

量子コヒーレンスによる流速・散逸のトレードオフの実効的無効化

田島 裕康 〈電気通信大学大学院情報理工学系研究科 hiroyasu.tajima@uec.ac.jp〉

布能 謙 〈理化学研究所開拓研究本部 ken.funou@riken.jp〉

大きな流れは大きな抵抗を生む。こうした関係は、電気抵抗や摩擦など、自然界のいたるところに見出すことができる。例えばオームの法則によれば、発熱量は電流量の二乗に比例する。

近年、こうした関係をより一般に「流れの大きさ」と「エントロピーの増大速度（散逸）」の関係と捉えた様々な**トレードオフ不等式**が、非平衡統計力学の分野で導出されている。なにを流れの大きさととらえるかには確率の流れからエネルギー流まで幅があるが、本質的なメッセージは同一である。すなわち、流れを大きくすると散逸を小さくすることは両立しない。

この「流速・散逸のトレードオフ」は、まず物理学の基礎的な面において非常に重要な意味を持つ。具体的には、このトレードオフは熱力学第二法則をより精密にしたものとして捉えることもできる。熱力学第二法則がエントロピーの増大の程度を予言しないのに対し、このトレードオフはエントロピーの増大速度の下界を指定する。

流速・散逸トレードオフはまた、量子計算におけるゲート操作の速度限界や、分子モーターの動作精度と熱力学的コストの関係など多岐にわたる応用を持つ。特に重要な応用として熱機関の**効率とパワー**の間のトレードオフがあげられる。熱機関の効率上限が**カルノー効率**であることはカルノーの定理によって予言されるが、この効率上限を達成する方法としてよく知られるカルノーサイクルは、パワーを0にしてしまう。そして、カルノー効率を達成しつつパワーを正にする方法があるかないかは、少なくとも熱力学の範囲では結論が出ない。ところが流速・散逸トレードオフから導かれる白石-齊藤-田崎限界は、そのような方法が存在しないことを厳密に示す。熱機関は現代文明の基礎をなすデバイスの一つなので、このことは非常に重要な結論であると

いえる。

このような重要性から研究が進む一方、量子重ね合わせが流速・散逸のトレードオフにどう影響するのかについては、あまり理解が進んでこなかった。このトレードオフは不可逆性とエネルギーの流れの間の基本的な関係であり、そこに量子効果がどのような影響をもたらすのかは非常に興味深い問題と言える。さらに、このトレードオフは熱機関の性能に対する制限を与えるため、このトレードオフに量子効果がどのように寄与するかを理解できれば、量子効果が熱機関の性能にどのような影響を及ぼせるかを理解できる可能性が高い。

こうした状況を踏まえ、我々は流速と散逸のトレードオフ、特に熱流と散逸のトレードオフに対する量子重ね合わせの影響を解析し、系統的な規則を得ることに成功した。得られた規則は以下の3つである。

- 異なるエネルギーの準位間の重ね合わせ（コヒーレンス）はトレードオフを強める。すなわち、異なるエネルギー間のコヒーレンスは熱流のエネルギーロスを強める。
- 縮退間のコヒーレンスはトレードオフを弱める。すなわち、縮退間のコヒーレンスは熱流のエネルギーロスを弱める。
- 縮退間のコヒーレンスが十分な量ある時には、トレードオフが実効的に無効化され、熱がエントロピーの増大なく流れることが可能になる。このことは、マクロな大きさの熱の流れで、エネルギーロスのないものを実現できることを意味する。

我々の規則は直接的に熱機関をはじめとしたエネルギーデバイスに応用できる。特に規則3からは、カルノー効率を実効的に達成しつつ、有限のパワーを持つエンジンを実際に構成できる。こうした夢のエンジンの実現のための最初の手掛かりとなること、そして不可逆性と量子性の深い関係を理解する一助となることが期待される。

用語解説

トレードオフ不等式：

2つの量に対して、「あちらを立てれば、こちらが立たず」の関係があるとき、二つの間にはトレードオフがあるという。このトレードオフの関係を表すような不等式をトレードオフ不等式と呼ぶ。例えば、ある変数 x の関数としての A, B, x と独立な C に対して $A(x)/B(x) \leq C$ となっている時には、「 B を小さくしつつ、 A を大きくすることはできない」というトレードオフがある。

効率とパワー：

熱機関は高温熱源から熱エネルギーを受け取り、一部を低温熱源に捨て、残りを仕事（電気エネルギーなどの力学的エネルギー）に変換するデバイスである。その評価は大きく分けて二つのパラメータで評価される。一つ目が効率で、熱から仕事への変換効率を指す。もう一つがパワーで、単位時間当たりの仕事量を指す。効率とパワーは、それぞれ車と言う燃費と馬力に対応する量である。

カルノー効率：

熱機関の効率には、カルノー効率と呼ばれる「どんな熱機関でも超えられない限界」が存在することが知られている。カルノー効率は高温熱源の温度 T_H と低温熱源の温度 T_C だけで $1 - T_C/T_H$ のように表すことができる。