

プロジェクト名(タイトル):

カイラルフェルミオンで探る QCD 相図

利用者氏名:○青木保道(1)、金森逸作(1)、中村宜文(1)

理研における所属研究室名:

(1) 計算科学研究センター 連続系場の理論研究チーム

1. 本プロジェクトの研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

QCD の有限温度相転移の研究は長い歴史をもち、今なお多くの研究が続けられているが、その全容はまだ明らかになっていない。

QCD (量子色力学) は素粒子標準模型のパーツの一つであり、目に見える宇宙を構成する物質の 99% の質量をその動力学で生み出す。その質量の殆どを担う陽子や中性子を構成するクォークはその電荷(カラー)の閉じ込めという QCD の著しい性質により単独では発見されない。この閉じ込めの性質は、しかし、充分高温では失われることが予想され、実際、米国 RHIC での重イオン衝突実験やヨーロッパの LHC 実験では、充分高温でクォークとクォーク間に働く力を媒介するグルーオンが閉じ込めから解き放たれ、プラズマと解釈される状態に到達したことが観測されている。

宇宙の歴史を紐解き、その開闢から今日に遡る過程で、これら実験室で実現されるプラズマ状態から、宇宙が冷えて陽子や中性子(ハドロン)が作られる(従って 99% の質量を生み出す)際、閉じ込めの発動によって、宇宙の熱力学に大きな変化が生じる。この変化が真の相転移であるか、発散のないクロスオーバーなのかの答えは、物質生成の謎の解明に大きな影響を与え、また、実際に相転移が存在したならば、その残骸の重力波による検出も期待される。

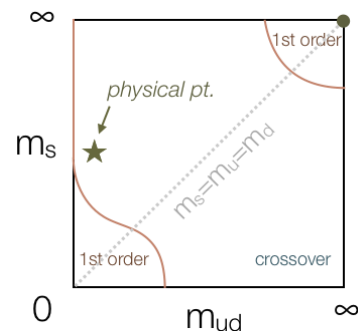
QCD の有限温度での振る舞いの定量的解析には、格子ゲージ理論に基づく数値的手法が強力である。これまでの格子ゲージ理論に基づく計算結果から、このプラズマ相とハドロン相に遷移する温度では相転移はなく、クロスオーバー的な遷移であるとされるが、その理論的背景の全容が理解されているわけではない。実際実験でも相転移の兆候は発見されていないが、充分弱い相転移の場合には発見は難しいことに注意が必要である。

QCD は標準模型のパラメタであるクォーク質量を決

定すると完全に決まる理論で、現実世界を記述するパラメタセットは唯一無二であり、これを**物理点**と呼ぶ。理論的興味からパラメタを物理点からずらす(実験ではできない操作)と、まず、相転移が必ずどこかにある事が分かる。これは**カイラル対称性**(クォークのスピンの右巻と左巻きのそれぞれの状態で独立にフレーバー(u(p), d(down), s(trange)等の種類)を交換する対称性)が自発的に破れた低温相とそれが回復する高温相は、クォーク質量がゼロの極限で解析的に接続できないからである。少なくともゼロ質量点は相転移が必須で、さらにその周辺でも相転移が起こりうる。現実世界(物理点)に相転移が無いならば、それは、たまたま、物理点のクォーク質量がそのような領域にあったということである。当然、物理点の質量の近傍の理解をすることは、現実世界のより深い理解にもつながる。ここまでは、クォークの密度がゼロの場合の議論であったが、有限密度(RHIC など様々な実験で探索されている)の相転移を探るためにゼロ密度の相境界を伸ばして探る方法が有力である。この物理的理解は、究極的には、中性子星など密度が更に高い状態の理解に繋がっていく。このような興味深い有限密度方向の探索を始めるために、ゼロ密度の相境界を求めることが先決である。

[研究目的詳細]

QCD の有限温度相転移を理解するためにもっとも基本的な図示の方法が所謂**コロンビアプロット**(右図)である。QCD の相互作用を行う全部で 6 種類(フレーバー)のクォークのうち、重い方 3 つは相転移に対して摂動的な小さい影響しかない。従って、シミュレーションでは軽い方 3 つ(u, d, s クォーク)のみを扱えば充分である。さらに、アイソスピン(u と d の交換)が極



めて良い対称性であるため、質量 $m_u = m_d = m_{ud}$ と表記し、一つのパラメータと見なす。もう一つのパラメータは s クォークの質量 m_s である。コロンビア大学の共同研究 (Brown et al, 1990) は格子 QCD 数値計算により、 m_{ud} と m_s の値を横軸と縦軸に取り、相転移の領域と相境界を表す線を初めて図示した。このときから、より精密な計算が行われるに至った現在まで、一般的に認知されている「コロンビアプロット」はここに図示されているものであるが、連続極限の予言が得られているのは右上の頂点 ($m_{ud} = m_s = \infty$) と★(物理点)のみで、その他の全ての情報は、想像図に近く、実際、**相境界の位置や形は未定**である。また、物理点の情報も、連続極限はとっているものの、それに疑義があり得るスタaggered フェルミオンによる計算である事が不満足な点である。

本研究では QCD 相図: コロンビアプロットのうち左下四半の決定を行う。これにより QCD 相図の重要なピースが埋まり、物理点直上での相転移の有無について揺るぎない基礎を与えると共に、決定した相境界線から有限密度方向への伸展(相境界面)を行う応用研究の基盤構築を図る。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究ではコロンビアプロットの左下四半の解明をめざし、対角線上のスキャンにより相境界を求めることを目標とする。格子 QCD に基づく大規模数値計算により、いくつかの格子間隔で結果を導き、それをゼロ間隔に外挿することにより連続極限の結果を導出することが最終目標である。格子 QCD シミュレーションでは、カイラルフェルミオンの実用的な定式化である、Domain Wall Fermion (DWF) — Möbius 定式化と stout smearing をゲージ場に施したものをフェルミオンに作用させる改良をおこなったもの—を用いる。全く同じ定式化は JLQCD 共同研究の2フレーバー相転移の解析や、ゼロ温度の 2+1 フレーバーシミュレーションで実績がある。シミュレーションには、Intel Xeon Phi や Skylake で高い演算効率がでるよう開発されたオープンソースソフトウェア「Grid」に、本課題用にパラメータチューニングを施したものをを用いる。昨年度までに、広域的パラメータスキャンを経て、クォーク質量が大きく、温度が高い領域での相転移/クロスオーバーの存在を確認した。これは、さらにクォーク質量、温度を下げてこの転移の行方を追う系統的な研

究の第一歩となる重要な情報である。一方で広域探索で判明したもう一つの情報として、この格子定式化の格子間隔の有効下限が分かっている。格子間隔を一定以上にした上で温度を下げるには、 $T=1/(a N_t)$ により時間方向の格子点数 N_t を増やし、それに伴い空間方向(N_s)も増加が必要である。このため計算コストが格段に増加する。

3. 結果

本年度は Hokusai の利用がなかったため具体的な結果の報告はない。プロジェクトの状況は以下に示す。

4. まとめ

その他の計算資源で得られた結果として $N_t=12$ (温度にして $T=131\text{MeV}$)、 $N_s=24$ におけるクロスオーバー/相転移が、クォーク質量 $m=10\text{ MeV}$ (物理的 ud 平均クォーク質量の 3 倍程度) 付近に認められた。クロスオーバーかそれとも物理量の発散を伴う相転移かの判断のために、より大きな体積の計算($N_s=36$)が進行中である。

5. 今後の計画・展望

2019 年度から Hokusai BW 他の計算資源を用いて開始した当プロジェクトでは、カイラル領域の相転移の研究のために最適なカイラルフェルミオンを用いてコロンビアプロットの左下四半の対角線上のクロスオーバー/相転移の探索を行っている。Hokusai BW の利用は、この探索を系統的に行うためのパラメータ情報の蓄積に貢献した。この系統的探索の現在、及び次のステップでは「富岳」クラスの計算資源が必須となってきた。現在コロンビアプロットのこの領域の研究は理論、及び数値計算で新しい知見が出てきており、世界的にアクティビティが高い領域となっているが、相構造の完全な理解には至っていない。カイラルフェルミオンを用いる当プロジェクトの手法が相構造の解明に貢献していくことが期待される。

6. 利用がなかった場合の理由

本年度は「富岳」に大きなアロケーションを獲得したため、そちらの利用を優先した。

2021 年度 利用報告書

今年度中の利用は無かったが、前年度までの利用により得られた知見が以下の成果に繋がっているために報告する。

2021 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

【会議の予稿集】

【口頭発表】

- “Finite Temperature Fine Lattice Simulation with DWQs”, Y. Aoki, Dec. 16, BNL-HET & RBRC Joint Workshop “DWQ@25” (online).

【ポスター発表】

- “Finite temperature phase transition for three flavor QCD with Möbius-domain wall fermions”, Y. Nakamura, Jul. 28, The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021), ZOOM/GATHER@MIT
- “Finite temperature phase transition for three flavor QCD with Möbius-domain wall fermions”, Y. Nakamura, Oct. 27, YITP workshop QCD phase diagram and lattice QCD [YITP-W-21-09] (online).
- 「カイラルフェルミオンで探る QCD 相図」 青木保道、10 月 29 日、第8回 HPCI システム利用研究課題成果報告会(オンライン).

【その他(著書、プレスリリースなど)】