

大型シミュレーション研究成果実施報告書

1 研究組織

研究責任者

- 菊川 芳夫 (きくかわ よしお)
名古屋大学 理学研究科 助教授

研究従事者

- 滑川 裕介 (なめかわ ゆうすけ)
名古屋大学 素粒子論研究室 COE 研究員

2 研究と成果の総説

平成16年度後期より平成17年度までの1年強の期間、大型シミュレーション研究に採択され、高エネルギー加速器研究機構のスーパーコンピュータシステムを利用した。研究対象は、以下の2つである。

2.1 非等方格子を用いた $N_f = 2$ 有限温度 QCD の研究

現在知られている物質の基本構成要素は、クォークである。クォークは通常ハドロン内部に閉じ込められており、単独で現れることは無い。しかし、非常に高温・高密度下ではクォークは開放され、クォーク及びクォーク間の力を媒介するグルーオンのプラズマ状態になると考えられている。このクォーク・グルーオン・プラズマは新しい物質形態であり、その性質を解き明かすべく理論的・実験的研究がなされている。近年、クォーク・グルーオン・プラズマに関する実験が活発に行われ、大きな成果が上がりつつある。特に、ブルックヘブン研究所のRHIC加速器における高エネルギー重イオン衝突実験にて、ジェット抑制やフローなどクォーク・グルーオン・プラズマの生成を示唆するデータが得られてきている。

一方、クォーク・グルーオン・プラズマの理論的解析は難しい。これは、クォーク・グルーオン・プラズマが相転移点近傍で大きな非摂動的効果を受けるためである。格子量子色力学(QCD)に基づく数値シミュレーションが、クォーク・グルーオン・プラズマの性質を探れる唯一の

系統的理論計算法である。ただし、有限温度格子QCDにも問題がある。シミュレーション法の特長上、温度方向の格子サイズを大きくすることができない。このため、従来用いられている等方格子では、クォーク・グルーオン・プラズマ中のハドロンスペクトルといった基本的情報すら得ることが難しい。そこで、我々は温度方向により細かい格子を持つ非等方格子を使って、クォーク・グルーオン・プラズマの性質を探る方法を採用した。

我々は、まず有限温度非等方格子QCD計算の基礎となる相構造を調べた。クォーク質量が大きい領域で相転移点を計算し、それらのデータを用いてクォーク質量がゼロのカイラル極限への外挿を行った。この結果、臨界温度は約160 MeVと求められた。この値は、等方格子を用いて得られた値に近く、臨界温度がシミュレーションに用いる格子の種類に大きくは依存しない事が分かる。

次に、有限温度でのハドロン波動関数の研究を行った。ハドロンがクォーク・グルーオン・プラズマ中でも束縛状態を維持するか否かは、実験結果の解析に重要な指針となる。ハドロンの波動関数を調べる事により、この束縛状態の有無を判定できる。我々は、パイ中間子及びロー中間子の波動関数を計算し、相転移点近傍でも波動関数は、ゼロ温度の場合同様、空間的に局在化している事を確認した。これは、相転移温度付近ですら、依然としてハドロンは束縛状態として振舞う事を意味する。

2.2 電磁相互作用を含めた格子計算による軽いハドロンの研究

近年、計算機の能力向上に伴い、格子QCD計算の精度も飛躍的に改善されてきている。このため、これまでシミュレーションで無視されてきた電磁相互作用の効果が、無視できない系統誤差を与えるようになりつつある。今後、より現実に近い格子計算を目指すためには、QCDのみならず電磁相互作用もシミュレーションに含める必要がある。

そこで、クォークの生成消滅を無視した近似の下で、実際にQCDに電磁相互作用を含めた格子シミュレーションを行った。まず、我々は、シミュレーションにより、軽い中間子の電磁質量差が正しく再現されることを示した。また、得られた軽いハドロンのスペクトルから、電磁相互作用効果入りのクォーク質量を決定した。これにより、アップ及びダウンクォークの質量は、それぞれ3 MeV及び5MeVと求まった。一方、ス

トレンジクォーク質量は104 MeVであり、電磁相互作用は1%程度と小さい影響しか与えない事が判明した。

3 平成17年度の実施報告の詳細

3.1 非等方格子を用いた $N_f = 2$ 有限温度 QCD の研究

本年度は、まず有限温度QCD相構造をより詳細に調べた。クォーク質量が大きい領域で相転移点を3点計算し、それらのデータを用いてクォーク質量が0のカイラル極限への外挿を行った。この結果、相転移温度は約160 MeVと求められた。この値は、等方格子を用いて得られた値に近く、臨界温度がシミュレーションに用いる格子の種類に大きくは依存しない事が分かる。

次に、有限温度でのハドロン波動関数の研究を行った。パイ中間子及びロー中間子の波動関数を計算した結果、相転移点近傍でも波動関数には、ゼロ温度の場合同様、空間的な局在が見られた。これは、相転移温度付近ですら、ハドロンは束縛状態として振舞う事を意味する。

3.2 電磁相互作用を含めた格子計算による軽いハドロンの研究

本年度は、クォークの質量を精密に計算し、その連続極限值を求めた。まず、有限の格子間隔で、クォークの生成消滅を無視した近似を用いて、QCDに電磁相互作用を含めた軽いハドロンのスペクトルを計算した。次に、得られた軽いハドロンのスペクトルから、電磁相互作用効果入りのクォーク質量を決定した。同様の計算を、異なる3点の格子間隔で行い、その結果を用いて格子間隔がゼロの連続極限への外挿を実行した。これにより、アップ及びダウクォークの質量は、それぞれ3 MeV及び5MeVと求まった。一方、ストレンジクォーク質量は104 MeVであり、電磁相互作用は1%程度と小さい影響しか与えない事を示した。

4 研究発表リスト

□頭研究発表 (国際会議)

- Y. Namekawa, Y. Kikukawa
“ $\pi^+ - \pi^0$ Mass Difference on the Lattice”,
International Workshop on Dynamical Symmetry Breaking
(Nagoya University, Japan, Dec. 21-22th, 2004)
- Y. Namekawa, Y. Kikukawa
“Electromagnetic mass difference on the lattice”,
23rd International Symposium on Lattice Field Field: Lattice 2005
(Trinity College, Dublin, Ireland, 25-30 Jul 2005)

□頭研究発表 (国内)

- Y. Namekawa, Y. Kikukawa
“ $\pi^+ - \pi^0$ mass difference on the lattice”,
日本物理学会年会 (東京理科大学, 野田, Mar. 24-27th, 2005)

国際会議等のプロシーディング論文

- Y. Namekawa, Y. Kikukawa
“Electromagnetic mass difference on the lattice”,
PoS LAT2005:090,2005 (hep-lat/0509120)