

課題名 (タイトル) :

格子 QCD による局所的 CP 対称性の破れの研究

利用者氏名 : ○石川 智己, Thomas Blum

所属 : 和光研究所 仁科加速器研究センター 素粒子物性研究部門 理研 BNL 研究センター
計算物理研究グループ

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

強い相互作用を記述する量子色力学(QCD)は単純なラグランジアンで記述されるが、そこから導き出される物理現象は非常に複雑である。例えば膨大な種類の多様なハドロン、有限温度・密度系での興味深い相構造等その理解はハドロン物理学の大きな課題の一つである。この多様性の源の一つとしてゲージ理論の持つ位相的性質がある。ゲージ配位は巻き付き数と呼ばれる位相数で分類されるがインスタントンと呼ばれる非自明な配位はそのセクター間の遷移を可能にする。通常のパノプな QCD は離散的対称性である空間反転(P)、電荷空間反転(CP)に対して対称であるが、巻き付き数の存在を考慮すると θ パラメータに比例した P と CP を破る項が QCD ラグランジアンに自然に導入される。ところが例えば中性子電気双極子モーメントの測定実験により CP の破れはほぼ無いことがわかっており、 $\theta < 3 \times 10^{-10}$ という非常に厳しい制限が得られている。何故この θ がそのように小さいのかという問いは強い CP 問題と呼ばれる。実験事実としては θ は微小であるが、ここで注意すべきことは強い CP 問題は大域的離散対称性の破れに対する制限だということである。 θ は大域的にはゼロであるが、局所的なゲージ配位の位相的揺らぎで局所的な θ が誘起され得る。この局所的な θ の空間変化は軸性量子異常を通して磁場と結合し磁場の方向に電荷の分離が起る。この分離は局所的な P、CP の破れを表す(カイラル磁気効果)。非常に強力な磁場中ではこの現象が観測される可能性があることが D.Khazeev らによって指摘されている。

さて、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)では相対論的重イオン加速器(RHIC)を用いた原子核衝突実験によって QCD の相構造の解明が試み

られている。この実験においては衝突する2つの原子核の相対位置によって非常に強力な磁場が発生する場合がある。2009年、RHICで実験を行っている STAR Collaboration は衝突により生成される多量のハドロンにおける電荷分極を発表し注目を浴びた。同 collaboration はこれをもってカイラル磁気効果の確認としたが、これが本当に同効果から生じたものなのかどうかは議論の余地がある。

格子 QCD は時空を格子状に離散化しその上で QCD 理論を構築したものであり、数値シミュレーションによる QCD の第一原理計算が可能である。カイラル磁気効果は存在が本当であれば外部磁場を掛けることにより格子 QCD 上で再現可能である。効果を起す温度や磁場の強さの関係を定量的に調べることは先に述べた RHIC での実験結果を検証する上でも極めて重要である。

2. 具体的な利用内容、計算方法

ここでは本研究において採用する手法について述べる。

(1)ドメインウォール・フェルミオン形式の採用

格子フェルミオンとしてドメインウォール・フェルミオン形式を採用する。ドメインウォール・フェルミオンは現実世界の4次元に加えて5次元方向を持っていて、その5次元方向の大きさでカイラル対称性の破れを制御する。無限大の極限でカイラル・フェルミオンを実現する。

(2)動的クォーク効果の導入

現在の格子 QCD シミュレーションの主流はクォークの真空偏極効果(動的効果)を取り入れたものである。また真空偏極効果は電荷の遮蔽効果を取り入れる上で重要である。これを行うにはまず、ハイブリッド・モンテカルロ・アルゴリズムを用いて動的効果を考慮に入れたゲージ配位を生成する必要があるが、これはシミュレーションの中で

も非常に計算コストのかかる部分でもある。本研究では米国の有限温度格子 QCD 共同グループである HOT QCD Collaboration が生成した有限温度系のゲージ配位を使用している。このゲージ配位はドメインウォール・フェルミオン形式を用いているが、さらにカイラル対称性を改善する工夫がなされている。

(3)保存ベクトル・カレント演算子の使用

非保存カレントは繰り込みを受けるので計算結果を実際の物理量に対応させるには別に繰り込み係数を計算する必要がある。我々の用いるドメインウォール・フェルミオンでは保存ベクトル・カレントを定義することができる。この演算子をカイラル磁気効果による電荷分離計測に用いることで不定性のない結果が得られる。

(4)固有値展開

格子 QCD シミュレーションにおける計算の大半は基本的にはディラック作用素逆行列の計算である。この行列は典型的な格子の場合を想定すると、オーダー 10^7 程度の巨大行列で真面に取り扱うことはできない。通常は特定の格子点間の逆行列要素を求めるのみである。ところがカイラル磁気効果で必要とされる計算は全ての格子点で行う必要があり、格子サイズがよほど小さい場合以外は不可能である。そこでディラック作用素の固有値展開法を使い、最低固有値からの足し上げで計算を行う。この方法では如何に固有値問題を速く解くかが鍵となる。固有値問題を解くアルゴリズムとしてはランチョス法を採用している。

3. 結果

外磁場による電荷の分離ではカイラル対称性の存在が重要である。格子フェルミオンとしてドメインウォール・フェルミオン形式を用いている理由はそこにある。このフェルミオン形式では 5 次元目のサイズ L_s でカイラル対称性を制御する。 L_s を無限大に取れば厳密なカイラル対称性が実現されるが現実には L_s を有限に取らなければならない。よって電荷分離の L_s 依存性を調べる必要がある。図 1 は 2 つのシミュレーションパラメタについての電荷分離の L_s 依存性を調べたものである。横軸は固有モード番号で右に行くほど高

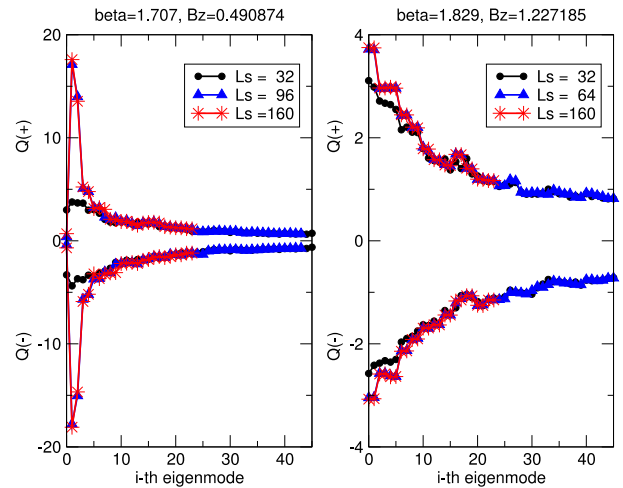


図 1 電荷分離の L_s 依存性

いモードになる。縦軸は正の電荷密度(上半分)、負の電荷密度(下半分)を全空間に渡って足し上げたものである。 $\beta=1.707$ は相転移温度より下側、 $\beta=1.829$ は相転移温度より上側のデータに対応する。 $\beta=1.707$ では L_s 依存性が大きく、 $\beta=1.829$ では依存性が小さい。これは高温ではカイラル対称性が非常に良いことを意味する。 $L_s=96$ 以上ではほぼ L_s 依存性が見られないので本研究では $L_s=96$ に設定した。

図 2 に計算で得られた電磁カレントの揺らぎを示す。本研究ではディラック作用素の固有値展開法を用いて低モードからの足し上げで物理量を計算する。用いたゲージ配位は 20 個、また外磁場によって誘起される揺らぎから不必要な UV 揺らぎを除去するために、零外磁場のデータを差し引いている。横軸は足し上げの切断(どこまでのモードを足し上げたのか)を表している。この計算では z 方向に外磁場をかけている。左側は比較的低温での結果であるが全方向のカレントに対してモード切断依存性が残っている。よって明らかに低温ではさらに高いモードの足し上げまで必要である。また得られたデータは 2 つの組に分かれているが、これは外磁場に対する垂直方向(x, y)と平行方向(z, t)と理解できる。右側は相転移温度付近のデータであるが、 z 方向のカレント揺らぎ以外はモード切断依存性がなくなるまでモードの足し上げができていたが z 方向については更に上のモードが必要である。また左側では見られなかった z と t 方向のデータの分離が見て取れる。これは高温では格子ボックスの空

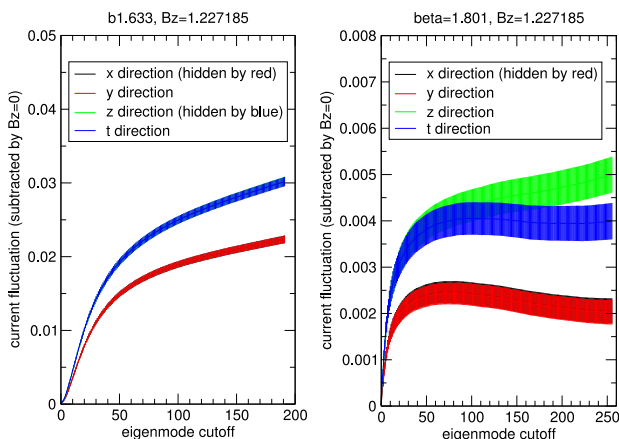


図 2 カレント揺らぎの固有モード切断依存性

間方向と時間(温度)方向のサイズの非等方性が大きくなるためであると理解される。

今回の計算で明らかになったのはモード展開による低固有モードからの足し上げが思いのほか大変だということである。本課題に似た計算としては 2009 年の P. V. Buividovich らによるものがある。彼らは格子フェルミオン形式としてドメインウォール・フェルミオンと同様にカイラル対称性を有したオーバーラップ・フェルミオンを使い本研究と同様に固有モード展開を行っている。不必要な UV 揺らぎの除去として零温度・零外磁場のデータを差し引いている。さらに固有モードの足し上げは 50 未満である。これは我々の計算の状況と大きな差があり、彼らの計算の正当性を含めて今後議論していく必要がある。

4. まとめ

本研究は局所的 CP 対称性の破れに起因する外磁場による電荷分離の格子 QCD シミュレーションを使った定量的解析を試みるものである。CP 対称性の破れにはインスタントンが深く関与し、カイラル対称性が重要になる。実際に我々はドメインウォール・フェルミオンのパラメタ L_s の依存性からカイラル対称性が重要であることを見た。本研究で観測している電荷揺らぎ等は如何に UV 発散を除去するのがキーポイントになる。Buividovich(2009)らは零温度・零外磁場の揺らぎを引き去ることによって UV 発散を除去しているが、今回の我々の結果によるとそのような UV 発散除去を行っても固有モードの切断依存性

は大きく残ることが明らかになった。

5. 今後の計画・展望

計画の当初では固有値解法としてリッツ法を用いていたが、固有モード切断依存性が予想していたよりも高い固有モードまで残ることが判明したため、より効果的な固有値解法であるランチョス法に変更し計算コードに組み込んだ。これにより 500 を越える固有値・固有ベクトルの計算も可能になった。このランチョス法を用い、今後は更に高い固有モードまで取り込んで計算を行う。また別の方向性として低固有モードからの足し上げから漏れた高固有モードの寄与を乱数ベクトルを用いた確率的手法で評価することも検討している。