

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	山本 和樹
論文題目	Nonequilibrium quantum many-body physics in ultracold atoms subject to dissipation (冷却原子系における散逸を伴う非平衡量子多体物理)		
(論文内容の要旨)			
<p>冷却原子系に関する研究の急速な進歩により、単一原子測定、散逸の制御、物理パラメータの制御が可能になっている。測定によって量子系の情報を取り出す場合、観測者は環境としての役割を果たし、その反作用は系の量子状態の変化を引き起こす。特に、冷却原子の物理を極限分解能で扱う場合、系の計測による反作用が顕著になる。このような背景から、近年、粒子ロス、dephasing、測定の反作用などを利用した多くの研究が行われ、散逸が量子開放系における新奇な非平衡現象を実現することが理論的にも実験的にも報告されている。一方で、このような豊かな物理現象をもたらす多体効果は、散逸の存在する非平衡量子系ではまだ完全には理解されていない。</p> <p>このような背景の下、山本氏は本学位論文で散逸を伴う冷却原子系における量子多体現象を研究した。まず、フェルミオン間の非弾性散乱から生じる複素係数相互作用を持つ非エルミートBCSハミルトニアンに対して平均場理論を構築し、従来の BCS 理論とは異なる非エルミートギャップ方程式を得た。その結果、散逸の大きさがある閾値をこえるとリエントラント超流動が起こることを明らかにした。この研究をさらに拡張し、量子ジャンプの効果を取り込んだ量子マスター方程式を用いて、粒子ロスを印加した後の冷却フェルミ原子系の集団励起を理論的に解析した。特に、散逸の下で超流動秩序変数がどのような変更を受けるかについて、引力ハバード模型を用いて明らかにした。具体的には、開放系では超流動のU(1)位相が散逸によって回転し、角速度が時間とともに速くなっていく(chirping)ことを明らかにした。その結果、散逸効果が一方にだけ入ったジョセフソン接合を導入すると、散逸が弱いとき、U(1)位相の違いに起因したac + dc型のジョセフソンカレントが流れ、レグットモードが誘起されることを示した。一方、散逸が強くなると、ジョセフソンカレントのdc成分が0になり非平衡量子相転移が起こることを明らかにした。</p> <p>さらに凝縮系物理で広く調べられてきた非相反現象に研究を展開した。この現象は系が熱浴とエネルギーや電子をやり取りする過程で発現するという点で、ある種の開放系における非平衡現象ともみなせる。しかし、量子開放系の観点から行われている研究の多くは系の端に熱浴を接触させた非一様な散逸を扱っており、系全体にかけられた一様な散逸がどのように物質の非相反現象を発現し得るかは調べられていない。この背景の下、山本氏は並進対称な一様散逸下におけるフェルミ多粒子系の非平衡定常状態を量子マスター方程式で解析し、粒子輸送が起こる条件を明らかにした。まず、非相反的な散逸に対して整流効果が起こるための条件を明らかにした。さらに、相反的な散逸の場合、系の時間反転対称性と空間反転対称性を破れば、非平衡定常状態において任意の強さの散逸に対して大きな整流効果が見られることを示した。</p> <p>最後に一次元量子多体系に注目した。一次元非エルミート量子多体系において、散逸は量子多体現象の臨界的性質を本質的に変えることが知られているが、一次元非エルミート量子多体系の普遍的性質は未だ明らかになっていない。そこで、非エルミートXXZスピン鎖について、散逸下での普遍的性質を明らかにした。具体的には、ボゾン化法、厳密解、共形場理論を用いて相関関数とエネルギースペクトルを解析し、非エルミートXXZスピン鎖が複素数の朝永Luttingerパラメータによって特徴付けられるc=1共形場理論のクラスに属することを明らかにした。この解析的結果の正しさを密度行列繰り込み群による数値計算でも確認した。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

近年の実験技術の進展により、非平衡量子現象は凝縮系物理学における重要な研究テーマとなっている。このような非平衡量子系は、その理論的取扱いが難しい一方で新奇な量子現象を生み出す格好の舞台となっている。特に冷却原子系においては、単一原子測定や物理パラメータの制御が可能になっている。このような冷却原子系で実験を行う場合、系の計測による反作用の効果が重要であり、近年、粒子ロス、dephasingなどに関する研究が精力的に行われている。一方で、散逸効果を含む非平衡開放系において、粒子間相互作用に起因する量子多体効果の研究はこれまであまりなされていなかった。

本学位論文は、散逸を含む開放量子系、特に非エルミート量子多体系の新奇な量子現象に関する研究成果をまとめたものである。まず第1章で冷却原子を中心として開放量子多体系に関する研究の進展についてふれたあと、本研究で用いる理論手法についてまとめている。第2章以降で以下に述べる研究成果をまとめている。

第2章では、複素係数相互作用を持つ非エルミートBCSハミルトニアンに対して平均場理論を構築し、非エルミート性によって生じる種々の量子現象を明らかにしている。中でも、この定式化を用いて散逸の大きさに誘起されたリエントラント超流動が起こることを明らかにした点は重要な結果である。

第3章では、この研究をさらに拡張し、量子マスター方程式を数値的に解くことによって、粒子ロスが系に印加された後の冷却フェルミ原子系の集団励起を調べている。特に、引力ハバード模型を用いて、超流動が二体ロスによる散逸でどのような影響を受けるか解明している：超流動の位相が散逸によって回転し、角速度が時間とともに速くなっていくchirping現象を見出しており、これを観測するためのジョセフソン接合を提案している。その結果、散逸の大きさを強くしていったときにジョセフソンカレントのdc成分が有限からゼロになる非平衡量子相転移が起こることを見出している。

第4章では、開放量子多体系における非相反現象を研究している。この現象は開放系における非平衡現象ともみなせる。これまで行われてきた多くの研究は系の端に熱浴を接触させた非一様な散逸を扱っており、系全体にわたる一様な散逸がどのような非相反現象を誘発するかは明らかでなかった。山本氏は一様な散逸下におけるフェルミ多体系を量子マスター方程式で解析することで、①非相反的な散逸に対して整流効果が起こるための条件を明らかにし、②相反的な散逸の場合、系の時間反転対称性と空間反転対称性を破れば大きな整流効果が見られることを示している。

第5章では、一次元量子多体系における非エルミート効果を調べている。具体的には、1次元非エルミートXXZスピン模型を取り上げ、ボゾン化法、厳密解、共形場理論、密度行列繰り込み群を用いることで、散逸下での一次元量子多体系の普遍的性質を明らかにしている。特に、これらの普遍的現象が $c=1$ 共形場理論を複素パラメータに拡張したクラスに属することを明らかにしている。

以上の結果は、散逸量子多体系における非自明な性質に関して新たな知見をもたらすものである。特に、散逸を含む量子多体系において新奇な現象を理論的に予言した点は新しく、凝縮系物理における非平衡量子現象の研究において重要な意義を持つ。本研究で明らかにされた現象や概念は、今後、非平衡量子現象を解明するうえでも重要な礎となるものである。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月13日、論文内容と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