

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

-研究の背景-

[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 (1

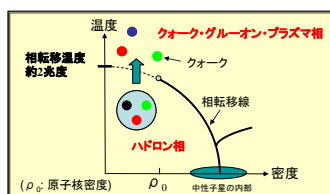


図 1: QCD の相図

000 兆 g/cm³ 程度)

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・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。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、仁科センターの延與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

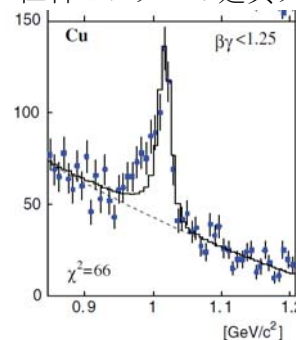


図 2: 高密度における Φ メソンのスペクトルの変化 (Ref.1)。実線は、 Φ メソンの質量がゼロ密度の場合と変わらないと仮定したときのスペクトル。山の位置が Φ メソンの質量を反映している。理論曲線と実験 (青点) との違いが見られる (Ref.1: M.Naruki et al., J.Phys.G34, S1059 (2007)).

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

今回 RICC を用い計算したのが、中間子の遮蔽質量である。中間子はクォーク・反クォークからできているハドロン、遮蔽質量は、空間方向の中間子の相関を表す量である。遮蔽質量はその名が示すように中間子の質量を反映すると考えられ、有限温度・有限密度でのハドロンの性質を表す 1 つの重要な指標である。今回の計算では、ウィルソフェルミオンと呼ばれるクォーク作用を用いている。以前の研究ではスタッガードフェルミオンと呼ばれるクォーク作用が頻繁に用いられていたが、この作用は有限温度では問題があることが分かっており、この問題のないウィルソフェルミオンを使うことは重要である。有限密度の格子 QCD には「符号問題」と呼ばれる困難が存在する。これを避けるため、遮蔽質量の化学ポテンシャル μ が 0 での微分係数を計算し、 $\mu=0$ 廻りのテイラー展開の係数を求めることで、有限密度の遮蔽質量を求めた (テイラー展開法)。すなわち遮蔽質量 M を $M/T=M_0/T+M_2/T(\mu/T)^2$ (T は温度)

と展開し、 M_0/T 、 M_2/T を求めた。今回は μ^2 の次数まで計算した (μ 1 はゼロになることが示せる)

3. 結果

(1) 有限温度の

遮蔽質量:

図 3(a) は、擬スカラー中間子の遮蔽質量 M_0/T の温度依存性、図 3(b) はベクトル粒子のそれである。赤点と青点は、クォーク質量の違いを表す。相転移温度 $T/T_{pc}=1$ のところで、遮蔽質量が特異な振る舞いをしてい

る。もしも遮蔽質量が中間子の質量と同じ振る舞いをするならば、中間子の質量を測ることで、相転移をとらえることができる可能性を示している。

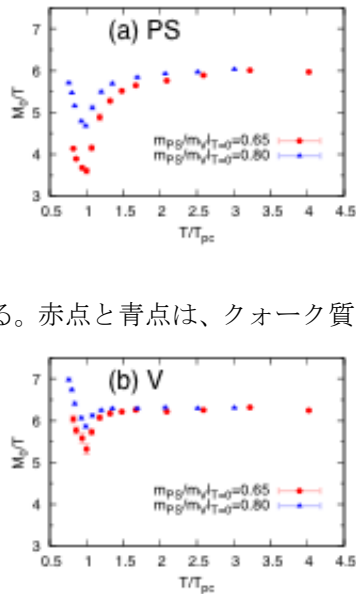


図 3: (a) 擬スカラー粒子および (b) ベクトル粒子の M_0/T

(2) 有限密度での遮蔽質量:

図 4(a) は擬スカラー中間子の M_2/T の温度依存性、図 4(b) がベクトル中間子のそれである。これからわかることは、相転移温度より低いときは、遮蔽質量は μ には殆ど依存しない。これに対し、相転移温度を超えると急激に増加する。すなわち、

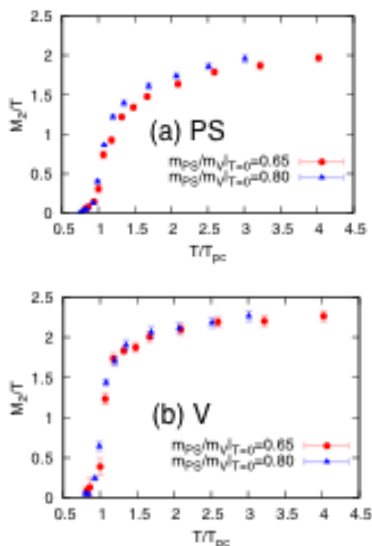


図 4: (a) 擬スカラー粒子および (b) ベクトル粒子の M_2/T

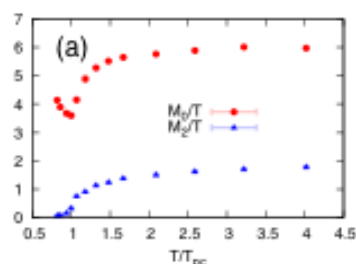
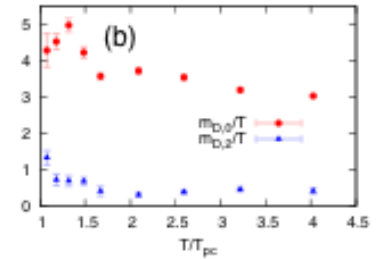


図 5: (a) 擬スカラー粒子の M_0/T と M_2/T (b) グルーオンの M_0/T と M_2/T

遮蔽質量は、相転移温度を超えると、密度に対し急激に増加することを示している。

(3) メソンとグルーオンとの違い

中間子はクォークからできている粒子である。一方、QCD ではグルーオンも重要な役割を果たす。両者の遮蔽質量を比較する。図 5(a) はメソンの M_0/T と M_2/T 、図 5(b) はグルーオンのそれである。これらより、遮蔽質量の温度依存性は、メソンとグルーオンで逆であることがわかる。すなわち、メソンの遮蔽質量は温度とともに大きくなるが、グルーオンは小さくなる。また、メソンの方が 2 次の寄与が大きい。これは、クォークの作用は μ あらわに含むのに比べ、グルーオンはあらわには含まないことに起因していると考えられる。



4. まとめ

有限温度および密度における中間子の遮蔽質量を、第一原理計算である格子 QCD により研究した。遮蔽質量は中間子の質量を反映すると考えられ、有限温度・有限密度でのハドロンの性質を表す重要な指標である。計算の結果、遮蔽質量の相転移付近での温度に対する特異な振る舞い、また、相転移直上での急激な密度依存性の変化などを見つけた。この研究は、これらの質量変化（正確には遮蔽質量変化）が相転移のシグナルとして有用であることを示し、実験に対する観測の提案にもなると考える。

5. 今後の計画・展望

今回の計算は、まだ格子のサイズが小さい。これを大きくし、信頼のおける結果を出すことが求められる。また、核子の質量の密度依存性を計算することも重要である。核子質量は、原子核物理のあらゆる場面で登場する量であり、この密度依存性が正確に求められれば、核構造や、高密度な星である中性子星の研究などに多大な貢献ができると思われる。

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

今回の計算では、

- 1) 化学ポテンシャルに対するテイラー展開法の計算の習得
- 2) ウィルソンフェルミオンによるメソンの遮蔽質量の温度依存性、また有限密度での遮蔽質量の振る舞い
- 3) ウィルソンフェルミオンとスタッガードフェルミオンの結果の違い
- 4) メソン遮蔽質量とグルーオン遮蔽質量の比較などを明らかにした。継続利用の際には
 - 1) より大きな格子の計算により、現在の計算を信頼のおけるものにする。
 - 2) 核子の質量の密度依存性を調べる。核子質量の密度依存性は、原子核のあらゆる分野で必要な知識であり、この計算には大きな意味がある。
 - 3) 違うアプローチによる有限密度ハドロンの質量の計算を行う。例えば、虚数化学ポテンシャル法を用いると、符号問題が避けられる。また、この計算は比較的計算量が少ない方法である。虚数の化学ポテンシャルから実数の化学ポテンシャルへの解析接続も、比較的しっかりした模型計算により行うことができるため、虚数化学ポテンシャルの方法は興味深い。

などが挙げられる。

7. 一般利用で演算時間を使い切れなかった理由

当初グルーオンの配位を自分らで作る予定であったが、他研究グループ（WHOT-QCD Collaboration）からそれを借りることができたため、計算時間の短縮ができた。来年度以降大きな格子での計算を行いたいが、その際には当初予定の計算時間が必要となる。

平成 22 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】

・Yoichi Ikeda and Hideaki Iida, “Quark-anti-quark potentials from Nambu-Bethe-Salpeter amplitudes on lattice”, arXiv:1102.2097. ※現在 Physics Letters B に投稿中

【国際会議などの予稿集、proceeding】

・Hideaki Iida, Yu Maezawa and Koichi Yazaki, “Hadron properties at finite temperature and density with two-flavor Wilson fermions”, LATTICE2010, Proceedings of Science, Pages 189, 2010 [arXiv:1012.2044].

・Yu Maezawa, Hiroaki Abuki, Tetsuo Hatsuda and Tomoi Koide, “Transport coefficients of causal dissipative relativistic hydrodynamics in quenched lattice simulations”, LATTICE2010, Proceedings of Science, Pages 201, 2010 [arXiv:1012.2222].

・Yoichi Ikeda and Hideaki Iida, “The anti-quark-quark potentials from Bethe-Salpeter amplitudes on lattice”, LATTICE2010, Proceedings of Science, Pages 143, 2010 [arXiv:1011.2866].

【国際会議、学会などでの口頭発表】

国際会議

・H. Iida. "Hadron properties at finite temperature and density with two-flavors of Wilson fermion", “The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2010)”, Sardinia, Italy, June. 2010.

・Y. Maezawa. "Transport coefficients from quenched lattice QCD simulations", “Nonperturbative Aspects of QCD at Finite Temperature and Density”, Univ. of Tsukuba, Japan, Nov. 2010 (Invited).

・Y. Maezawa. "Transport coefficients of causal dissipative relativistic hydrodynamics in quenched lattice simulations", “The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2010)”, Sardinia, Italy, June. 2010.

国内会議

・飯田英明 「2 フレーバーウィルソンフェルミオンを用いた格子 QCD による有限温度・密度でのメソン遮蔽質量の研究」、『基研研究会 熱場の量子論とその応用』、京都大学 基礎物理学研究所、2010 年 8 月

・飯田英明 “Inter-quark potential based on Bethe-Salpeter amplitudes in lattice QCD”, 『日本物理学会 2010 年秋季大会』、九州工業大学、2010 年 9 月

・飯田英明 “Interquark potentials from $\bar{q}q$ Bethe-Salpeter amplitudes on lattice”, 東京大学 (本郷) におけるセミナー、東京大学、2010 年 6 月

・飯田英明 「格子 QCD によるベテ・サルピータ波動関数に基づくクォーク間ポテンシャルの導出」、『少数粒子系物理の現状と今後の展望』、福岡、2010 年 8 月

・前沢祐 「有限温度下におけるチャーモニウム」, 『次世代格子ゲージシミュレーション研究会』、理化学研究所、2010 年 9 月 (招待講演)

・前沢祐 「格子 QCD シミュレーションによる有限温度下における閉じ込め・カイラル相転移の研究」, 『日本物理学会 2010 年秋季大会』、九州工業大学、2010 年 9 月 (招待講演)

・前沢祐 「格子ゲージシミュレーションによる因果的散逸流体力学における輸送係数の計算」 『基研研究会 熱場の量子論とその応用』、京都大学 基礎物理学研究所、2010 年 8 月

【その他】

特になし