

課題名 (タイトル) :

有限密度 QCD の大規模並列シミュレーション

利用者氏名 : ○中村 純

所属 : 延奥放射線研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

有限密度 QCD の研究は、QCD がどのような相構造を持つかという物質の基本的な構造、特に極限状態における振舞いを明らかにするという科学的な意義を持つ。特に近年 Riken-BNL の高エネルギー重イオン衝突実験やそれに引き続く CERN の LHC の実験で、有限温度、有限密度状態が実現し、多くの知見が得られるようになってきた。さらに宇宙の観測の進歩により、中性子星内部の超高密度状態を理解するために QCD に基づく研究の重要性が認識されている。

しかし、有限密度系のモンテカルロ計算は符号問題とよばれる困難があり、長く計算が困難であった。近年、多重再規格化法、カノニカル法、複素化学ポテンシャル法などの研究が進み、さらに符号問題はオーバーラップ問題と合わせて起こることが明らかになりつつあり、その機構の解明が重要である。

2. 具体的な利用内容、計算方法

これまでの課題研究の中で開発してきた格子 QCD のクォーク行列式の縮約公式は、カノニカル分布を直接計算する手法も与えていることを見いだした。カノニカル分布は、多重度分布と密接に結びついており、実験との直接的な比較が可能である。本年度は、この縮約公式からカノニカル分配関数を得るための定式化、さらにそれからリー・ヤン・ゼロ分布を求めるための高精度計算のコードを開発した。これらの定式化を使って比較的小さな格子、重いクォークの場合に試験計算を行った。並列化には MPI を使用した。

3. 結果

格子 QCD 計算により、相転移以上の温度では比較的容易にカノニカル分配関数が求まった。これからリー・ヤン・ゼロ分布を求め、高温で Roberge-Weise 相転移が起こることを (おそらく

世界で始めて) 確認した。

しかし、低温では急速にシグナルが悪くなり高密度まで計算することは難しい。これは、オーバーラップ問題が原因と考えられる。

4. まとめ

これまでの格子 QCD による有限密度計算は、大部分が大分配関数に基づいて行われてきた。本研究では実験の多重度と直接に結びつくカノニカル分配関数に基づく計算に成功した。このカノニカル分配関数を縮約公式を用いて計算することにより、符号問題は直接には現れない。しかし、オーバーラップ問題が生じて低温・高密度の計算は現時点では困難である。

5. 今後の計画・展望

オーバーラップ問題が信頼できる計算を妨げていることが明らかになってきた。これに対し、「ピン留め法」と言われる手法を用いることにより、大きなオーバーラップを実現するための計算コードを開発している。

6. 利用がなかった場合の理由

上記のように有限密度 QCD のモンテカルロ計算が難しいのは、これまでに考えられてきた符号問題に加えてオーバーラップ問題が起きており、両者が絡み合っていることが原因であることが分かってきた。具体的には、これまでのモンテカルロ法で生成された配位の中には大きなバリオン多重度状態がほとんど含まれていないこと問題である。この点の改善のために、ピン留め法と呼ばれる手法を導入するが、そのためにはモンテカルロで配位を生成する部分のアルゴリズムの変更が必要となり、そのアルゴリズムとコード開発を行っていたために、計算資源の利用を行わなかった。