

【学術変革領域研究 (B)】

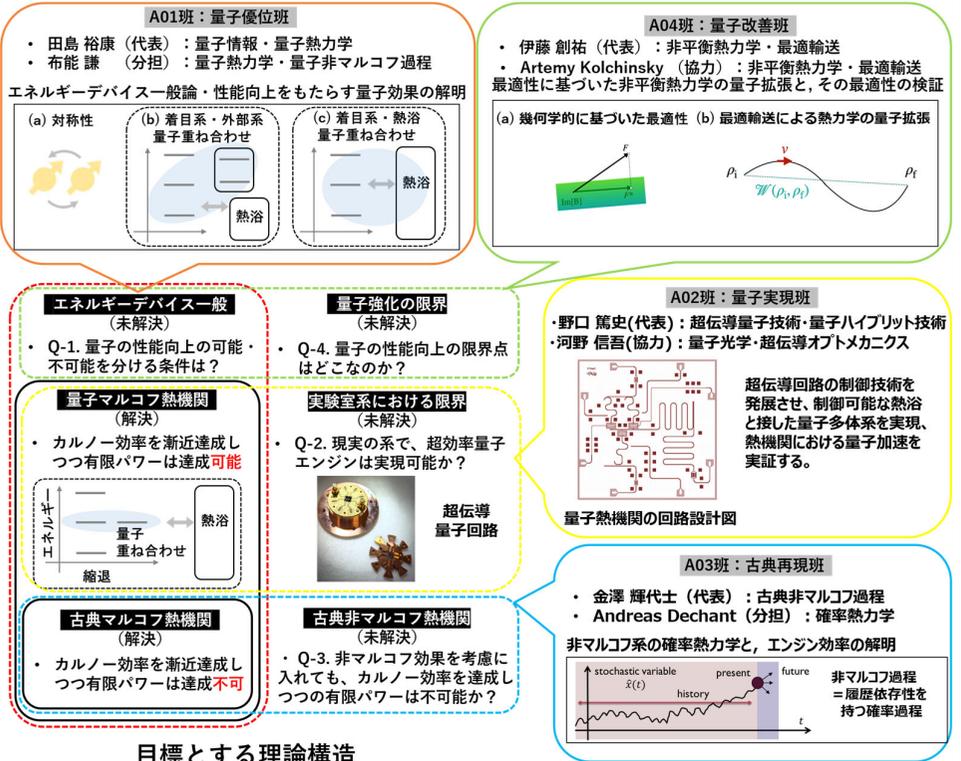
量子効果によるエネルギーの生成・利用の革新的効率向上に関する研究 (量子効果によるエネルギー生成/利用の革新的効率向上法の開拓と実現)

	研究代表者	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・助教 田島 裕康 (たじま ひろやす)	研究者番号: 60757897
	研究課題情報	課題番号: 24B204 キーワード: 量子熱力学, 非平衡物理学, 量子エンジン, 量子重ね合わせ	研究期間: 2024年度~2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像

近年、量子情報の分野で、量子効果を用いることで計算・通信などの情報処理技術に関する飛躍的な性能向上を実現できることが、理論・実験の双方から確かめられつつある。もしも同様の飛躍的な性能向上がエネルギーの生成・利用においても実現可能であれば、エネルギー問題を解決し、持続可能社会の実現に向けた新しい基幹技術を構築する鍵となりうる。しかし、情報処理とエネルギー生成・利用は大きく異なるタスクであり、こうした性能向上が実際に可能なのか、可能だとしてどのように実現できるかは明らかではない。本領域では、この問題を理論・実験の両面から解決する。より具体的には、量子計算機が計算において実現するような「古典力学デバイスに比べた超効率性の実現 (=量子優位性)」を、エネルギーの生成・消費の両面において確立し、それによる性能向上の限界を見極め、実験室レベルで実際に実現する。



目標とする理論構造

図1 領域全体のイメージ図

●位置づけと目標達成に向けたアプローチ (図1)

本領域の背景にあるのは、近年の非平衡統計力学で起きた理論的なブレイクスルーである。この領域では、熱力学第二法則が大幅に拡張され、その応用の一つとしてエネルギーの生成効率に関する熱力学効率・パワーの限界が明らかになった。その中で過剰な重要な事実として、熱力学第二法則が規定するエンジンの最高効率であるカルノー効率は、過去履歴に依存しないマルコフ系の古典熱機関では、有限速度で機能する (つまり、有限パワーを持つ) エンジンでは達成できないことが知られている (Shiraishi-Saito-Tasaki, PRL 2016)。一方で、本領域のA01班の構成員によって量子マルコフ系でカルノー効率を漸近的に達成し、有限パワーを持つエンジンが構成できることが、最近示された (Tajima-Funo, PRL 2016)。この結果はエネルギー生成法についての量子優位性を示唆する一方、図1にも示す疑問Q1~Q4が残っている:
 Q1: このような量子強化は常に可能か? 言い換えれば、量子強化の成立/不成立を分ける条件は何か?
 Q2: 現実の系で、超効率の量子エンジンを作成することは可能か?
 Q3: 履歴を参照する非マルコフ効果を考えることで、量子強化の効果を古典的に再現できないか?
 Q4: 現在の結果がもたらす量子強化の限界よりも強い強化は可能か? 可能とすれば、限界はどこか?
 そこで、これらの疑問を解決するために、異なる分野を背景とするA01~A04の4つの計画班を組織し、相互に連携してこれらの問題の解決を図る。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●研究領域および各計画研究の具体的な達成目標

領域目標: 量子効果を用いた超効率エンジン・エネルギーデバイスの理論的・実験的ブレイクスルーを引き起こす。より具体的な達成目標は:

- ①エネルギーが携わる多様なデバイス・対象における量子強化の普遍的な手法の確立
- ②飛躍的な性能強化を示す量子熱機関の実験による実現
- ③古典非マルコフ熱機関による量子熱機関の飛躍的な性能の再現可能性の検証
- ④量子強化の改善と、限界の探求

上記の目標を、下記の役割分担で達成する:

A01班 (量子優位班): ①主担当、②、③、④補助担当

・ エネルギーデバイス一般の量子強化理論の確立、性能向上をもたらす量子効果の解明を行う。現在提案している量子エンジンの線形性能強化を超えた強度の性能強化を模索するほか、量子エンジン以外のエネルギーに関わる多様なデバイス・対象における量子強化の普遍的な手法の確立に挑む。

A02班 (量子実験班): ②主担当

・ 全結合超伝導量子ビット制御技術を開発し、制御可能な熱浴の開発と組み合わせることで、古典マルコフエンジンに比べてスケールレベルで優れた超高性能量子熱機関の実現を行う。

A03班 (古典再現班): ③主担当

・ 非マルコフ古典確率過程に従う熱力学的限界の解析、量子協同現象の古典再現の検証を行う。同時に、A01班と協力して非マルコフ過程における量子熱力学の枠組みも整備する。

A04班 (量子改善班): ④主担当

・ 最適輸送・情報幾何を組み合わせる導かれる熱力学的なトレードオフ関係・幾何学的手法の量子拡張を行い、それを通して量子強化の理論の改善・最適化を行う。

●期待される波及効果

我々の究極的な目標は「量子効果によってエネルギー問題をはじめとした『情報技術以外』の諸問題を解決可能になる社会」の実現である。これまで量子効果は多くのデバイスの性能を向上させてきたが、それらは通信・計算・センシングなど、情報関連の技術に限定されていた。しかしエネルギー問題に代表されるように、現実の世界は情報技術と直接的な結びつきのない問題を数多く抱えている。そうした問題の多くは、量子熱力学的な枠組みでとらえられる構造を持っており、エネルギー問題と類似したアプローチを適用できると期待できる。本領域のエネルギー問題に対する量子的なアプローチを開発し、情報以外の問題を広く量子で解決する処方箋を与えることが、我々の究極的な目標である。

ホームページ等

<https://www.tajima-qi.lab.uec.ac.jp/qe-innovation/>
 Xアカウント: @QEInnovation

