

論文審査の結果の要旨

氏名 青木 隆明

一般に量子系を外界から完全に孤立させることは難しく、現実には外部系との接触によりデコヒーレンスや散逸が生じる。このような状況における着目する量子系のことを、開放量子系と呼ぶ。Schrödinger 方程式で時間発展が記述される孤立量子系とは異なり、開放量子系の時間発展はもはやユニタリーではなく、その記述方程式も一般には複雑になる。しかし、着目系と外部系の結合が弱い極限では、Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad (GKSL) 方程式と呼ばれるマスター方程式で着目系の密度行列の時間発展が記述されることが知られている。開放量子系は、量子熱力学の研究の格好の舞台でもある。特に、GKSL 方程式に従う系には、von Neumann エントロピー生成率が非負であるという特徴がある。本論文はこのような背景のもと、結合量子振動子系に着目し、1. Kerr 非線形パラメトリック発振器 (KPO) に対する GKSL 方程式、2. 結合量子振動子系の非平衡熱力学エントロピーとその生成率の定式化、という2つのテーマについて論じたものである。

本論文は英文で、6章と付録からなる。第1章は序論で、全体的な問題意識と目的、本論文で得られた結果の概観、および本論文の構成について述べられている。第2章では、本論文の背景となる開放量子系の基礎的な事項についてまとめられている。特に、GKSL 方程式の導出について詳しく解説している。また、具体例として、着目系のひとつの調和振動子が、外部系の他の調和振動子と星型に結合した系を取り挙げ、この場合の GKSL 方程式の散逸項の具体形を導出している。第3章では、量子回路系を用いた KPO の構成を解説した後に、KPO の相互作用表示でのハミルトニアンを導出を詳述している。また、量子ビットとしての利用が提案されている KPO の二重縮退した基底状態の厳密な表式や、励起状態の近似的な表式などの既知の結果がまとめられている。

第4章と第5章の内容が、本論文の主要結果である。第4章では、KPO に対する GKSL 方程式の微視的導出とその帰結について議論している。まず、従来の研究では、散逸項として1光子のロスとゲインを用いているが、これは着目系が調和振動子の場合には正しいが、KPO のように非線形性をもつ

場合には正しくないことを指摘している。この問題意識のもと、KPOが外部系の他の調和振動子と星型に結合した系から出発し、GKSL方程式を微視的に導出している。(ただし、簡単のため、二重縮退した基底状態、二重縮退した第一励起状態の計四準位に議論を制限している。) 得られた散逸項は、1光子のロスやゲインの形に書けない複雑な項だが、この項を考慮すると、先行研究で議論されている散逸項の場合に比べて、励起エラーが小さく、低温では基底状態への閉じ込めが良くなることを数値的に示している。

第5章では、第2章で導入した結合量子振動子系における非平衡熱力学エントロピーとその生成率の定式化について議論している。まず、着目系と外部系からなる全系の熱力学エントロピーについて解説した後に、従来の研究でよく用いられる von Neumann エントロピー生成率を導入し、この量の定義では、外部系である熱浴の温度が初期温度から変化しないことが仮定されていることを指摘する。そして、この仮定は、外部系が有限である場合には必ずしも妥当ではないことを指摘し、外部系の温度変化を考慮した取り扱いを結合量子振動子系において展開する。具体的には、全系の初期状態の密度行列を Gibbs 状態のテンソル積とし、その時間発展から各調和振動子および全系の熱力学エントロピー、およびその生成率を定義する。また、振動子の振動数や結合定数を具体的な値に置いた上で全系の熱力学エントロピー生成率を数値的に計算し、その結果、この量が GKSL 方程式による記述が正しい時間領域でも負の値を取りうることを示した。この結果は、従来用いられてきた von Neumann エントロピー生成率が非負であることとは対照的であり、新たに導入された全系の熱力学エントロピー生成率が、熱浴の有限サイズ効果を示す指標となっていることを示唆する。

最後に第6章では、論文全体のまとめと今後の展望が述べられている。付録はA~Gからなり、本文中の議論に必要な事項の導出にあてられている。

以上のように、本論文では、結合量子振動子系の動力学と熱力学に関する研究を行い、その結果、KPOにおける散逸の微視的起源の解明および熱浴の有限サイズ効果を考慮した全系の熱力学エントロピーとその生成率の導入に成功している。得られた結果は、開放量子系の理論的理解に対して一定の寄与があると認められる。よって本論文は、学位論文として十分な内容を持つものと審査委員全員が認めた。

なお、本論文の結果は 松崎雄一郎氏、箱嶋秀昭氏との共同研究に基づいているが、論文提出者が主体となって問題設定と定式化、解析および結果の検討を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。