

課題名 (タイトル) :

有限温度・密度下におけるクォーク力学の研究

利用者氏名 : ○飯田 英明, 前沢 祐, 矢崎 紘一

所属 : 和光研究所 仁科加速器研究センター 橋本数理物理学研究室

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

[クォーク・グルーオン・プラズマの解明]

宇宙初期に実現していた高温状態 (約 2 兆度) または高密度状態 (1000兆 g/cm^3 程度)

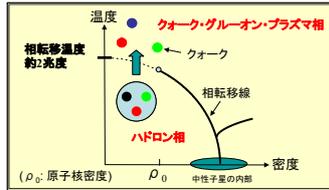


図 1: QCD の相図

では、現在の物質相と

は全く異なる相が実現されていたと考えられている。低温・低密度では核子などハドロンの中に閉じ込められているクォークやグルーオンが、このような高温・高密度で開放されるのである。この状態はクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) と呼ばれる (図 1 参照)。QGP は理論、実験の両面から研究が盛んに行われ、様々な興味深い現象が確認されている。しかし、その現象の物理的背景は未解明な部分が多い。

-目的および関係するプロジェクト-

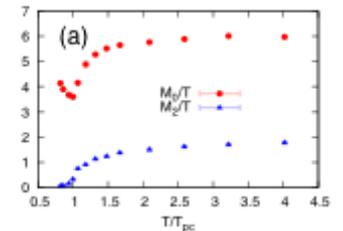
[有限温度・密度でのハドロンと質量の起源]

QGP の性質を解き明かすには、強い相互作用を司る力学である量子色力学 (QCD) を扱う必要がある。QCD はクォークとグルーオンと呼ばれる粒子の運動を記述する。しかしながら、QCD は複雑であり、解析的な計算による研究を行うことは難しい。これに対し、QCD の第一原理に基づき数値的に計算を行う方法が、格子 QCD である。格子 QCD は膨大な計算を必要とするが、近年のコンピュータ・パワーの増大により、様々な研究が行われるようになってきている。我々は格子 QCD を用いて、QGP の性質を解き明かす。そのために、有限温度・密度におけるハドロンの性質を研究する。ハドロンはクォーク・グルーオンからなる粒子であり、その有限温度・密度における性質を解明することで、QGP の性質に迫る。特にハ

ドロンの質量の変化は、質量の起源と関係し、重要である。実験において、ハドロンの質量が有限密度中で変化するという報告が、仁科センターの延興グループなどにおいてなされている (図 2 参照)。有限温度・密度中のハドロンの質量変化は、2008 年ノーベル賞の対象である「対称性の自発的破れ」を反映していると考えられ、非常に重大な問題である。この現象の理論的解明はまだ不十分であり、さらなる研究が必要である

2. 具体的な利用内容、計算方法

まず、昨年度の研究である「有限密度中の中間子の遮蔽質量の研究」の進展状況であるが、計算は昨年度中にほぼ終



えて、現在論文作成中である (上図青の点が有限密度中の遮蔽質量に関連した量であり、去年の主な研究成果。去年の報告書に載っている)。本来昨年度中に論文が出る予定であったが、データの解釈に諸処の問題が生じた事、共同研究のメンバーのうち 2 人が他の研究機関に移ったことなどから滞ってしまった。鋭意論文作成中である。

今回新たに進展した研究としては

(a) より現実的な状況下における、高温でのクォーク間の自由エネルギーおよび遮蔽質量

(b) 高温における有限質量クォーク間ポテンシャル

である。

(a) は、静的な (=止まっている) クォーク間に働く力を、熱浴中のクォークが現実に近い質量を持つ状態で計算したものである。その際、系の

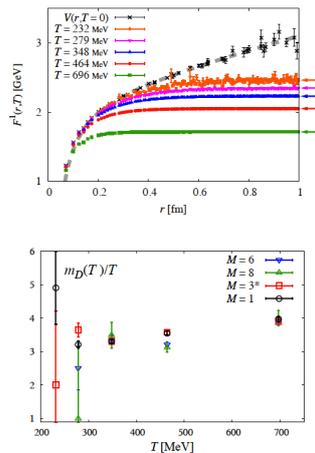
スケールを変えずに（スケール固定の方法）温度を変化させていることは新しい。従来、温度を変化させる際には、系のスケールを変化させることでそれを実現していた。しかしこれは当然温度以外の量も変化させてしまう。そのような場合、例えば場の理論で現れるくりこみ定数も、温度ごとに変わってしまうという困ったことが起こる。今回の方法では、そのようなことは起こらず、より綺麗な計算となっている。

(b)は、有限質量のクォーク（＝動いているクォーク、熱浴中のクォークとは異なることに注意されたい）間に働く力を、高温で計算するものである。通常クォーク間力の計算は、格子 QCD では止まっているクォークに対して行う。この研究では、クォーク・反クォークの（中間子中の）波動関数の情報からクォーク間力を計算している。高温でのこのような計算は、初めての試みである。

3. 結果

(a)に関して：

右図上は、クォーク間のポテンシャルを、距離の関数として書いたものである。色は温度に対応する。低温では、クォーク間力は遠方で線形に上がっている（黒のデータ）。



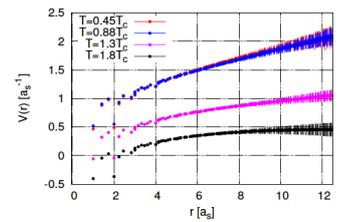
一方、高温になると、線形の振る舞いが消え、遠方でフラットになる。高温では更に、遠方の振る舞いだけでなく、中距離での振る舞いも変わる。その振る舞いの違いを表すのが右図下である。横軸が温度、縦軸が「デバイ遮蔽質量」と呼ばれるものである（色はクォークと反クォークが持つ「色」の自由度の種類を表す）。これが大きいほど、クォーク間の力の到達距離が短くなる。温度が低いところではエラーが大きく、この値に有為な意味がなく、力の到達距離が長いことが分かるが、温度が高くなると、その値がエラーバーも小さく有為に定まり、力の到達距離が短くなっていることが分かる。

このような結果は、CERN における LHC の ALICE

実験などで行われている、重イオン衝突による QGP 生成実験での実験結果に大きく関わるものである。例えば、クォーク・反クォーク束縛状態である中間子が重イオン衝突でどのような状態になっているかは、この分野の重要な問題である。この研究で得られたクォーク間力をシュレーディンガー方程式に入れ、クォーク・反クォーク間の波動関数を求めれば、高温での中間子の状態がわかる。この研究では、熱浴媒質中のクォーク質量が現実的なものであること、スケール固定の方法によって計算されていることなどから、従来の先行研究に比べ、飛躍的に現実的な状況に近い計算となっている。よって、この研究は非常に重要なものである。

(b)に関して：

右図は、有限質量クォーク間ポテンシャルを、距離の関数として書いたものである。



色は温度に対応し、上から下（青→黒）になるに従い、温度が高いデータである。基本的には左カラムの図上と同様であるが、左図は無限に重いクォークの間のポテンシャルであり（このクォークは、熱浴に存在するクォークとは違う事に注意されたい。熱浴のクォークは、左図では有限な質量を持っている）、上図は有限質量クォーク間のポテンシャルであることに注意されたい（チャームクォークと呼ばれる粒子の質量くらいでの計算）。低温でのクォーク間力の遠方で線形な振る舞い、高温で線形の振る舞いが消えるなどの特徴は、この計算の場合でも同様に見られる。重要なのは、かつて有限質量のクォーク間力を求めること自体がなされてなく、世界初の試みであることである。詳細は省くが、計算方法は左カラム上図とは全く異なるものであり、それでも同じようなポテンシャルが求まること自体驚きである。この計算も、より現実的な状況でのクォーク間力の計算という意味では、非常に重要である。

4. まとめ

平成 23 年度 RICC 利用報告書

昨年度の研究に関しては、現在論文執筆中である。今回の新たな計算である (a) (b) の研究は、「有限温度中でのクォーク間ポテンシャルを、より現実的な状況の下に計算する」というものである。上記したように、このような研究は、LHC での実験のような巨大プロジェクトに大きく関わるものであり、重要であると考えます。

5. 今後の計画・展望

昨年度の研究に関しては、論文の作成を第一に考え継続していく。(a)に関しては、計算のどの点を取っても、既にかなり洗練された研究となっており、一つの最終到達点と言ってもよいと思う。(b)に関しては、まだ十分でないところが多い。特に、ポテンシャルを求める際に、解析接続をきちんと行うことは重要である。これは、格子 QCD では時間を虚数にして計算を行っているため、実の時間への接続をちゃんと行わなければならないということである。今の計算はこれに関して不十分な部分がある。これができること、業界に与えるインパクトは大きいと考える。また、3 体クォークのゼロ温度・有限温度でのポテンシャルなども興味深い研究である。

6. RICC の継続利用を希望の場合は、これまで利用した状況 (どの程度研究が進んだか、研究においてどこまで計算出来て、何が出来ていないか) や、継続して利用する際に行う具体的な内容

RICC で達成できた研究成果は

昨年度 :

有限温度・密度中の中間子の遮蔽質量の研究

今年度 :

より現実的な状況下での、有限温度中のクォーク間ポテンシャル

である。継続を希望するが、その際には研究課題として

・有限温度・密度中の核子の遮蔽質量の研究、また、今までと違う有限密度中の中間子の遮蔽質量の研究 (特にアイソスピン化学ポテンシャルの方

法を用いて)

・有限質量クォーク間力における、解析接続の問題の解決、また 3 体クォーク間力の計算

・有限アイソスピン化学ポテンシャルでの相図

を挙げたい。中間子の遮蔽質量とは、おおざっぱに言えば、中間子が空間中をどれだけ遠くまで伝わるかという指標であり、特に有限密度系での計算は殆ど存在していないため、興味深い。アイソスピン化学ポテンシャルの方法とは、有限密度格子 QCD に存在する「符号問題」を避けるための一つの方法である。今まで我々は、クォーク化学ポテンシャルによるテイラー展開法を用いる事で符号問題を避けてきたが、アイソスピン化学ポテンシャルの方法を用いた、異なる方法での計算も行いたいと考える。

7. 一般利用で演算時間を使い切れなかった理由

今年度とても大きく演算時間を残してしまった。

理由は

・今年度は、昨年度のような非常に大規模な計算をする必要がなかったため。昨年度の課題に関しては、計算結果をふまえて論文作成を行っており、今年度は新たな計算が必要なかった。残念ながら諸処の問題があり、まだ論文としてまとまってない部分があるが、現在鋭意作成中である。

・メンバーのうち 2 人が年度途中で他の研究機関に移ったため。

が挙げられる。課題の継続が認められた場合、このようなことがないように反省して研究を行いたい。

平成 23 年度 RICC 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

Y.Maezawa, T.Umeda, S.Aoki, S.Ejiri, T.Hatsuda, K.Kanaya, H.Ohno,

“Free energy of static quarks and Debye screening mass in 2 + 1-flavor lattice QCD

with Wilson quark action based on fixed-scale approach”, arXiv:1112.2756 ※現在 Phys.Rev.D に投稿中

【国際会議などの予稿集、proceeding】

H.Iida and Y.Ikeda, “Inter-quark potentials from NBS amplitudes and their applications”, to appear in PoS Lattice 2011.

【国際会議、学会などでの口頭発表】

・ H. Iida and Y.Ikeda, "Inter-quark potentials from NBS amplitudes and their application", “The twenty-ninth International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2010)”, Squaw valley, Lake Tahoe, California, US, July 2011.

・ Y.Ikeda and H.Iida, “Application of inter-quark potential with finite quark mass on lattice”, International workshop “Hadron Structure and Interactions”, RCNP Osaka Univ., Nov. 2011.

・ 飯田英明、池田陽一、「格子上のベーテ・サルピータ波動関数に基づくクォーク間ポテンシャル」、新学術領域研究会”素宇核融合による計算基礎物理学の進展”、合歓の郷（三重）、2011年12月（招待講演）

【その他】

特になし