

京都大学	博 士（理 学）	氏名	梁 玟碩
論文題目	Theory of Open Quantum Dynamics under Gauge Fields: Application to the Aharonov-Bohm Ring (ゲージ場下における開放量子ダイナミクスの理論：アハラノフ・ボームリングへの応用)		
(論文内容の要旨)			
アハラノフ-ボーム (Aharonov-Bohm, AB) 効果は、ベクトルポテンシャルが量子状態の位相に影響を及ぼすことにより生じる純粋に量子力学的な現象であり、ゲージ場、量子コヒーレンス、および散逸の相互作用を検証するための基本的かつ重要なモデル系である。AB 効果は古典的な力を伴わないため、環境との結合が位相コヒーレントな量子輸送に与える影響を極めて鋭敏に反映する。このため、散逸を含む AB 系の理論的記述には、ゲージ不変性を厳密に満たすと同時に、揺動散逸定理と整合的であることが強く求められる。 従来、開放量子系の理論として広く用いられてきた Caldeira-Leggett (CL) モデルは、系と熱浴との線形結合を仮定することで散逸を記述する枠組みである。しかし、回転自由度をもつ系、特にリング状系に適用した場合、回転対称性を明示的に破ってしまうという本質的な問題を有する。その結果、角運動量分布やスペクトル構造、さらには AB 効果に由来する物理量に対して、定性的にも定量的にも不適切な予測を与える可能性がある。 本論文では、この問題を克服するため、回転不変系-熱浴 (Rotationally Invariant System-Bath, RISB) モデルに基づき、ゲージ対称性および回転対称性を同時に保存する開放量子系の理論的枠組みを構築した。具体的には、階層的運動方程式 (Hierarchical Equations of Motion, HEOM) およびその位相空間表現である Quantum Hierarchical Fokker-Planck Equation (QHFPE) を導入し、マルコフ近似に依らない非マルコフ量子ダイナミクスを統一的に記述する方法を確立した。HEOM は熱浴の二時刻相関関数に基づいて構成されるため、Gaussian 環境に対して数値的に厳密な取り扱いが可能である。 ゲージ不変なハミルトニアンから出発し、三次元 RISB 環境と結合した荷電粒子に対する $U(1)$-HEOM を導出した後、Wigner 表現への変換を行うことで $U(1)$-QHFPE を得た。この方程式はフォッカー-プランク型の形式を持ちながらも、HEOM に特有の階層構造を保持しており、熱浴の記憶効果を明示的に反映する。比較として、ゲージ拡張された CL モデルに基づく $U(1)$-QHFPE も導出し、両者の対称性の違いが物理的観測量に及ぼす影響を詳細に検討した。 さらに、本理論を一次元 AB リング系に適用し、平衡運動量分布、線形応答スペクトル、ならびに永続電流の性質を解析した。その結果、RISB モデルでは離散的な角運動量構造や磁束依存性が明確に保持される一方、CL モデルではこれらの特徴が著しく失われることを示した。また、マルコフ近似が低温領域における位相コヒーレント輸送を過度に抑制することを明らかにし、非マルコフ的取り扱いと対称性保存の重要性を定量的に示した。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、アハラノフ-ボーム効果を示す開放量子系を対象として、ゲージ対称性および回転対称性を同時に保存した非マルコフ量子力学の理論的枠組みを構築し、その物理的帰結を体系的に明らかにしたものである。特に、Rotationally Invariant System-Bath モデルに基づく $U(1)$ -HEOM および $U(1)$ -QHFPE を導出し、従来の Caldeira-Leggett 型モデルでは本質的に記述が困難であった回転自由度を伴う散逸ダイナミクスを厳密に扱える点は高く評価できる。

本研究は、ゲージ場と散逸の相互作用を対称性の観点から一貫して取り扱い、マルコフ近似の限界を明確に示した点において独創性が高い。とりわけ、非マルコフ効果が低温領域の位相コヒーレント輸送や永続電流に決定的な役割を果たすことを、理論構築と数値計算の両面から示した点は、当該分野において先駆的な成果である。

また、本論文は理論的定式化にとどまらず、具体的な AB リング系への適用を通じて、平衡分布や線形応答スペクトルといった観測可能量への影響を明確に示している。これにより、対称性保存の有無が物理的予測に直接的かつ定量的な差異をもたらすことが理解され、本研究の方法論が実在系の解析に有効であることが示された。

以上の成果は、回転対称性を有する原子・分子系やメソスコピック系における散逸量子ダイナミクスの理解を大きく前進させるものであり、今後の非平衡量子物性や量子輸送研究への波及効果も期待される。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値あるものと認める。また、令和8年1月16日、論文内容およびそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降