

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

中央大学理工学部 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。本研究では、ゲージ粒子の多体系に外力を加えることで非平衡定常状態を実現し、その物理的性質を解析した。

一般に、ゲージ理論を構成する粒子は大きく分けて二種類に大別される。一つは電荷を運ぶ粒子であり、電子やクォークに相当する。他方は光子やグルーオンに相当する「中性」の粒子であり、荷電粒子間の相互作用を担う。非可換ゲージ理論では、用いるゲージ群のランクを大きくとることにより、中性粒子系の自由度を非常に大きくすることができる。その結果、中性粒子系の比熱が十分大きくなり、熱浴の役割を果たすことが可能となる。このようにして用意された中性粒子による熱浴中に荷電粒子を導入し、この荷電粒子に外部電場を作用させることで、荷電粒子系を非平衡にドライブする。外部電場の行う仕事と、熱浴への散逸がバランスする状況を作ることで、荷電粒子系（着目系）を非平衡定常状態にできる。

ゲージ・重力対応を用いると、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ブレーンと呼ばれる物体に置き換わる。この描像では、着目系であるDブレーンに電場を印加し、ブラックホール（熱浴）に接触させた状況でDブレーンの力学的性質を調べることで、対応する非平衡定常状態の解析を行うことができる。電場が系になす仕事は、Dブレーン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ため、Dブレーン上の揺らぎの伝搬速度が変化し、揺らぎが外部に脱出できなくなる領域が現れる。これは流体の速度が音速を超える領域から音波が脱出できなくなる「ソニック・ブラックホール」に類似の現象であり、一般に、「アナログ・ブラックホール」と呼ばれている。ここで述べたDブレーン上のアナログ・ブラックホールの出現は重力理論側での描像であり、もとのゲージ粒子多体系にアナログ・ブラックホールが発生するわけではない。

本研究の基本的アイデアは、このようにして準備したDブレーン（アナログ・ブラックホール）の解析を通じて、定常電流の流れる非平衡定常状態の、非線形領域における非自明な知見を得ることにある。具体的には以下の項目に関する研究を行った。

【具体的な研究内容】

1. 非平衡定常状態の特性速度

定常電流の流れる非平衡定常系は、熱浴への運動量の流れが存在する場合と運動量の流れが存在しない場合に類別できる。例えば、電場によって同じ質量の正負電荷対が対生成され、これらが互いに逆方向に流れることにより電流が生じる系では、熱浴への運動量の流れはぜ

ロである。一方、正負電荷数が非対称、すなわち電荷密度がゼロでない系では、電場が系に与える力は運動量の形で熱浴に流出する。本研究では熱浴への運動量流れのある非平衡定常状態について、ゆらぎのスペクトルを計算した。その結果、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、運動量に共役な量として、そのモードを系に加えるために要する非ゼロの「化学ポテンシャル」が存在することがわかった。つまりスペクトルには空間的異方性が存在する。電流方向に、特定の速度（特性速度と呼ぶことにする）でローレンツ変換を施して適切な慣性系に移ると、スペクトルの異方性はなくなる。しかし、このような慣性系でも、電流、熱浴への運動量流入、着目系全体の運動量などのベクトル量は非ゼロのままである。この特性速度は上術の運動量の「化学ポテンシャル」に相当しており、重力理論側の視点では、アナログ・ブラックホールの地平面の速度として表現されている。中間報告は[1]などでなされているが、現在、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. 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[2]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[2]では非平衡定常系の電流 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 P は変数 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。その結果、この凸性は必ずしも成立しない場合があることを発見した。この研究の中間報告は[3,4]にて行われているが、現在、大同大学の斉田浩美氏と中央大学の深澤裕一氏との共著論文の形で詳細をまとめている。

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。現在は、モデルの正当性に関して慎重な検討を行っており、詳細を論文にまとめる準備をしている。

上記の他にも、負性微分電気伝導を示す非平衡定常状態における圧縮率の系統的解析を行うなど、非線形領域における非平衡定常状態の解析を、重力理論を通じて遂行した。

参考文献：

- [1] 星野紘憲, 中村真, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 27aSC-11.
- [2] S. Sasa and H. Tasaki, *J. Stat. Phys.* **125** (2006) 125.
- [3] S. Nakamura and H. Saida, “*International Symposium on Fluctuation Structure Out of Equilibrium 2015*,” (2015) p.56.
- [4] 中村真, 斉田浩見, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 17aCX-9、27aSC-12.