

平成 31 年 5 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05350

研究課題名(和文) 超高温・高密度物質におけるエントロピー生成の機構と動的性質の解明

研究課題名(英文) Study of mechanisms of entropy production and dynamical properties at high temperature and density

研究代表者

國廣 悌二 (Kunihiro, Teiji)

京都大学・理学研究科・名誉教授

研究者番号：20153314

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：1)ヤン・ミルズ場としてのグルーオン系に対する伏見関数を構成し、直接的に量子効果を取り入れたエントロピーの時間発展を数値的に求めた。この伏見関数を場の量子論の問題に適用した半古典理論による計算によって、確かに、相対論的重イオン衝突の現実的な初期状態から出発してエントロピーが有意に生成されることが明らかにされた。2)長波長モードとしての古典場自体が粘性を有することを初めて示した。3)超高温・高密度でのクォーク物質の相図を汎関数くりこみ群理論によって計算し、臨界点を高精度で特定した。さらに、臨界点特有の集団モードの新しい特性を明らかにし、クォーク物質は非一様系に相転移し得ることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子場の動的な性質の研究においてこれまでは現象論的に取り入れていた量子効果を古典-量子対応が明確な分布関数を用いて直接的に取り入れることに成功した。具体的には、超高温においてハドロンから解放されるグルーオン場の伏見関数と呼ばれる分布関数の時間依存性を求め半古典論によりエントロピーを直接計算することに成功した。この研究は量子力学の観測理論あるいは宇宙初期の熱化過程に関連し我々基礎物理学全体へも大きいインパクトを与え得る。さらに、クォークやグルーオン系の相転移およびそこでのダイナミカルな性質についても精度のよい計算を行い、系が非一様な状態に相転移し得ることを示した。

研究成果の概要(英文)：1)Husimi function, which is a coarse-grained quantum distribution function was computed for the gluon system described as a quantum Yang-Mills theory, and directly calculated entropy as the Husimi-Wehrl entropy to examine the possible creation of entropy. We have shown that entropy is certainly created in the semiclassical approximation. 2) Shear viscosity was computed in a classical field theory that is interpreted to describing an infrared dynamics of the quantum field theory. It was found that the infrared dynamics may dominate to give the shear viscosity of the theory. 3)On the basis of the functional renormalization group method(FRG), we clarified the phase diagram at finite temperature and density, and identified the QCD critical point. FRG is further applied to explore the nature of the specific collective modes associated to the critical point, and showed that the quark matter is likely to undergo a phase transition to an inhomogeneous phase.

研究分野：原子核理論

キーワード：量子色力学 エントロピー 伏見関数 QCD臨界点 ソフトモード

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子色力学 (QCD) を基礎理論とする強い相互作用をする多体系は超高温・高密度においてクォーク・グルーオンが解放されカイラル対称性が回復した状態、すなわち、クォーク・グルーオンプラズマ (QGP) 状態へ相転移すると考えられている。QGP を地上の実験で作るために超高エネルギー重イオン加速器が米国のブルックヘブン国立研究所 (RHIC : Relativistic Heavy-Ion Collider) およびヨーロッパの CERN (LHC : Large Hadron Collider) に建設され、実験が行われている。RHIC の原子核衝突実験およびその後の相対論的理想流体模型を用いた解析は、生成された高温状態の物質がほとんど理想流体として振る舞うことと重イオン衝突後に局所熱平衡に至るまでの時間が $1\text{fm}/c$ (光が 10^{-13}cm 進むのに必要な時間)程度とたいへん短いものであることを示唆している。このうち、早期に流体力学的記述が妥当になることはエントロピー生成がそのような短期間に起こっていることを意味する。そもそも初期状態はハミルトン系であり、(古典理論であれば) リュウビウ方程式によって時間発展が記述される。さらに、緩和すると1体分布関数による記述が妥当な運動学的領域に至る。そこでは小さいスケールの情報は平均化され(疎視化という)情報が失われるので時間反転不変性が破れる。運動学的領域からさらに緩和すると温度や密度そしてエントロピーといった巨視的概念による記述、すなわち、流体力学的記述が妥当な段階に至る。重イオン衝突の現実的な初期状態から出発して、この過程を記述する体系的理論を与えることは基本的な重要課題であり、そのような理論構築に向けた研究を遂行することが本研究プロジェクトの主要課題の一つである。

2. 研究の目的

RHIC や LHC の実験のような超高エネルギー領域の重イオンの初期状態はグルーオン間の非線形相互作用により「カラーガラス凝縮」と呼ばれる状態になる。これは核子や中間子などハドロンを構成するクォークやグルーオンが解放され、さらにグルーオンが多量に存在する状態である。その記述は古典場理論でよく近似され「グラズマ状態」と呼ばれる。それは衝突後もしばらく続くものと考えられている。したがって、系の時間発展をグルーオン場の理論であるヤン・ミルズ理論を古典的に扱う理論、すなわち古典ヤン・ミルズ理論 (Classical Yang-Mills : CYM と略記) として記述することが妥当である。本研究プロジェクトは、高エネルギー重イオン衝突の初期状態は量子系でありながら、半古典的記述が有効であることを基礎に、ある種の量子的分布関数 (伏見関数) を用いて、上記の早期熱化 (エントロピー生成) の問題を解明することを目的としている。

伏見関数とは量子力学的な分布関数であるウィグナーの分布関数をガウス変換により量子力学的に要求される最小の疎視化をして得られる分布関数であり、半正定値性を有している。我々はエントロピー生成の機構を説明する枠組として伏見関数 $H(q, p)$ を用いた疎視化を行うことを世界で初めて提案し、カオス性を示す簡単な模型を用いたその有効性は B. Mueller (米国 Duke 大教授) と A. Schafer (独 Regensburg 大教授) との共同研究として発表されている。特に、Husimi-Wehrl (H-W) の時間変化率が古典系の正のリュプーノフ指数の和として与えられるコルモゴロフ-シナイ (K-S) エントロピーに一致することを見出した。K-S エントロピーはエントロピー生成率であり、系の混合性すなわちカオス性を反映している。

我々は、実際に古典ヤン・ミルズ (CYM) 場の時間発展を数値的に解いて、コルモゴロフ-シナイ (K-S) エントロピーを求め、確かに古典ヤン・ミルズ場の時空カオスがエントロピー生成の起源になり得ることを世界で初めて示している。さらにそこでは熱化までに要する時間に対して数 fm/c 程度という見積もりが得られている。そして、「グラズマ状態」という現実的な初期条件を取り入れた解析により、初期状態における可能な「縦方向」のゆらぎがグルーオン場の不安定性とその後のエントロピー生成に不可欠であることを明らかにしている。これは、重イオン衝突特有のゆらぎとそれに引き起こされる古典系の不安定モードの存在が対応する量子系のエントロピー生成に大きく寄与することを強く示唆している。

ウィグナー関数の時間発展から伏見関数を経て H-W エントロピーの時間発展を得る、というプログラムは少数自由度の量子力学系においてテストし数値アルゴリズムを開発している。そこでは古典系におけるカオス性とエントロピー生成との関連についても示唆的な結果が得られている。これを場の理論であるヤン・ミルズ場そして QCD へ拡張するのが本研究の主要課題である。

3. 研究の方法

与えられた初期条件の下での

「Wigner 関数の時間発展 → 伏見関数 → H-W エントロピーの時間発展」

というシナリオおよび古典系でのカオス性や可積分性との関連を比較的自由度の少ない量子力学系においてテストし解明する。次に、数値計算コードを自由度の大きいヤン・ミルズ場の場合に適用可能な形に拡張を行うために、効率的なアルゴリズムおよび近似法の開発を行う。高エネルギー重イオン衝突の様々な初期条件および境界条件の元で開発した手法を適用し、熱化の過程を定量的に評価、解析してエントロピー生成の機構を解明する。

以下により詳しく説明する：考えている量子系に対応する古典系のカオス性、特に正のリアプーノフ指数の和として与えられるコルモゴロフ-シナイ (K-S) エントロピー（生成率）と量子系のエントロピー生成率の関係を定量的に明らかにする。具体的には、テスト粒子法および種々のモンテ・カルロ法を用いて、数値的にコストのかかる位相空間の多重積分を実行することになる。

まず、対応する古典系がカオス性を示すことが知られている少数自由度の量子系における伏見関数および H-W エントロピーの時間発展を数値的に求めるアルゴリズムを確立し、古典系の正のリアプーノフ指数の和としての K-S エントロピーと H-W エントロピーの生成率の定量的対応関係を明らかにする。そのために、リアプーノフ指数の効率的な計算方法を開発する。

重イオン衝突では半古典近似が妥当なので、そのことを基礎に古典ハミルトン方程式の解から半古典近似のウィグナー関数を求める。すでに開発している古典ヤン・ミルズ場の運動方程式を解くコードを援用し、展開する。ただし、現実の重イオン衝突の場合のような膨張系ではなく、まず静止系での計算コードの開発をめざす。伏見関数への変換と H-W エントロピーの計算はテスト粒子法と種々のモンテ・カルロ法を用いることになるが、大自由度の計算のためこれらを効率よく行う数値計算のアルゴリズムの開発を行う。問題はエントロピー生成の有無とその増大の度合いなので、10 パーセントレベルの誤差を許容するアルゴリズム/方法を積極的に取り入れる。例えば、量子多体問題でしばしば用いられる平均場近似のように、密度行列が各自由度の関数の積で表されるとする近似を行う。また、その方法の妥当性を少数自由度の量子系でテストする。この効率のよい数値計算のアルゴリズムおよび方法の開発が本プロジェクトの前半の大きな課題となる。大型計算機を用いた計算を行っていく。大自由度系でのエントロピー計算を効率よく行うための数値計算のアルゴリズム開発を行う。

グルーオン場の初期配位とゆらぎがどのように「種」となってその後の古典系の軌道不安定性およびエントロピー生成率にどのように影響するかという興味深い問題を、初期配位のゆらぎの大きさや 特性を変化させて解析する。

更に、今後世界の各地で実験が行われると期待される比較的低温で高密度系の重イオン衝突による生成を見越して、量子色力学の臨界点近傍の非平衡ダイナミクスについても考察を進める。現時点では、場の理論の非摂動的な有望な方法として知られている「汎関数くりこみ群法:Functional Renormalization Group (FRG)」を用いる。ここでは、まず、臨界点近傍の低エネルギー励起【ソフトモード】の解明から出発して保存量のダイナミクスとしての流体モードと結合させた非平衡ダイナミクスの構築が課題となる。

4. 研究成果

(I-a) 重イオン衝突特有の初期状態を離れてヤン・ミルズ系固有のダイナミクスとしてエントロピー生成が起こるかを調べるために、一般的なランダムな初期状態から出発して運動方程式を解き、伏見関数を求め、系のエントロピーの時間発展を計算した。位相空間全体に渡る複数回の積分を実行するために、モンテ・カルロ法と2つの異なる「試行粒子法」を組み合わせて比較することが有効であることを示した。さらに、多数の引数を持つ分布関数に対して「積仮定」を設定することを提案し、上記の計算手法と組み合わせることで10-20パーセント程度の誤差で物理的な結果が得られることを示した。その結果、

ヤン・ミルズ理論において確かに固有のダイナミクスによりエントロピーが生成されることを示した。しかもその生成率は対応する古典系の正のリップーノフ指数としてのコロモゴロフ-シナイエントロピーと数値誤差の範囲で一致していることが判明した。それはヤン・ミルズ系のエントロピー生成が古典系のカオス性を反映していることを意味する。

次に、高エネルギー重イオン衝突の現実的な初期状態から出発した計算を行った。ただし、そのような初期状態をよく記述するマクレラン-ヴェヌゴパラン模型を静的な設定に焼きなおす近似の下で行った。古典近似の範囲で量子色力学に基づくヤン・ミルズ場の時間発展を計算し、量子分布関数であるウィグナー関数を粗視化して得られるグルーオン系の伏見関数をまず求めた。次いで、H-W エントロピーの時間発展を計算した。その結果、重イオン衝突の現実的な初期状態から出発しても、エントロピーが実際に生成されること、その緩和時間（「熱化時間」と呼ぶ）は $1\text{fm}/c$ 程度であること、そして、その生成の起源はヤン・ミルズ系の固有の非線形ダイナミクスを起源とするカオス性とともにより重イオン衝突特有の初期配意の持つ不安定性によることが明らかになった。

さらに、他のグループが熱化の指標として使っている圧力の等方化の解析も分布関数を用いて行った。我々の分布関数を用いる方法では任意の物理量の熱平衡期待値の計算が容易であることは特筆に値する。その結果、「等方化」が示唆する緩和時間もエントロピーから得られた上記熱化時間と定量的に整合的であることが判明した。

(I-b) 次に、古典場そのもの持つ非平衡ダイナミクスの特性を明らかにするために非線形自己結合を持つ古典場がどのような粘性率かの研究をグリーン-久保公式を用いて行った。これは世界的にもほとんど先例のない研究であるためにQCDではなく ϕ^4 結合を有する古典スカラー場理論を用いた。古典場理論はレイリー-ジーンズ型の発散を生むので物理的考察により決まる切断(カットオフ)を入れる。格子上に場を定義し異なる時間でのエネルギー-運動量テンソルの積の熱平衡アンサンブルについての平均、すなわち、時間相関関数を求める。そこでの場の時間発展は、熱平衡分布に従って生成した初期状態から出発して古典場の運動方程式を解いて計算される。(ずり)粘性係数はこの時間相関関数をフーリエ変換して得られるスペクトル関数の極限值として求められる。数値計算の結果、以下のことが分かった：1) 時間相関関数は初期の減衰振動的な振る舞いの後、緩やかな単調減少を示す。2) 後者の成分が粘性係数の値を事実上決定する。3) 得られた粘性係数は、量子場の「硬い成分」の寄与を与えると考えられる場の量子論での摂動計算の結果に比べると小さい。このことは、スカラー理論全体での粘性率は赤外成分のダイナミクスのよい記述を与える古典場による寄与が支配的であることを意味する。

(II) 今後世界の各地で実験が行われると期待される比較的低温で高密度系の重イオン衝突による生成を見越して、量子色力学の臨界点近傍の非平衡ダイナミクスについても考察を進めた。具体的には、汎関数くりこみ群法(FRG)を中間子-クォーク模型に適用して、QCD臨界点でのソフトモードの存在の有無とその性質について研究を進めてきた。そのために、FRGの計算法を基底状態だけでなく、励起状態が解析できるようにスペクトル関数と呼ばれる系の励起状態の特性を総合的に記述する量を計算する方法を発展させた。

その結果、この臨界点の特性に対応した特異な集団モードがゼロではない有限の波長で光速を超える群速度を持つようになることを見出した。モードの出現が近似による非物理的な結果ではなく、カイラル対称性の顕な破れに起因する物理的な効果によることを明らかにした。これは、クォーク物質が高密度においては非一様相に移り変わることを線形近似を超えた非摂動的な計算により初めて示したものであり。またこれは、中性子星の内部構造への大きい示唆を与える意味でも重要な成果である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

1) H. Tsukiji, T. Kunihiro, A. Ohnishi and T. T. Takahashi,

“Entropy production and isotropization in Yang-Mills theory using a quantum distribution function,”

PTEP2018 (2018) no. 1, 013D02, 17 ページ

doi:10.1093/ptep/ptx186 (査読有)

2) T. Yokota, T. Kunihiro and K. Morita,

“Tachyonic instability of the scalar mode prior to the QCD critical point based on the functional renormalization-group method in the two-flavor case,”

Phys. Rev. D96 (2017) no. 7, 074028, 13 ページ

doi:10.1103/PhysRevD.96.074028 (査読有)

3) H. Tsukiji, H. Iida, T. Kunihiro, A. Ohnishi and T. T. Takahashi,

“Entropy production from chaoticity in Yang-Mills field theory with use of the Husimi

function,’’

Phys. Rev. D 94 (2016) no. 9, 091502, 6 ページ

doi:10.1103/PhysRevD.94.091502 (査読有)

4) T. Yokota, T. Kunihiro and K. Morita,

“Functional renormalization group analysis of the soft mode at the QCD critical point,’’

PTEP2016 (2016) no. 7, 073D01, 25 ページ

doi:10.1093/ptep/ptw062 (査読有)

[学会発表] (計 14 件)

1) H. Matsuda, T. Kunihiro, A. Ohnishi and T. T. Takahashi,

“Thermalization and viscosity of classical fields”,

5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, October 23-27, 2018; Waikoloa,

Hawaii (国際学会) 2018 年

2) H. Tsukiji, T. Kunihiro, A. Ohnishi, T. T. Takahashi,

“Semiclassical approach to thermalization process in Yang-Mills field theory”,

YITP workshop “Quantum Thermodynamics: Thermalization and Fluctuations,

(国際学会) 2017 年

3) H. Tsukiji, T. Kunihiro, A. Ohnishi, T. T. Takahashi,

“Early-stage entropy production in the semiclassical approximation”,

4th International Conference on the Initial Stages in High-Energy Nuclear Collisions,

(国際学会) 2017 年

4) T. Kunihiro,

“Some Topics in hot and dense matter in QCD --- with a focus on soft modes of QCD phase Transitions ---”,

34th Reimei Workshop on Heavy-Ion Collisions at J-PARC, J-PARC at Tokai,

(国際学会、招待講演) 2016 年

5) T. Kunihiro,

“Renormalization method for construction of invariant manifold and its application to a resolution to Hilbert’s 6th problem with quantum statistics”,

Workshop Hilbert’s 6th Problem, Leicester, UK (国際会議、招待講演) 2016 年

6) T. Yokota, T. Kunihiro and K. Morita,

“Novel picture of the soft modes of the QCD critical point based on the FRG method”,

“Critical Point and Onset of Deconfinement” (国際会議), University of Wroclaw, Poland, 2016 年

7) T. Yokota, T. Kunihiro and K. Morita,

“Spectral functions in functional renormalization group approach --- analysis of the collective soft modes at the QCD critical point ---”,

8th International Conference on the Exact Renormalization Group (国際会議、招待講演), ICTP, Trieste, Italy, 2016 年

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等なし。

6. 研究組織

(1) 研究分担者

1. 研究分担者氏名：大西 明

ローマ字氏名：Akira Ohnishi

所属研究機関名：京都大学

部局名：基礎物理学研究所

職名：教授

研究者番号（8桁）：70250412

2. 研究分担者氏名：高橋 徹

ローマ字氏名：Tohru Takahashi

所属研究機関名：群馬工業高等専門学校

部局名：その他部局等

職名：准教授

研究者番号（8桁）：70467405

(2) 研究協力者

なし。

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。