

論文審査の結果の要旨

氏名 蘆田 祐人

近年の原子・分子・光科学における実験的研究の急速な進展は、量子力学・統計力学の基礎的な問題にも脚光を浴びせている。本論文は、このような背景のもと、量子多体系に対する量子力学的測定あるいは外部環境の与える影響を理論的に考察したもので、7章からなる。

第1章では、序論として、本論文の研究の動機を述べるとともに、本論文で扱う量子力学的測定の議論を2つのクラスに分類している。1つは、外部環境が観測者としてはたらし、対象となる系から情報を引き出す一方で系に測定による反作用を与える、という枠組みで記述できる場合である。もう1つは、対象となる系と外部環境が強く相関するため、その相関をあらわに議論しなくてはならない場合である。以下の第2章から第4章までは前者、第5章と第6章は後者の議論にあてられている。

第2章では、観測とそれに伴う反作用の影響を論じる準備として、量子系の連続測定の理論のレビューを行っている。観測器と系が弱く結合してユニタリ時間発展を行い、観測器に対して定期的に射影的観測を行うというモデルに基づき、観測値が変化する「量子ジャンプ」の概念を導入し、量子ジャンプが起きない時間帯では非エルミート有効ハミルトニアンによって系の時間発展が記述できることを述べている。

第3章では、第2章で議論した量子ジャンプが起きない状況で連続測定によって量子多体系に引き起こされる興味深い現象の例として、1次元ボース気体における新しい非エルミート量子臨界現象を論じている。レーザー光を用いた光学格子の技術によって1次元周期ポテンシャル中のボース気体が実現されており、このような系の低エネルギー極限は朝永・ラッティンジャー流体(TLL)として記述できることが知られている。本論文では、量子ジャンプが起きない状況で連続測定の効果を含め、有効理論として非エルミートTLLを導出している。系の設定によって、この有効理論は、時間反転と空間反転を同時に行う操作に対する不変性 (PT対称性) を持つ。申請者はくりこみ群による解析を行い、PT対称な非エルミートTLLがPT対称性の自発的破れに対応する新たな量子臨界点を持つことを示した。

第4章では、1次元格子上のハードコアボース粒子の系について、各サイトにおける粒子数を連続測定するというモデルを導入し、量子ジャンプに注目した解析を行っている。格子上の粒子系については伝播速度の上限を与えるLieb-Robinson限界が知られているが、観測された量子ジャンプの回数によって事後選択を行うことにより、見かけ上Lieb-Robinson限界を超える速度で粒子が伝播する場合があるという興味深い結果が示されている。また、初期状態としてエネルギー固有状態を取った場合でも、数回の量子ジャンプの後にはエネ

ルギー分布がGibbs分布とほぼ一致し、連続測定が熱化をもたらすことが示唆されている。

第5章では、外部環境と強く相互作用する量子系の基本的な例として、よく知られた近藤問題を含む、自由フェルミオンもしくは自由ボソン環境と相互作用するスピン1/2の系を議論している。申請者は、スピン1/2と環境のエンタングルメントを解消する簡明なユニタリ変換を見出した。このユニタリ変換をほどこしたハミルトニアンは一般に厳密に解くことはできないが、これにガウシアン変分状態を適用することで高精度の計算が可能となる。実際、平衡状態での物理量については既存の手法による結果をよく再現し、さらにこれまで難しかった非平衡ダイナミクスの計算にも適用可能であることを示した。

第6章では、多粒子系の中を運動する1個の不純物粒子について考察している。このとき、不純物粒子は周囲の粒子をまとったポーラロンを形成することは物性物理において古くから認識されており、さまざまな研究が行われてきた。しかし、ポーラロンの「雲」（不純物にまとわれた粒子）を直接観測することは困難だった。申請者は、冷却原子気体を用いて磁気ポーラロンを実現し、またポーラロンの「雲」を実験的に観測する方法を提案している。

第7章では全体のまとめが行われ、今後の展望が述べられている。

以上のように、本論文では、量子力学的な測定による反作用に起因する多くの興味深い効果を見出した。また、近藤効果がそうであるように、少数自由度の系であっても環境と強く結合している場合には環境を含めた多体問題となる。本論文では、このような系についても、新しい強力な計算手法の開発も含め大きな進展をもたらしている。なお、本論文は上田正仁氏、Eugene Demler氏他との10編の共著論文に基づいているが、本人の寄与は主体的で十分であると認められる。よって、論文審査委員会は全員一致で博士（理学）の学位授与が適当であると結論した。