課題番号:jh220021-NAH

高密度領域まで適用可能なモンテカルロ法の開発と有限密度2カラーQCDの相図の決定

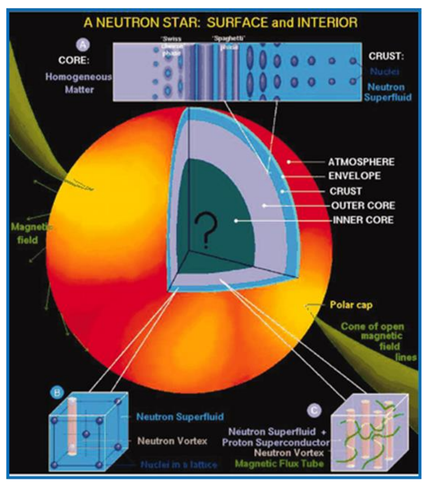
飯田圭（高知大学）

課題参加者：石黒克也（副代表、高知大学）、伊藤悦子（理化学研究所）、村上耕太郎（京都大学）
関連webページ　http://www.cc.kochi-u.ac.jp/~iida/katsuo.html

原子核のダイナミクスを記述する基礎理論であるQCDは、高密度下での性質がよくわかっていない。一方、2カラーQCDは、有限密度系でも符号問題を生じない上、現実のQCDと近い性質をもつ。我々はこの系に着目し、高密度領域で発現が予想されている超流動相を含め、相状態についての第一原理計算からの知見を得る。昨年度はプログラムのチューニングを行いつつ、ハドロン質量、フラックスチューブの測定において、著しく精度を向上させるとともに、状態方程式についての初期成果を得た。今年度は状態方程式の測定を継続しつつ、ハドロン質量の密度依存性の解明を目指すとともに、ハドロン間相互作用のコード開発をさらに進めたい。

研究の動機

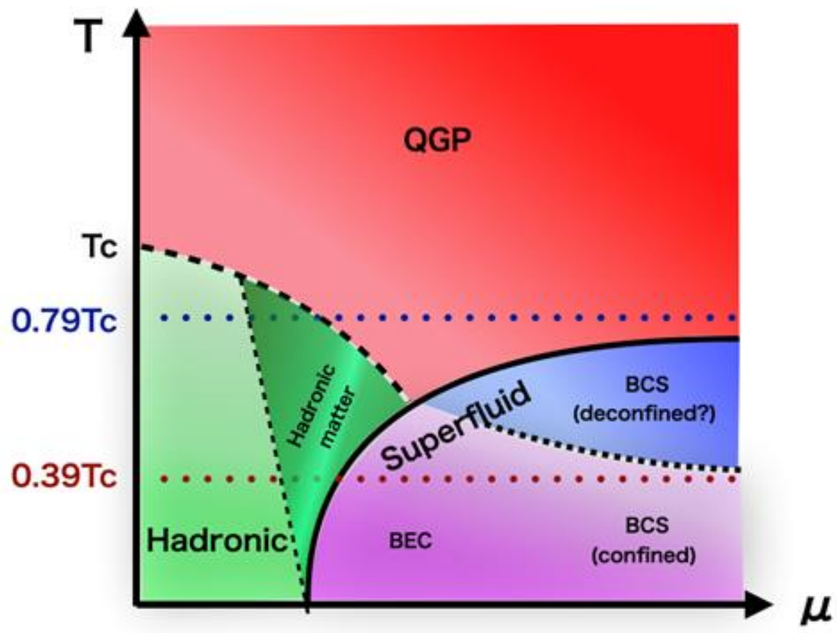
初期宇宙・高エネルギー重イオン衝突・中性子星に見られる極限物質



密度・温度を変えたときの状態変化は？
特に高密度になると超流動が出現する？

問題へのアプローチ

QCD：原子核を構成する中性子や陽子の運動を記述する基礎理論
↓
興味ある密度・温度では構成粒子間の**結合が強い**
↓
第一原理計算は**有限密度系**では**符号問題**により困難
↓
現実のQCDと近い性質をもつ**2カラーQCD**に着目
↓
符号問題を回避できるセットアップ（2フレーバー）のもと、
格子上の第一原理計算による相図および各相の性質の解明



SU(2)QCDの有限温度・密度の相構造予想図
(Iida, Itou & Lee, JHEP 01(2020)181では"Hadronic matter"を発見。イギリス、ロシアのグループの計算とも整合)

シミュレーションの詳細

昨年度まで（EX17704, jh180042, jh190029, jh200031, jh210016）

計算機：

大阪大学　sx-ACE（ベクトル型計算機）
OCTOPUS, SQUID（主にCPU群を利用）

京都大学　XC40（スカラー型計算機）

並列化は、32MPIから1024MPIまでを実行。
コード自体は2048MPIまで動作確認を行った。

主なコード：

・ゲージ配位の生成コード（3種類を構築、(Rational) Hybrid Monte Carlo 法に基づく）

・フラックスチューブ測定コード

・スパースモデリング法のコード

・ハドロン（中間子など）の質量スペクトル測定コード

高速化の工夫（昨年度）：

(i) Rational Hybrid Monte Carloコードのチューニング：
ヒューレット・パッカード社よりチューニングの専門家2名が新たに課題に参加し、京大XC40において2.42倍の高速化を実現！

主な変更点：
・逆行列ソルバー計算時間高速化手法（6種類）により1.622倍に
・通信高速化手法（6種類）により1.265倍に

(ii)クォーク・反クォーク間ポテンシャルの測定：
SQUIDベクトルノードでベクトル化率の向上（8%→98%）を実現！

今年度（継続課題）

目標：

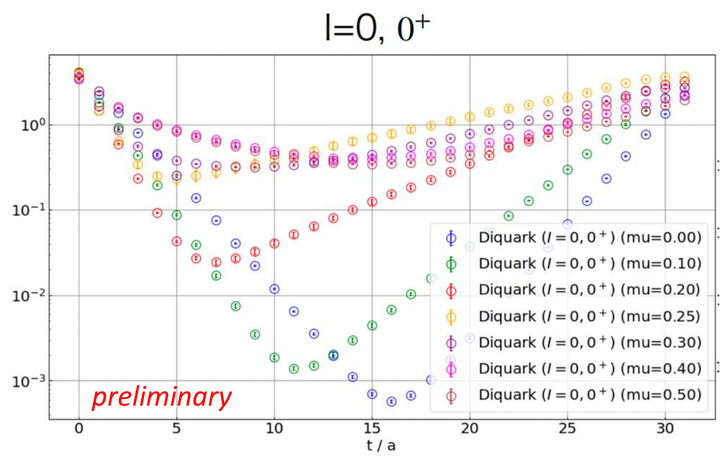
(i) ハドロン質量・ハドロン間相互作用の密度依存性の解明とHAL QCD法の拡張

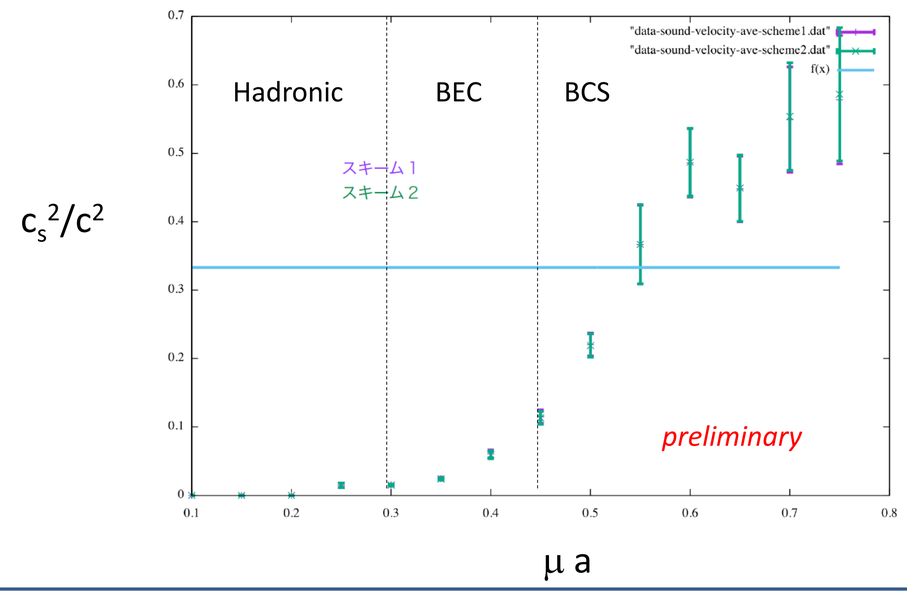
(ii) フラックスチューブの密度依存性の解明

(iii) 有限密度領域での状態方程式の解明

今年度進行中のテーマ

T=0.19Tcにおけるバリオン（スカラーダイクォーク）の2点関数の密度依存性に関する予備的結果（$a\mu$=0, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50）



化学ポテンシャルに依存して傾き（～質量）が大きく変化することがわかる

T=0.39Tcにおける音速の密度依存性に関する予備的結果