

Abstract

We develop an approach to the thermodynamics of the QCD phase transition region, including the formation and dissociation of hadronic bound states of quarks and implementing at the same time the features of chiral symmetry breaking and quark confinement. We employ an effective field theoretical model of the Nambu—Jona-Lasinio type, improved by the coupling to the Polyakov loop for the microscopic description of low-energy QCD at finite temperatures and baryon densities. We perform the bosonization of the path-integral representation of the partition function by introducing collective fields in the meson and diquark channels and evaluate the path integral in the Gaussian approximation for the fluctuations in these channels beyond the meanfield approximation. At this level we achieve a description of the Mott dissociation of mesons and diquarks which is encoded in the in-medium phase shifts that enter a relativistic Beth-Uhlenbeck equation of state. As a next step, we couple quarks and diquarks as colored degrees of freedom to the Polyakov loop which leads to the suppression of their appearance in the domain of broken chiral symmetry where the Polyakov loop is close to zero, resembling an effective confinement. We extend the description to the case of 2+1 quark flavors thus providing a unified description of quark-hadron matter with a QCD phase transition from a hadron gas composed of pseudoscalar and scalar mesons to a quark-gluon plasma, resembling chiral symmetry restoration, deconfinement and Mott dissociation of hadrons. A new result within this approach is the appearance of an additional in-medium bound state mode for the positive kaon which may contribute to explaining the “horn” effect for the K^+/π^+ ratio observed in heavy-ion collisions. Comparing the results of our approach with those of lattice QCD thermodynamics three deficiencies are observed: (i) the pseudocritical temperature T_c of the chiral/deconfining transition is too high, (ii) at high temperatures $T \gtrsim 2T_c$ the Stefan-Boltzmann limit for the pressure of noninteracting quarks and gluons embodied in our approach overshoots the lattice QCD results, and (iii) the hadron resonance gas should contain more hadronic states, in particular baryons. In order to resolve these issues, we (i) include the backreaction of correlations on the meanfield within a generalization of the Φ -derivable approach by Baym and Kadanoff to quark-hadron matter, (ii) add perturbative corrections from quark-gluon scattering processes at two-loop order and (iii) develop a generic ansatz for phase shifts applicable to all components of the hadron resonance gas. With this effective Beth-Uhlenbeck approach to the thermodynamics of Mott dissociation of hadrons into a quark-gluon plasma we obtain an excellent description of lattice QCD thermodynamics. We give an outlook to the further developments of the model in order to address the region of high baryon densities in the QCD phase diagram.

Streszczenie

Rozwijamy podejście termodynamiczne do chromodynamiki kwantowej (QCD) w obszarze przejścia fazowego, obejmując powstawanie i rozpad hadronowych stanów związanych kwarków z jednoczesną realizacją cech złamania symetrii chiralnej i uwięzienia kwarków. Wykorzystujemy efektywny teoriopolowy model typu Nambu–Jona-Lasinia ulepszony przez sprzężenie z pętlą Poliakowa dla mikroskopowego opisu niskoenergetycznej QCD w skończonych temperaturach i gęstościach barionowych. Dokonujemy bozonizacji reprezentacji sumy stanów w całości po drogach poprzez wprowadzenie pól kolektywnych w kanałach mezonowych i dikwarkowych i wyliczamy całkę po drogach w przybliżeniu gaussowskim dla fluktuacji w tych kanałach poza przybliżeniem pola średniego. Na tym poziomie uzyskujemy opis dysocjacji Motta mezonów i dikwarków, co jest zawarte w przesunięciach fazowych w ośrodku, jakie wchodzi do relatywistycznego równania stanu Beta-Uhlenbecka. W następnym kroku sprzęgamy kwarki i dikwarki jako kolorowe stopnie swobody z pętlą Poliakowa, co prowadzi do tłumienia ich obecności w obszarze złamanej symetrii chiralnej, gdzie pętla Poliakowa jest bliska zeru, przypominając uwięzienie efektywne. Opis ten rozszerzamy do przypadku 2+1 zapachów kwarków zapewniając w ten sposób jednolity opis materii kwarkowo-hadronowej z przejściem fazowym QCD od gazu hadronowego złożonego z mezonów skalarnych i pseudoskalarnych do plazmy kwarkowo-gluonowej, co jest podobne do odtworzenia symetrii chiralnej, uwolnienia kwarków i dysocjacji Motta hadronów. Nowym wynikiem w tym podejściu jest pojawienie się dodatkowego modu stanu związanego w ośrodku dla kaonu dodatniego, co może przyczynić się do wyjaśnienia efektu „rogu” dla stosunku K^+/π^+ obserwowanego w zderzeniach ciężkich jonów. Przy porównywaniu wyników naszego podejścia z termodynamiką sieciowej QCD można zauważyć trzy różnice: (i) temperatura pseudokrytyczna T_c przejścia chiralne/uwolnione jest za wysoka, (ii) w wysokich temperaturach $T \gtrsim 2T_c$ granica Stefana-Boltzmana dla ciśnienia nieoddziałujących kwarków i gluonów zawartych w naszym podejściu omija wyniki sieciowej QCD oraz (iii) gaz rezonansów hadronowych powinien zawierać więcej stanów hadronowych, w szczególności barionów. Aby rozwiązać te kwestie, (i) zawieramy reakcję wsteczną korelacji na polu średnim w ramach „ Φ -derivable” podejścia Bayma i Kadanoffa do materii kwarkowo-hadronowej, (ii) dodajemy poprawki perturbacyjne z procesów rozpraszania kwark-gluon w rzędzie dwóch pętli oraz (iii) rozwijamy typowe podstawienie dla przesunięć fazowych w zastosowaniu do wszystkich składników gazu rezonansów hadronowych. W tym efektywnym podejściu Beta-Uhlenbecka do termodynamiki dysocjacji Motta hadronów w plazmę kwarkowo-gluonową otrzymujemy doskonały opis termodynamiki sieciowej QCD. Przedstawiamy widoki na dalszy rozwój modelu, aby rozważyć obszar dużych gęstości barionowych na wykresie fazowym QCD.