

格子ゲージ理論を用いたクォークグルオンプラズマ相の研究

1 研究組織

- 研究責任者
浅川 正之(あさかわ まさゆき)大阪大学 大学院理学研究科・教授
- 共同研究者
野中 千穂(のなか ちほ)名古屋大学 大学院理学研究科・助教
北沢 正清(きたざわ まさきよ)大阪大学 大学院理学研究科・助教
河野 泰宏(こうの やすひろ)大阪大学 大学院理学研究科・D1
星野 武之(ほしの たけゆき)名古屋大学 大学院理学研究科・M2

2 当該年度の実施報告

平成 21 年度前期は、(1) Boltzmann-Einstein 原理を用いた格子シミュレーションによる輸送係数の解析、(2) 空間体積の大きな格子上におけるチャーモニウムの有限温度スペクトル関数の解析、という二つの研究課題に重点的に取り組んだ。

RHIC で行われた原子核衝突実験の時間発展を記述し、その物理を抽出するためには動的モデルが不可欠であり、近年そのようなモデルの一つである相対論的粘性流体方程式を用いた高温状態の現象論的解析が盛んに行われるようになってきている。粘性の入った相対論的流体方程式で最も単純なものは、Navier-Stokes (NS) 方程式を単純に相対論へ拡張したものである。しかし、このモデルには因果律を破る解が存在するほか、数値シミュレーションにおいて挙動が不安定になるという問題が知られている。このような問題を回避するために提案された相対論的粘性流体方程式の一つに、Israel-Stewart (IS) 方程式と呼ばれるものがある。IS 方程式では、流体方程式に NS 方程式の解への緩和を表わす項を加えることで因果律の問題を回避している。しかしながらこうして導入される項は半現象論的に導入されたものであり、その係数は流体方程式の範囲では決定できない。従って、流体モデルを解析する際にはこれらの係数はパラメータとして指定する必要がある。このため、IS 方程式には通常の NS 方程式に含まれるパラメータである粘性係数に加え、更に複数の現象論的パラメータが含まれることになり、これら多くの現象論的パラメータは IS 方程式を解析する際の問題となっている。

流体方程式に現れる輸送係数は本来、物質の微視的な性質によって決まるものであり、微視的理論が与えられれば決定されるべきものである。従って、格子 QCD シミュレーションを用いれば少なくとも原理的には、輸送係数は第一原理的に決定できるはずである。輸送係数は久保公式によりエネルギー運動量テンソルの時間相関関数の低エネルギー挙動と結び付いており、過去に行われた格子 QCD 上で輸送係数を測定する試みも全て、久保公式を用いる戦略を取っていた。しかし、格子 QCD シミュレーションで得られる相関関数は虚時間のものであり、久保公式を適用するためにはこれを実時間相関関数に解析接続する必要があるのだが、この解析接続の作業は実用的には極めて難しい。このため、これまでに行われた解析が十分な信頼性を持っているとは言い難い。

本研究では、最近 Muronga と Pratt によって提案された、平衡状態の静的なゆらぎの性質と IS 方程式に含まれる現象論的パラメータを結び付ける枠組みを格子 QCD に適用する

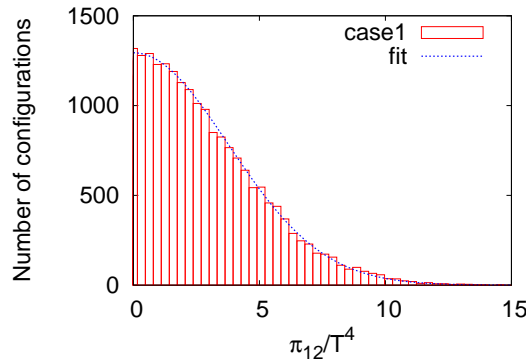


Figure 1: $32^3 \times 6$ の格子上で得られた $T = 2.5T_c$ におけるゆらぎの分布 [1].

試みを行った [1]。IS 方程式の現象論的な導出法の一つに、エントロピーを非平衡状態に拡張し、エントロピーが非減少であるという要請から巨視的変数が従う方程式に制限を与えるという方法がある。この方法では、非平衡エントロピーの振る舞いと、IS 方程式の現象論的パラメータの間の比が関連づけられる。Muronga と Pratt は、Boltzmann-Einstein 原理を用いて非平衡エントロピーを平衡状態のゆらぎから決定し、これにより IS 方程式の現象論的パラメータの比を決めることを提案した。この方法では輸送係数自身を計算することはできないものの、現象論的パラメータ間の比を決定することで IS 方程式に含まれるパラメータの数を減らすことができる。また、平衡状態の静的ゆらぎのみを用いるため、久保公式を用いて輸送係数を決める際の障害であった解析接続の問題を回避することができ、格子 QCD による解析が実用上簡単になることが期待される。

この方法で IS 方程式のパラメータを求めるため、我々は今年度、システム B を用いて有限温度 SU(3) ゲージ理論のゲージ配位を生成し、エネルギー運動量テンソルの各チャンネルの静的なゆらぎを測定した。ゲージ配位の更新には擬熱浴法と過緩和法を併用し、幾つかのパラメータに対し約 10,000 個のゲージ配位上でゆらぎを測定した。図 1 に、エネルギー運動量テンソルの応力チャンネル T_{12} のゆらぎの分布を掲げる。ここで得られた結果を単純に Muronga と Pratt の公式に適用してみたところ、ゆらぎが著しく大きな値を持つため、得られる IS 方程式のパラメータは因果律を破るような値となることが分かった。この結果を素直に受け入れると、IS 方程式をここで問題にしている系に適用するのは不適當ということになる。しかし、これらのチャンネルのゆらぎは真空においても有限の値を持ち、かつ紫外発散する量であるため、実際には真空のゆらぎの値を引き算しなくてはならない可能性が高い。このような解析は今後の課題である。

流体方程式に現れる輸送係数を求める試みに加え、有限温度におけるチャーモニウムの動的性質を解析するための準備的な計算も推し進めた。具体的には、大きな格子上でチャーモニウムスペクトルの解析を行うため、非等方格子を採用して幾つかの温度でゲージ配位の生成を行っている。

References

- [1] Y. Kohno, *et al.*, PoS(LATTICE 2009), 196 (2009).