

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：32641

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2014

課題番号：23654132

研究課題名(和文) AdS/CFT対応による非平衡定常物理学への新アプローチ

研究課題名(英文) New Approach to Nonequilibrium Steady States based on the AdS/CFT Correspondence

研究代表者

中村 真 (Nakamura, Shin)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：00360610

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではAdS/CFT対応を用いて、非平衡系の物理的性質の解析を行った。AdS/CFT対応は、非平衡系を一般相対性理論(重力理論)で記述することを可能にする対応関係である。

本研究ではこの手法を用いて、物質の非平衡状態のみで見られる相転移現象を理論的に発見することができた。また非平衡定常状態で物理量の揺らぎを感じる温度、有効温度を重力理論の言葉で計算し、その振る舞いを調べることができた。さらに、平衡系で知られている熱力学と類似の法則が、非平衡定常状態でどの程度成立し得るのかについて重要なヒントを与える物理量を、重力理論で定義することができた。

研究成果の概要(英文)：In this research project, I employed the AdS/CFT correspondence which enables us to compute physical quantities of non-equilibrium systems. In this method, non-equilibrium physics can be re-written in the language of general relativity, namely the theory of gravity.

By using this method, I discovered novel phase transitions that can be observed only out of equilibrium. I computed the effective temperature of non-equilibrium steady states that is detected by the fluctuations. I also defined a free energy of non-equilibrium steady states that is important when we investigate a generalization of thermodynamics into that of out of equilibrium.

研究分野：素粒子理論

キーワード：AdS/CFT対応 非平衡定常状態 非線形電気伝導

## 1. 研究開始当初の背景

AdS/CFT 対応とは、強く相互作用する量子ゲージ理論を高次元の古典超重力理論（一般相対性理論の拡張）で記述する理論的枠組みである。この枠組みでは、強く相互作用する荷電粒子系の非線形電気伝導度を、熱浴、荷電粒子系、および両者の相互作用を含んだ形で計算できる場合がある。研究代表者（以下、代表者とする）はこの特徴に注目し、本研究費申請時点で、ある空間 3 次元強相関電荷系における非バリスティックな非線形電気伝導度を AdS/CFT 対応により計算し、負性微分電気伝導（電流増加に伴い系の電場が減少する特異な電気伝導特性）を理論的に再現することに成功していた[1]。ここで調べた系では、正電荷・負電荷が結合状態を作ることによって絶縁相が、外部電場が結合状態を破壊することで伝導相（金属相）が実現する。代表者は 2005 年以来、AdS/CFT 対応の応用研究を一貫して行っており、膨張するゲージ粒子プラズマを AdS/CFT 対応で記述する研究に基づき、第 4 回素粒子奨学会・中村誠太郎賞を受賞していた。

## 2. 研究の目的

上記の背景に基づき、AdS/CFT 対応を用いて、既存の枠組みでは成しえなかった解析を行い、非平衡定常物理学の新たな研究手法を開拓することを本研究の大きな目的とした。具体的な研究項目としては、

(1) AdS/CFT 対応を用いて強相関電荷系における非バリスティックな負性微分電気伝導を解析し、その発現メカニズム、負性微分電気伝導由来の電流発振現象など、関連する物理現象を明らかにする

(2) 非平衡定常系に対し提案されている各種関係式やオンサガーの変分原理を、平衡から離れた量子系において AdS/CFT 対応の手法で検証し一般化する

の 2 項目を設定した。

## 3. 研究の方法

研究の方法としては(1)既に確立している AdS/CFT 対応のモデルにおいて、非平衡定常状態を実現する境界条件を課し、解析的手法で非平衡定常状態の性質を調べる方法、および(2)同様のモデルにおいて数値的に運動方程式を解き、非平衡定常状態の性質を解析する方法、を採用した。

## 4. 研究成果

(1) 新奇な非平衡相転移・臨界点の発見

外部電場を加えることで定常電流を実現する AdS/CFT 対応のモデルを用いて、ゲージ粒子多体系の非線形電気伝導を調べた。その結果、負性微分電気伝導から正の微分電気伝導へ転移する新奇な相転移現象を発見した。この相転移は散逸の存在する非平衡状態のみで実現される非平衡相転移である。この相転移は一次相転移の場合と二次相転移の場合がある。二次相転移における臨界点近傍では物理量のスケールリングが見られ、臨界指数を数値的に求めることが出来た。この研究成果は Physical Review Letter 誌に掲載された。[雑誌論文]

ここで、転移点を決定するには以下の方法を提案した。この現象は非平衡定常状態における現象のため、平衡系の相転移のように自由エネルギーを求めてその大小から転移点を決定する方法が採用できるか否かは非自明である。しかし、AdS/CFT 対応によって書き換えた重力理論側の描像では、非平衡定常系はブラックホール時空中の高次元膜（D-ブレーン）の古典力学に置きかわっている。従って、最安定状態を決定するには D-ブレーンのエネルギーを計算し、最低エネルギーを実現する状態を選べば良いと考えられる。この考察から、重力側の D-ブレーンのハミルトニアンを、電流密度が系のコントロールパラメータとなるように適切にルジャンドル変換して定義した量を、非平衡定常状態の自由エネルギーと見なすことにより、転移点を決定した。このような非平衡定常状態の自由エネルギーの定義そのものは非自明であるが、この定義を採用して決定した臨界点近傍で臨界現象が確認できたことから、一定の意味をなす定義となっているものと考えられる。

この成果の意義としては、非平衡臨界点に着目することで、微視的理論の詳細によらない非平衡物理学を議論できる可能性を拓いたことにある。今後の展望としては、この非平衡臨界現象を実際の物質系でも実験的に確認する試みを発展させ、理論的予言の実験的検証に結び付けたいと考えている。

(2) 非平衡定常状態の有効温度

AdS/CFT 対応における有効温度とその性質

AdS/CFT 対応を用いて非平衡定常状態を重力理論の枠組みで解析することにより、非平衡定常状態の揺動と散逸の関係を示す有効温度を、重力側の疑似ブラックホールのホーキング温度として得た。またこの有効温度の振る舞いを系統的に調べた。その結果、熱浴よりも有効温度が低くなる例が多くモデルに存在することを示した。[雑誌論文]

AdS/CFT 対応を用いて有効温度を議論した論文はこれまでもいくつか存在していたが、その有効温度の解釈について議論は収束していなかった。特に、着目するモードによって有効温度が異なることを主張する研究も

あった。ここでは、従来異なる有効温度を持つと主張されていた揺動モードが、他のモードと同一の有効温度を持つことを示し、重力理論で読み取ることのできる有効温度が、揺動散逸関係式に現れる揺動と散逸間の比例係数として統一的に理解可能であることを示した。

#### 非平衡定常状態の有効温度の整合性

上記の研究をさらに発展させ、電気伝導による非平衡定常系の有効温度とランジュバン系の有効温度の整合性を確認した。[雑誌論文]

の研究において有効温度の振る舞いを調べた際には、電気伝導による非平衡定常系と、熱浴中のテスト粒子を牽引するランジュバン系で有効温度の振る舞いが異なっていた。ここでは、電気伝導の系において電荷を担う粒子の質量を大きくし、同時に系の電荷密度を大きくすることで、実質的に多数のテスト粒子が熱浴中を電場により牽引される状態に近づけた。このような極限においては有効温度の振る舞いがランジュバン系での振る舞いと一致することが確認され、一連の解析の整合性が確認された。

上記、の有効温度に関する成果は、非平衡定常系の基本的なパラメータである有効温度の物理的な意味を整理し、非平衡定常状態の基礎理論を議論する際に有効温度を用いるための、基礎を整理した点にある。また、この有効温度は揺動と散逸の双方を測定することで、原理的に実験で測定可能であるから、ここで得られた有効温度の振る舞いと同様の振る舞いが現実の物質においても観測されるかどうか、実験的な検証へと結び付けたいと考えている。

#### (3) カイラル量子異常で誘導される非平衡現象

カイラル量子異常のある系に外部電場を印加し定常電流を流すことで、時間的に振動する不安定性が生じ得ることを AdS/CFT 対応の枠組みで発見した。現在この研究成果を論文にまとめている。

この不安定性が時間発展して最終的に到達する状態の詳細は不明であるが、少なくとも空間的、または時間的に不均一な状態となることは証明できる。この意味で、一定の強度よりも大きなカイラル量子異常を持つ系に、一定以上の外部電場を加え電流を流すと、系は均一状態を保てなくなることが結論される。

今後は、最終状態がなお時間的に振動している可能性について精査していきたいと考えている。

#### (4) 非平衡定常状態における運動量の化学

#### ポテンシャルの発見

運動量の散逸の存在する非平衡定常系では、揺らぎの運動量に対する化学ポテンシャルという、新たな非平衡系特有の物理量が存在することを AdS/CFT 対応の枠組みで発見した。現在この研究成果を論文にまとめている。

この研究では、非平衡定常状態を重力理論で記述すると、ブラックホール時空中の D-ブレーンで記述されることを用いた。この D-ブレーン上には疑似ブラックホールが形成されるが、運動量散逸のある場合は、通常のリターンブラックホールと非常に類似したものとなる。回転ブラックホールにはブラックホールの角運動量に対する化学ポテンシャルが存在するが、ここでは散逸される運動量に平行な方向の揺らぎの運動量に対する化学ポテンシャルの形で現れる。

今後は、この新しい化学ポテンシャルを実際の物質において実験的に検証する方法について考察を進めたいと考えている。

#### (5) 非平衡定常状態の自由エネルギーの定義と定常状態熱力学

非平衡定常状態における自由エネルギーの役割を果たす物理量を提案し、その振る舞いが佐々・田崎の定常状態熱力学[2]から要請される性質を全て満たすことを AdS/CFT 対応の枠組みで示した。

ここで採用した非平衡定常状態の自由エネルギーは系の(運動量散逸に平行な方向の)圧力に逆符号をかけたもので定義したが、結果として、(1)で採用した自由エネルギーの定義と厳密に一致することが確認できた。従って、(1)で用いた自由エネルギーの定義は佐々・田崎の意味での自然な性質を満たすことになる。現在この研究成果を論文にまとめている。

#### <引用文献>

[1] S. Nakamura, Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 1105-1114.

[2] S. Sasa and H. Tasaki, J. Stat. Phys. 125 (2006) 124-224.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

Hironori Hoshino and Shin Nakamura, "Effective Temperature of Nonequilibrium Dense Matter in Holography," Phys. Rev. D91 (2015) 26009, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.91.026009

Shin Nakamura and Hirosi Ooguri, "Out of Equilibrium Temperature from Holography," Phys. Rev. D88 (2013) 126003,

査読有,  
DOI: 10.1103/PhysRevD.88.126003

Shin Nakamura, “Nonequilibrium Phase Transitions and Nonequilibrium Critical Point from Anti de Sitter Space/Conformal Field Theory Correspondence,” Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 120602, 査読有,  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.120602

〔学会発表〕(計41件)

中村 真、「Effective Temperature of Nonequilibrium Steady States in AdS/CFT」, HHIQCD2015、2015年3月6日、京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)

中村 真、「Non-equilibrium Steady States in AdS/CFT Correspondence」、Thermodynamics, Large deviation, and Transportation、2014年9月17日、京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)

中村 真、「Effective Temperature of Non-equilibrium Steady States in AdS/CFT」, APCTP Focus Program, Aspects of Holography, 2014年7月21日、APCTP Pohang Korea

中村 真、「Effective Temperature of Non-equilibrium Steady States from AdS/CFT」, KEK Theory Workshop 2014、2014年2月21日、高エネルギー加速器研究機構(茨城県、つくば市)

中村 真、「AdS/CFT 対応による非平衡相転移・臨界現象」, 日本物理学会第68回年次大会、2013年3月27日、広島大学(広島県東広島市)

中村 真、「Nonequilibrium Phase Transitions and Nonequilibrium Critical Point from AdS/CFT」, STATPHYS25、2013年7月23日、ソウル国立大学(韓国、ソウル特別市)

〔その他〕

ホームページ等  
<http://www.phys.chuo-u.ac.jp/labs/nakamura/overview/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 真 (NAKAMURA, Shin)  
中央大学理工学部 教授  
研究者番号: 00360610