

研究責任者名 Name	浅川正之 Masayuki Asakawa	所属機関 Affiliation	大阪大学 Osaka University
受理番号 Proposal No.	大型 12/13-21	研究課題名 Program title	格子 QCD による有限温度スペクトル関数と輸送係数の測定 Measurement of spectral functions and transport coefficients on the lattice

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

本研究では格子 QCD シミュレーションによる (1) クォーク・グルーオン・プラズマ中のチャーモニウム有限運動量スペクトルの解析、(2) 2 次の相対論的粘性流体力学に含まれる輸送係数の解析、(3) Wilson flow を用いた相関関数の解析、の 3 つの課題に重点的に取り組んできた。(1) については、以前に生成したチャーモニウムの相関関数を用いて最大エントロピー法によりスペクトル関数を推定する作業を継続して行った。特に、有限運動量のスペクトル関数の解析を継続して行った。(2) の輸送係数については、以前に生成したゲージ配位を用いた解析を継続して行った。(3) に関しては、最近起こった理論的進展に基づいて以前に生成したデータを再解析し、有用な結果を得つつある。

(英文)

We have investigated three subjects with lattice QCD simulations : (1)Charmonium spectral functions in quark-gluon plasma with non-zero momentum, (2)Transport coefficients in second order viscous hydrodynamics, (3)Measurement of correlation functions with Wilson flow. (1) We have analyzed momentum dependence of charmonium spectral functions using the maximum entropy method with gauge configurations generated previously. We have changed the algorithm to analyze spectral functions in order to evade a practical problem. (2)In the analysis of second order transport coefficients in SU(3) gauge theory, we found an effect which is not taken into account in the previous formulation. We have changed our formalism to incorporate this effect, and performed numerical simulations with the new formalism using gauge configuration generated in the previous study. (3) Following recent theoretical progress on Wilson flow, we analyzed the flow time dependence of the energy momentum tensor.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	0	0	0	1

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program	
1. 2.	
査読付きの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (* 不足する場合には追加願います。 Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)	
1	著者名 Author
	タイトル title
	雑誌名 name of journal
	URL
2	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
3	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (* 不足する場合には追加願います。 International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)	
1.	著者名 Author
	タイトル title
	雑誌名等 name of journal
	URL
2.	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
3.	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
その他 (学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (URL を記載) Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)	
1. 河野泰宏、博士論文、”Canonical correlation of energy-momentum tensor and transport coefficients from lattice gauge simulation”、大阪大学	
特記 (本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など) (過去に遡っても構いません。) Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)	
1. 2.	

格子ゲージ理論を用いたクォーク・グルーオン・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
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
伊藤 悦子 (いとう えつこ) 高エネルギー加速器研究機構・特任助教
河野 泰宏 (こうの やすひろ) 大阪大学 大学院理学研究科・D4
尾倉 貴之 (おぐら たかゆき) 大阪大学 大学院理学研究科・M2

2 研究実施報告

2.1 クォーク・グルーオン・プラズマ中におけるチャーモニウム有限温度スペクトルの運動量依存性

重イオン衝突で生成される $c\bar{c}$ 対は、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 中において $c\bar{c}$ 間ポテンシャルの遮蔽効果により相関を失い、QGP 中では束縛状態 (チャーモニウム) の生成が抑制されることが期待され、この抑制を重イオン衝突における QGP 生成のシグナルとすることが古くから提案されている。一方で、格子 QCD シミュレーションによるチャーモニウム有限温度スペクトルの解析により、臨界温度以上の高温においてもチャーモニウムが存在する可能性も指摘されている。これらの研究では、チャーモニウムが媒質に対して静止している状況、すなわち零運動量の場合のみを解析の対象としていた。しかし、実際の重イオン衝突で生成されるチャーモニウムは一般に媒質に対して相対運動している。この相対運動により崩壊幅が増大し、チャーモニウム抑制が促進される可能性はこれまでほとんど論じられていない。本研究では、格子 QCD シミュレーションにより有限温度・有限運動量におけるチャーモニウムスペクトルを解析する研究を行ってきた。スペクトルは格子上の虚時間相関関数に最大エントロピー法を適用することで測定した。解析はクエンチ近似で行い、非等方な格子上で有限温度のゲージ配位を生成し、各格子パラメータに対して約 400 のゲージ配位上で擬スカラーチャンネル η_c およびベクトルチャンネル (J/ψ) の虚時間相関関数の計算を行った。ゲージ配

位のアップデートには熱浴法と過緩和法を併用し、フェルミオン作用には Wilson 作用を用いた。本研究期間は、最大エントロピー法を用いて有限運動量のスペクトル関数を解析する作業を行った。詳細な解析は継続中である。

2.2 2 次の相対論的粘性流体力学における輸送係数の解析

RHIC の実験結果に対する完全流体模型による記述の成功を受け、近年流体模型を用いた重イオン衝突・QGP の現象論的研究が盛んに行われている。流体模型による時間発展の記述は LHC での重イオン衝突実験に関しても成功しており、重イオン衝突の現象論における流体模型の重要性は近年ますます重要性を増している。このため、流体模型に含まれるパラメータである輸送係数を QCD に基づいて決定することが、極めて重要な課題となっている。相対論的粘性流体力学の 1 次の理論 (相対論的 Navier-Stokes 理論) には因果律を破ることや数値シミュレーションの不安定性などの問題があることが知られている。1 次の理論を拡張した 2 次の流体方程式 (Israel-Stewart 理論) においては、上記の問題を回避することができるのだが、2 次の理論には 1 次の理論には含まれなかった新たな輸送係数 (2 次の輸送係数) が含まれており、これらは微視的理論 (重イオン衝突では QCD) により決定されるべき非負の物理量である。これら 2 次の輸送係数は、古典極限では久保公式を用いてエネルギー運動量テンソルのゆらぎと関係づけることができる。本研究ではこの関係を量子論に拡張し、格子 QCD シミュレーションにより格子上的エネルギー運動量テンソル (主にずり粘性係数に関連した非対角成分) のゆらぎを計算することで $SU(3)$ ゲージ理論における 2 次の輸送係数の解析を行ってきた。ただし、エネルギー運動量テンソルのゆらぎは真空においても紫外発散しており、物理的に意味のある値を求めるためにはこの発散を正則化する必要がある。我々は以前に行った解析において、真空のゆらぎを引き算することで正則化を定式化し、測定を行った。しかし最近、エネルギー運動量テンソルのゆらぎには真空ゆらぎの発散がもたらす寄与以外にも温度に依存した発散項が含まれており、この効果を含まない以前の定式化は誤りであることが分かった。本研究期間に、この効果を正しく取り込んだ定式化を行い、再解析を行った。

2.3 gradient flow を用いた熱力学量の解析

格子 QCD 数値シミュレーションによる有限温度 QCD の熱力学量の測定は、有限温度格子 QCD の最も基本的な問題の一つであり、過去数十年に渡り世界各地で莫大な計算機資源がこの問題に投入されてきた。この測定のために用いられる現在最も普及した解析手法は「積分法」と呼ばれるものである。この方法では、ある温度の熱力学量の測定のために、それより低温のシミュレーションを行いそれらを総合することで初めて熱力学量が得られる。また、それぞれの温度の解析の際に、対応するゼロ温度のシミュレーションが必要となる。このため、解析量が膨大

になる他、この手法が実用上適用可能な温度領域も限られてしまうという問題があった。そこで我々は、gradient flow と呼ばれる連続変換を施したゲージ場の上でエネルギー運動量テンソルを解析する方法を模索していた。最近、gradient flow により時間発展させたゲージ配位を用いると、正しく繰り込まれたエネルギー運動量テンソル演算子が定義できることが Luscher, 鈴木らによって提案された。そこで本研究期間中に、このように定義されたエネルギー運動量テンソル演算子を用いて熱力学量を測定することを試みた。本研究期間中には以前に行った数値シミュレーションの結果を再解析し、このような方法で熱力学量が正しく測定できるかを調べる予備的な研究を行い、有望な結果が得られた。この解析に関しては、次年度以降本申請課題とは切り離し、大型シミュレーション研究の別の研究課題として継続していく予定である。