

ペンバ効果の統一理論を構築 —熱的緩和現象の新たな理論枠組み—

概要

京都大学基礎物理学研究所 Vu Tan Van 准教授、早川尚男 同教授らの研究グループは、熱的緩和過程^{注1)}におけるペンバ効果を統一かつ厳密に定量化する新たな理論枠組みを構築しました。ペンバ効果とは、通常の直感に反して、高温の物質が低温の物質よりも速く冷却される現象です。従来の研究では、特定の距離測定法を用いてその有無を判定していましたが、測定法の選択によって結果が変わるという根本的な課題がありました。本研究では、この問題を解決するために、「熱的マジョライゼーション^{注2)}」という数学的手法を導入し、異なる距離測定法に依存しない統一した理論枠組みを開発しました。この新しい理論により、ペンバ効果の評価が特定の測定法に依存せず、全ての測定法を同時に考慮した場合と等価であることを示しました。さらに、ペンバ効果が特定の温度範囲に限定されるものではなく、幅広い温度領域で発生しうることを明らかにしました。この枠組みは、古典系と量子系などの様々な熱的緩和過程にも適用可能であり、非平衡物理学の新たな視点を提供します。今後、この理論を基にした実験的検証が進めば、熱的緩和現象の理解がさらに深まり、熱機関^{注3)}や量子コンピュータ^{注4)}などの分野への応用も期待されます。

本研究成果は、2025年3月10日に米国の国際学術誌「*Physical Review Letters*」にオンライン掲載され、Editors' Suggestion に選ばれました。

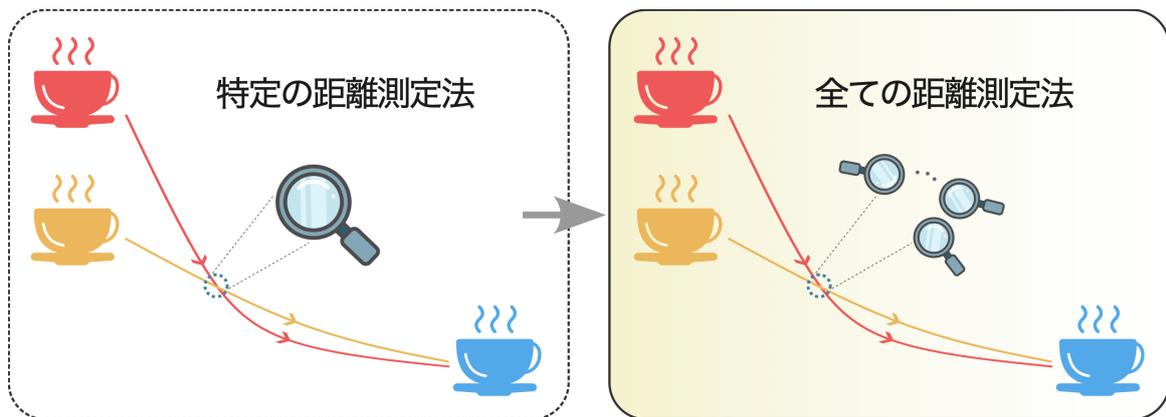


図 1: (左) 従来のペンバ効果の理論では、全変動距離やカルバック・ライブラー発散など、特定の距離測定法を用いて緩和速度を定量化します。(右) 本研究では、熱的マジョライゼーションに基づくペンバ効果を提案し、すべての距離測定法を同時に活用して緩和の傾向を包括的に評価する新たな枠組みを構築します。

1. 背景

私たちの身の回りで起こる多くの現象は、熱平衡に近い状態で観察され、それをもとに理解されています。しかし、温度を急激に変化させる「熱クエンチ」と呼ばれる過程では、通常の直感では説明しづらい予想外の現象が発生することがあります。その代表的な例が「ペンバ効果」です。

ペンバ効果とは、同じ環境下で冷却した際に、高温の物質が低温の物質よりも速く冷えることがある現象です。この現象は、紀元前 350 年頃にアリストテレスが記録しており、1963 年にはタンザニアの中学生のエラスト・B・ペンバによって再発見されました。一見すると直感に反するこの現象は、多くの科学者の関心を集め、その仕組みを解明するための研究が進められてきました。近年の研究により、ペンバ効果は水などの特定の物質に限らず、さまざまな物理系で観測されることが分かってきました。特に、大規模なマクロ系のみならず、トラップされたコロイド粒子や冷却原子系のような微小系でも発生することが確認され、量子コンピュータへの応用の可能性も含めて興味が広がっています。

ペンバ効果がどのような条件下で発生するのかを理解することは、物理学における重要な課題の一つです。従来の研究では、微小な系において、その時点の状態と最終的な熱平衡状態との距離を測定し、冷却速度を評価する方法が一般的に用いられてきました(図 1)。しかし、この手法には大きな課題がありました。それは、距離の測定方法によって結果が変わってしまうという点です。つまり、ある測定法ではペンバ効果が観測されるのに、別の測定法では観測されないというケースが存在するのです。測定方法は無数にあり、その中から普遍的な基準を見出すことは極めて難しく、物理学における大きな挑戦となっていました。

2. 研究手法・成果

本研究では、従来の測定法に依存する曖昧さを解消し、ペンバ効果をより統一的な視点から再定義することを目指しました。そのために、「熱的マジョライゼーション」という数学的枠組みを導入し、異なる測定法に依存せずにペンバ効果を一貫して評価できる新たなアプローチを提案しました。この手法により、ペンバ効果の有無を判定する際に、特定の測定法に依存する必要がなくなり、すべての測定法を同時に考慮することと等価であることを証明しました。

さらに、本研究ではメモリー効果のない確率過程のモデルであるマルコフ過程を用いた解析を行い、長時間領域におけるペンバ効果の発生条件を厳密に導出しました。その結果、ペンバ効果が特定の温度範囲に限定されるものではなく、広範な温度領域で発生しうることを示しました。これにより、ペンバ効果が特定の系に依存する特殊な現象ではなく、熱的緩和過程における普遍的な性質の一つであることが明らかになりました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究の成果により、ペンバ効果がどのような条件下で発生するのが体系的に理解され、熱的緩和現象の理論的基盤が大きく前進しました。さらに、本研究で提案した理論は、広範な物理系や類似した緩和現象にも適用可能であり、今後の理論的・実験的研究に新たな指針を提供することが期待されます。

熱的緩和過程は、熱機関や冷却技術の効率向上に不可欠な要素であり、本研究の成果は、それらのプロセスの最適化にも貢献する可能性があります。例えば、エネルギー効率の高い冷却技術の開発や、量子コンピュータの状態初期化に関する研究への応用が考えられます。さらに、ナノスケールや生体システムなどの複雑な環境における熱緩和現象の理解にもつながり、幅広い分野での発展が期待されます。

また、ペンバ効果の定量化には、確率分布に基づく手法だけでなく、エネルギーに関連する物理量を用いたアプローチも研究されています。これらの異なる定量化手法の関係を明らかにすることは、今後の重要な研究

課題の一つです。さらに、ペンバ効果が発生する最短時間スケールの特定も重要な課題となります。本研究では、長時間領域でのペンバ効果の発生条件を導出しましたが、有限時間領域におけるダイナミクスや制約については未解決の部分が残っています。これらの課題は、速度限界^{注5)}の観点からの解析を通じて、新たな知見を得ることが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は下記の助成金と研究機関による支援を受けて行われました。

- (1) JSPS 科研費「Exploring universal relations in nonequilibrium systems using optimal transport theory」
JP23K13032 (研究代表者：Vu Tan Van)
- (2) 京都大学教育研究振興財団
- (3) 京都大学基礎物理学研究所 重力量子情報研究センター

<用語解説>

注1) 熱的緩和過程：物理系が熱浴と結合して時間とともに熱平衡状態へと収束していく過程。

注2) 熱的マジョライゼーション：熱力学的な状態変化の可能性を判定する数学的手法。確率分布とエネルギー準位の関係を基に、熱平衡の制約下での状態遷移を評価する。

注3) 熱機関：熱エネルギーを利用して機械的な仕事を生み出す装置。蒸気機関や内燃機関などが代表例で、熱源から取り込んだエネルギーの一部を仕事に変換し、残りを排熱として放出する。

注4) 量子コンピュータ：量子力学の原理を利用して計算を行う次世代のコンピュータ。

注5) 速度限界：物理系がある状態から別の状態へ遷移する際に必要な最小時間を制約する理論的な限界。

<研究者のコメント>

「本研究では、無数に存在する異なる定量化手法を統一することで、ペンバ効果をより普遍的な視点から捉える新たな枠組みを提案しました。一見すると不可能に思える問題であっても、理論的に体系化し、その整合性を示せたことに大きな喜びを感じています。今後は、この理論のさらなる発展を図るとともに、広範な熱緩和現象との関連を明らかにし、その応用可能性を探っていきたいと考えています。」(Vu Tan Van)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Thermomajorization Mpemba effect (熱的マジョライゼーションペンバ効果)

著者：Tan Van Vu and Hisao Hayakawa

掲載誌：*Physical Review Letters* (*Phys. Rev. Lett.* **134**, 107101, (2025))

DOI：10.1103/PhysRevLett.134.107101