論文審査の結果の要旨

氏名　設樂　智洋

本論文で設樂氏は、非平衡統計力学と幾何学の概念が密接に結びついていて、一方の結果が他方の研究に有用であることを示しました。結果は主に二つに分かれます。一つは量子統計力学系の量子フィッシャー情報量を考えるに当たって線形応答や揺動散逸定理を用いるのが便利であるということ、一つは非平衡操作における過剰仕事を求めるのには、熱平衡状態の空間上の微分幾何学的構造を考えるのが便利であるということです。以下にそれぞれの内容をまとめます。

第一の結果におけるフィッシャー情報量とは、確率分布にどの程度の情報が含まれているかを定量化したもので、任意のマルコフ写像に対して単調減少します。これは、どんなマルコフ操作でも情報が減ることを表しています。古典的な確率分布に対してはフィッシャー情報量が一意に与えられますが、量子論においては無数に定義することができ、個々の定義が作用素単調関数 $f(x)$と一対一に対応しています。この作用素単調関数 $f(x)$を用いると物理量の共分散を一般化でき、その一般化共分散が量子フィッシャー情報量と一対一に対応していることもわかっています。

設樂氏は線形応答と共分散の関係を表す揺動散逸定理を、線形応答と一般化共分散の関係を表すように一般化し、その係数に作用素単調関数 $f(x)$が現れることを示しました。また、一般化共分散と量子フィッシャー情報量の対応関係を用いて、線形応答と量子フィッシャー情報量の関係式を与えました。これまでは、非常に限られた種類の量子フィッシャー情報量についてのみの議論がありましたが、設樂氏は全ての作用素単調関数 $f(x)$に対する完全な一般論を定式化しました。特に、線形応答と量子フィッシャー情報量の関係式は、実験において測定可能な線形応答量から、通常は計算が困難な量子フィッシャー情報量を定量的に評価する手続を与えており、理論的だけでなく実験のデータ解析手法の観点からも高く評価できます。

第二の結果において設樂氏は、過剰仕事を任意の熱力学操作に対して逐次的に計算する展開を与えました。展開係数は、熱力学操作の緩慢さを表すパラメータであり、展開のゼロ次が準静的過程から得られる結果に対応していることが示されました。設樂氏はさらに、展開の一次が揺動散逸関係に対応していること、展開の二次では三次のキュムラントが寄与して、揺動散逸関係を越える結果が現れることを示しました。最後に、展開の k 次で $k+1$ 次のキュムラントが現れることを予想しました。

非線形項を知るためには、正弦波に対する高次の応答を調べることもありますが、一般の実験系でそれが容易であるとは限りません。設樂氏の結果は、任意の熱力学的操作に対して非線形性を知るための手続を与えており、これもまた、理論的だけでなく実験のデータ解析手法の観点からも高く評価できます。

本論文は８章からなります。第１章はイントロダクション、第８章は結論に充てられています。設樂氏は、第一の結果を第２章と第４章のレビューに続いて第５章に詳しく述べています。第二の結果は、第３章のレビューに続いて第６章と第７章に述べられています。第２章から第４章までのレビューは、以降の結果をよりよく理解するためであると同時に、それぞれがまとまりの良いレビューにもなっています。第５章から第７章までの主要結果の内容は出版論文および投稿準備中の論文に基づいています。第５章は、上田正仁氏との共同研究、第６章は David Alexander Sivak 氏との共同研究、第７章は村下湧音氏・上田正仁氏との共同研究に基いていますが、いずれも論文提出者である設樂智洋氏が主導した研究であり、設樂氏の寄与が主たるものであると判断します。

以上のことから、設樂智洋氏に博士（理学）の学位を授与できると認めます。