

A01 ゲージ・重力対応を用いた非平衡物理学への新アプローチ

中央大学理工学部 中村真

本研究ではゲージ・重力対応を用いた非平衡物理学の研究アプローチを確立するため、ゲージ・重力対応を用いる上での基礎的な問題に焦点をあてた理論的研究を行った。

【研究手法の背景】

ゲージ・重力対応とは、ゲージ場の量子論と重力理論（一般相対性理論）の間にある等価性であり、この対応関係を用いることで、ゲージ粒子の多体系の物理的性質を重力理論に置き換えて解析することが可能となる。重力理論による記述ではスケールの分離が起り、ミクロの物理とマクロの物理が時空上の異なる場所で記述されるようになる。時空上の異なる点はアインシュタイン方程式を通じて関連しているが、これは、ミクロの物理とマクロの物理の関係がアインシュタイン方程式（重力理論側の運動方程式）で結びついていることを意味している。本研究の基本的な方針は、熱浴に接したゲージ粒子の多体系に一定の外力を加え、この条件に相当する重力側の運動方程式を解くことで、外力でドライブされた非平衡系、特に非平衡定常状態の性質を解析するものである。

非平衡定常状態を記述するゲージ・重力対応のモデルのうち代表的なものとして、荷電粒子が熱浴と相互作用しているモデルがある。ここに例えば一定の外部電場を印加することで、定常電流の流れる非平衡定常状態が実現される。このモデルを用いると、曲がった時空上に挿入された高次元の膜（Dブレーン（D-brane）と呼ばれる、超弦理論のソリトンの解）の運動方程式を解くことで、この系における非線形電気伝導度の計算や、揺らぎが従う有効温度の計算が可能となることが知られている [1]。

本研究では、このようなDブレーンの解析を通じて、以下の項目に関する研究を行った。

【具体的な研究内容】

1. ゲージ・重力対応で記述される伝導体モデルの解析

ゲージ・重力対応によるDブレーンを用いた非平衡定常状態のモデルでは、非線形電気伝導度など、線形応答を超えた領域での巨視的な物理量を重力側の古典力学から計算できるという利点がある。一方で、粗視化の過程が重力理論という通常とは異なる言語に書き換えられているため、具体的にどのようなプロセスで非線形電気伝導が生じているのかが明確ではないという「欠点」もあった。

そこで、本研究では、このモデルにおける荷電粒子系の現象論的な描像を仮定し、ゲージ・重力対応による計算結果との整合性を確認した。具体的には、外力を受けて熱浴中を運動する荷電粒子は Drude 的なモデルに従うものとした。ただし、通常の Drude モデルでは緩和時間などを定数と置くが、ここでは緩和時間は荷電粒子の速度に依存するものとした。さらに、外部電場により正負荷電粒子対が対生成する効果も考慮し、荷電粒子対密度もモデルの変数に加えた。このような現象論的モデルによる非線形電気伝導度とゲージ・重力対応から得られる非線形電気伝導度を比較したところ、整合のとれた一致が見出され、その結果、荷

電粒子の緩和時間や荷電粒子対密度などを、系のパラメータ（熱浴の温度、化学ポテンシャル、外部電場や外部磁場、および微視的理論を規定するパラメータ等）の関数として得ることができた。この結果、ゲージ・重力対応で得られていた負性微分抵抗などの非線形な振る舞いは、上記のような粒子対生成を取り入れた **Drude** 的なモデルで説明可能であることが判明した。

この研究の中間報告は[2]などでなされているが、現在、最終的な結果を中央大学理工学部
の星野紘憲氏と研究論文にまとめている。

2. ゲージ・重力対応における紫外発散のくりこみ処方

ゲージ・重力対応における非平衡定常状態の記述では、系の挙動は曲がった時空中のDブレインの古典力学に支配されている。したがって、記述している非平衡定常系に自由エネルギーの概念が存在するのであれば、それは重力側のDブレインのハミルトニアン、あるいはそれを適切にルジャンドル変換したものであることが予想される。一方、ゲージ・重力対応はゲージ粒子の量子論を重力理論に置き換える対応原理であるため、量子効果による紫外発散を表わす発散が重力理論側のハミルトニアンにも現れる。紫外発散は場の量子論における「くりこみ」によって適切に処理できるが、重力側においても「くりこみ」に対応する処方が提案されている。しかし、外部電場等を印加した際に生じる紫外発散のくりこみに関して任意性が生じ、その任意性の固定方法が定かではないという問題があった。本研究では、場の理論におけるくりこみ処方との比較により、この任意性を取り除く試みを行った。現時点で、概ね満足いく処方を発見することができ、現在、さまざまな計算において、このくりこみ処方の妥当性の確認を進めている。

3. 定常状態熱力学に関する研究

本研究では、佐々・田崎の定常状態熱力学[3]にて提唱されている巨視的物理量間の関係性について調べた。文献[3]では非平衡定常系の電流 \mathbf{J} を示強性の変数として、定常状態熱力学が存在するとした場合に最も自然な形式を現象論的に議論している。この場合、定常状態の電流方向の圧力 \mathbf{P} は変数 \mathbf{J} について下に凸となることが予想されている。本研究では非線形領域において非平衡定常状態の電流方向の圧力を電流の関数として系統的に解析した。この研究の中間報告は[4]にて行われているが、最終的には上記2で述べた「くりこみ処方」により結果が左右されるため、今後2のくりこみ処方の任意性の固定法を確立した上で最終的な結論を出す予定である。

参考文献

- [1] 中村真, 日本物理学会誌 70 No. 7 (2015) pp. 510-518, およびここでの引用文献を参照.
- [2] 星野紘憲, 中村真, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 22aSB-5.
- [3] S. Sasa and H. Tasaki, *J. Stat. Phys.* 125 (2006) 125.
- [4] 中村真, 齊田浩見, 深澤裕一 日本物理学会 2016 年秋季大会, 22aSB-4.