

量子情報処理における熱力学第二法則

沙川 貴大

京都大学 白眉センター・基礎物理学研究所

近年、量子系における熱力学第二法則とその拡張が、活発な研究の対象になっている（レビューとして、たとえば [1]）。非平衡統計力学の観点からは、「ゆらぎの定理」をはじめとする普遍的な非平衡関係式が、量子系においても成立することが明らかになってきている。熱力学第二法則は、そのような非平衡関係式の直接の帰結とみなすことができる。さらに量子情報理論の観点からは、量子系における「相関」と熱力学が、どういう関係にあるのかが議論されている。

我々はこの二つの研究の方向性を統合し、量子測定や量子フィードバックといった量子情報処理過程に対して、熱力学第二法則がどう拡張されるかを研究してきた [2,3]。拡張された熱力学第二法則によって、量子情報処理に要するエネルギーコスト（仕事・自由エネルギー）の原理的な下限を明らかにすることができる。

まず、量子測定においては、通常第二法則が与える下限よりも多くのエネルギーコストが必要である。一方、量子フィードバックによって、通常第二法則が与える下限よりも少ないエネルギーコストで系を制御することができる——言い換えると、通常第二法則が与える上限よりも、多くの仕事・自由エネルギーを取り出すことができる。これは、いわゆる「マクスウェルのデーモン」による操作とみなすことができる。

また、量子系における情報量にはいくつかの種類があるが、熱力学第二法則を考える上では QC-相互情報量と呼ばれる量が重要な役割を果たす。QC-相互情報量は「ある量子状態にエンコードされている古典情報量の上限」に対応し、Holevo 限界の場合と似た不等式の上限となることが知られている。

本講演では、これらの研究内容とその背景についての、レビューを行う。また、マクスウェルのデーモンのパラドックスをいかに解決することができるかについても議論する。

[1] T. Sagawa, "Second Law-Like Inequalities with Quantum Relative Entropy: An Introduction." As a chapter of "Lectures on Quantum Computing, Thermodynamics and Statistical Physics", Kinki University Series on Quantum Computing (World Scientific, 2012).

[2] T. Sagawa and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **100**, 080403 (2008).

[3] T. Sagawa and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **102**, 250602 (2009); **106**, 189901(E) (2011).