megoldás. A paraméterezés során a mért fizikai spektrumtól való minimális eltérés feltétele a fázisátalakulás rendjére $\mu_B = 0$ esetén T függvényében szingularitásmentes átalakulást, míg $T = 0$ esetén μ_B függvényében elsőrendű fázisátalakulást adott, amely magával vonja a kritikus végpont létezését a modell keretei között. [1]
- II. A termodinamikai analízist kiterjesztve a nem zérus bariokémiai potenciálok esetére az irodalomban először sikerült meghatározni a m_π - m_K - μ_B térben a kritikus felület alakját, amely monoton módon a fizikai pont irányába hajlik, így a királis kvarkmodell szerint három íz közelítésben a μ_B - T síkon az elsőrendű és szingularitásmentes fázist egymástól elválasztó kritikus pont létezik. [1]
- III. A μ_B - T síkon megvizsgáltam a fázishatár különböző fizikai jellemzőit, amelyekre más modellekből kapott eredményekkel kvalitatív összhangban a következő értékeket kaptam: szimmetrikus maganyag esetén $\mu_B = 0$ mellett a pszeudokritikus hőmérséklet értéke $T_c = 154.84$ MeV, a szuszceptibilitás szélessége $\Delta T_c(x\chi) = 15.5$ MeV, a fázishatár görbülete $C = -0.09$; végül a kritikus végpont koordinátái $(T, \mu_B)_{\text{CEP}} = (74.83, 895.38)$ MeV szimmetrikus maganyag esetén és $(T, \mu_B)_{\text{CEP}} = (63.08, 960.8)$ MeV aszimmetrikus maganyag esetén, amely értékeknek a szimmetrikus esetbeli értékektől való majd 10%-os eltérése a v_3 kondenzátum erős hőmérséklet és kémiai potenciál függésével magyarázható. [1,2]
- IV. A kvarkszuszceptibilitás királis kvarkmodellbeli megfelelőjének kiszámításával meghatároztam a kritikus végpont körüli kritikus tartomány kiterjedtségét, valamint a végpont skálázási tulajdonságait és kritikus exponenseit, amelyek megegyeznek a háromdimenziós Ising-modell kritikus exponenseivel, továbbá megállapítottam, hogy az Ising-modell hőmérséklet tengelye a CEP-beli érintő irányával párhuzamos. [1]

V. Meghatároztam a kritikus végpont nem zérus izospin és ritka kémiai potenciálokból származó eltolódásait, amelyek azt mutatják, hogy $\mu_{B,CEP}$ közel lineárisan függ mindkét kémiai potenciáltól, míg T_{CEP} a ritka kémiai potenciálra szinte érzéketlen, az izospin kémiai potenciáltól pedig erősen függ. Egy egyszerű ideális kvantumgáz modell felállításával, az általánosított Clausius-Clapeyron egyenleteken keresztül, megmagyaráztam az izospin és ritka kémiai potenciálokból származó eltolódások különböző aspektusát. [2]

Következtetések

A $m_\pi - m_K - \mu_B$ térben meghatározott kritikus felület az általános elvárásokkal összhangban a királis fázisátalakulás kritikus végpontjának létezését alátámasztja, továbbá a fázishatár meghatározott fizikai jellemzői kvalitatíven egyeznek a korábbi eredményekkel. A kritikus végpont nem zérus izospin és ritka kémiai potenciálokból származó eltolódásainak jóslatait, mivel ezeket korábban még nem határozták meg, a közeljövőben végrehajtandó kísérletek ellenőrizhetik.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk

Referált folyóiratban megjelent cikkek

- [1] P. Kovács and Zs. Szép, *The critical surface of the $SU(3)_L \times SU(3)_R$ chiral quark model at non-zero baryon density*, Phys. Rev. D **75** (2007) 025015, [hep-ph/0611208].
- [2] P. Kovács and Zs. Szép, *Influence of the isospin and hypercharge chemical potentials on the location of the CEP in the $\mu_B - T$ phase diagram of the $SU(3)_L \times SU(3)_R$ chiral quark model*, Phys. Rev. D **77** (2008) 065016, [arXiv:0710.1563v2].

Konferencia előadások

- RHIC School 06: Zimányi Winter School on Heavy Ion Physics, Budapest, 2006 december 11-13.
- Astroparticle Physics Current Issues, Budapest, 2007 június 21-23.

- Hot Matter and Gauge Field Theories, Rab, 2007 augusztus 30 - szeptember 3.
- Non-Perturbative Functional Methods in Quantum Field Theory, Hévíz, 2008 január 23 - 25.