

A01 ゲージ・重力対応を用いた非平衡定常系の基本法則の探求

中央大学大学院理工学研究科 中村 真

本研究ではゲージ・重力対応の手法を用いて非平衡定常系の基本法則に関する理論的研究を行った。

【研究手法の背景】

ゲージ・重力対応ではゲージ粒子の多体系を重力理論に置き換えて解析することが可能となる。この枠組みで設定が可能な非平衡定常系として、ランジュバン系、および定常電流の流れる導体系が挙げられる。いずれの系でも、非閉じ込め相にあるグルーオンの有限温度プラズマを用意して熱浴として用いる。ランジュバン系の場合、この熱浴にテスト粒子としての重いクォークを導入し、それを外力で牽引する。定常電流の系では、同じ熱浴にクォークの多体系を導入し、外部電場を印加することでクォーク電荷を輸送する。いずれの場合も着目系であるクォーク系と熱浴はクォーク・グルーオン間の相互作用を通じて結合しており、着目系に対して外力が行う仕事は熱として熱浴に散逸する。

これらの系を重力理論で記述すると、熱浴系はブラックホール時空に置き換わり、熱浴の温度はホーキング温度で表現される。着目系はDブレーンや弦といった物体に置き換わる。この描像では、着目系であるDブレーンや弦に外力が加えた仕事は、Dブレーンや弦の上を流れるエネルギー流となり、やがて熱浴であるブラックホールに吸収される。この、散逸を表現するエネルギー流の存在のため、Dブレーンや弦の振動の伝搬速度が変化し、ブラックホールに近い領域では、振動が外部に脱出できなくなる領域が現れる。これは音速を超える流体などで提唱されているアナログ・ブラックホールに類似の現象である。着目系であるDブレーンや弦の揺らぎの相関関数は、このアナログ・ブラックホールのホーキング温度で特徴づけられる。このため、アナログ・ブラックホールのホーキング温度は、熱浴の温度と区別して、着目系の有効温度と解釈される。着目系の相関関数の解析から、この有効温度は非平衡定常状態における揺動散逸関係式において、揺動と散逸の間の比例係数から読み取る有効温度に一致することが[1]などによって示されている。

【具体的研究成果】

1. 非平衡定常系の有効温度に関する研究

本研究は、名古屋大学大学院博士後期課程の星野紘憲氏との共同研究により遂行した。[1]の先行研究では、導体系とランジュバン系の有効温度がゲージ・重力対応の手法で系統的に調べられた。その結果、例えば、非平衡へのドライブにより導体系の有効温度が熱浴温度より上昇する場合でも、同種のゲージ粒子を用いて構成したランジュバン系では外力による牽引で有効温度が熱浴の温度より下がる場合があるなど、有効温度の振る舞いに顕著な差がある場合が見出された。本研究では、この二つの有効温度の振る舞いの整合性を考察した。

[1]で調べられたランジュバン系では無限に重いクォークを用いている一方、導体系では質量ゼロのクォークを輸送していた。そこで、導体系における電荷（クォーク）に新たに質量

を加え、ランジュバン系での設定に近づけることで整合性を確認することが考えられる。導体系では外部電場による正負電荷の対生成プロセスが存在しているが、電荷に質量を与えることで対生成を抑制することもでき、この意味でもランジュバン系の設定に近づく。

本研究では導体系に、クォークの質量とクォーク電荷の化学ポテンシャルを新たに導入して有効温度の解析し、電荷密度と荷電粒子質量の大きな極限では導体系の有効温度がランジュバン系の有効温度に一致することを示した。これにより、ゲージ・重力対応における有効温度の解析の整合性を確認することができた。また、少なくとも、多くのモデルにおいて、外部電場による電荷の対生成が有効温度を上げる効果を持つこと、外力による電荷の輸送は、有効温度を下げる方向の効果を持つことが分かった。この結果は文献[2]として出版された。

2. 非平衡定常状態における運動量に対する化学ポテンシャルの研究

本研究は、名古屋大学大学院博士後期課程の星野紘憲氏との共同研究である。上記1の導体系において、着目系から熱浴への運動量流（荷電粒子の流れが熱浴との摩擦により熱浴になす力積の平均）が存在する設定で解析を行った。特に、着目系の微少揺らぎのスペクトルを調べることで、着目系の揺らぎのうち電流方向の運動量を持つモードに対しては、そのモードを系に加えるために要する「化学ポテンシャル」の存在を示唆する結果が得られた。これは重力理論における回転ブラックホールに現れる角運動量に対する「化学ポテンシャル」と非常に類似しており、大変興味深い。現在、結果の詳細を論文[3]にまとめている。

3. 散逸の存在下における、量子異常のある系の安定性に関する研究

本研究は、カリフォルニア工科大学の大栗博司教授との共同研究である。カイラル対称性の量子異常のある系に外部電場を加え、定常電流を流して非平衡定常状態とした場合の系の安定性について、ゲージ・重力対応の枠内で解析を行った。その結果、量子異常が十分大きな非平衡定常系では、時間的に振動する不安定モードが現れることが分かった。現在、結果の詳細を論文[4]にまとめている。

4. ゲージ・重力対応の視点における非平衡定常系の有効作用の研究

非平衡定常状態を記述する自由エネルギーの役割を担う物理量に関するヒントを探るため、ゲージ・重力対応において、着目系を記述するDブレーンや弦のエネルギー運動量を求めるための研究を行った。従来の研究でもこれらのエネルギー運動量の計算を試みた例があるが、その計算方法には検討の余地がある。現在、より正確な計算手法の確立を試みている。

参考文献:

- [1] S. Nakamura and H. Ooguri, *Phys.Rev.* D88 (2013) 12, 126003.
- [2] H. Hoshino and S. Nakamura, *Phys. Rev.* D91 (2015) 2, 026009.
- [3] H. Hoshino and S. Nakamura, in preparation.
- [4] S. Nakamura and H. Ooguri, in preparation.