

高知大学学位授与記録

本学は、次の者に博士（理学）の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）第8条の規定に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

目 次

学位記番号	氏名	学位論文の題目	ページ
甲総科博第52号	越智 一成	Low-energy physics of a quantum vortex in Bose superfluid and the polaron problem (ボース超流動体中の量子渦における低エネルギー物理とポーラン問題)	1

ふりがな	おち かずなり
氏名(本籍)	越智 一成(愛媛県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第52号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位授与年月日	令和7年9月19日
学位論文題目	ボース超流動体中の量子渦における低エネルギー物理とポーラロン問題
発表誌名	○ Kelvon–Bogoliubov–phonon interaction dynamics in a superfluid quantum vortex, Kazunari Ochi, Junichi Takahashi, and Eiji Nakano, Physical Review A, 111 , 023302 (2025).
審査委員	
主査 教授 加藤 治一	
副査 教授 飯田 圭	
副査 教授 仲野 英司	

論文の内容の要旨

ある種の気体や液体などの媒質に導入されたミクロな不純物粒子は、媒質との相互作用により、その性質（エネルギーや質量など）を真空中に比べて変化させる。このように媒質によって性質が変化した不純物粒子をポーラロンと呼ぶ。近年、媒質に一様ボース超流動体を採用したポーラロン問題が国内外の多くの研究機関で理論・実験を問わずに精力的に研究されている。一般にボース超流動体の有効自由度として Bogoliubov フォノン（以下 B. フォノン）が存在し、不純物粒子がそれらと相互作用することでその性質が変化する。一方、閉じた空間にトラップされた非一様ボース超流動体を回転させると量子渦が出現する。量子渦は、例えば、鳴門の渦潮の量子版であり、量子性がマクロに発現する特異な現象である。本研究では、媒質として新たに量子渦が存在する非一様なボース超流動体を提案し、その中に不純物粒子を導入した場合の新規のポーラロンの性質を量子論の手法を用いて解明することを目的とする。本論文は2部構成となっている：

第1部では、ポーラロン問題を扱う前に、量子渦に特有の有効自由度であるケルボンと、一様系と共に存在する B. フォノンの性質、および、それらの相互作用ダイナミクスを明らかにする。本研究では、特に B. フォノン放出によるケルボンの崩壊寿命を、BdG 理論による摂動論を用いて数値的に評価し、先行研究の数値シミュレーションと比較した。その結果、寿命に2倍程度の違いが示された。この違いはボース超流動体に関するトラップ形状と境界条件の違いに起因する。先行研究と比較して、本研究の手法は崩壊プロセスを微視的に明示できる優位性を持つ。

第2部では、第1部で得られた結果を用いて、量子渦（直線的渦糸）のある超流動体に不純物粒子を導入した場合のポーラロン問題を取り組む。この系の不純物粒子は渦糸中心付近にトラップされ、周りの素励起（ケルボンや B. フォノン）と相互作用することでポーラロンとなる。本研究では、特にポーラロンのエネルギー・スペクトルを数値計算によって評価する。ポーラロンのエネルギーは、一様系においては運動量のみの関数となるのに対して、量子渦系においては渦糸方向の運動量と角運動量の関数となる。特に基底エネルギーは有効質量（運動エネルギーの2次係数）によって特徴づけられるが、解析の結果、ポーラロンの渦糸に沿った運動が素励起との相互作用によって抑制されることで、有効質量が増大することを示した。更に、ポーラロンに纏わりついている素励起の角運動量への寄与を調べると、量子渦と同じ回転方向（角運動量）を持つ素励起に比べて、逆回転の素励起、特にケルボンがより多く励起されることを示した。この結果は、量子渦の存在が素励起の角運動量の縮退分裂させることに起因する。

本研究では、ポーラロン問題を取り組むために、先ず、これまで十分に解明されてこなかった量子渦における有効自由度であるケルボンと B. フォノンの相互作用によるダイナミクスを、微視的摂動論を用いて初めて明らかにした。更に、この結果を応用し、媒質として新たに量子渦を有する非一様なボース超流動体を提案した上で、その中に不純物粒子を導入した場合の新規のポーラロンの性質を、量子論の手法を用いて初めて明らかにした。

論文審査の結果の要旨

近年冷却アルカリ原子を用いた量子多体系の研究が理論、実験を問わず盛んである。最近では特にボース・ポーラロンの研究が発展している。ボース原子気体を冷却して生成される超流動体に不純物原子を導入すると、周りの超流動フォノンと相互作用することで不純物原子が変化し、ボース・ポーラロンが形成される。ボース・ポーラロンに関するこれまでの理論研究は、専ら一様なボース超流動体に限られていた。本研究では、量子渦糸を有する非一様なボース超流動体におけるボース・ポーラロンの問題を取り組み、その成果を本論文にまとめた。本論文は2部構成になっており、第1部ではポーラロン問題を取り組むための基礎研究として、量子渦を有するボース超流動体の低エネルギー有効理論を構築し、素励起間相互作用ダイナミクスの解明に取り組んだ。第2部では、第1部の結果を基に、量子渦糸が存在する場合のボース・ポーラロンの新規の問題に取り組んだ。本研究において得られた成果の骨子は以下の2点である。

第1部) ボース・ポーラロンの性質は主に素励起-不純物原子間相互作用によって決定されるため、先ず有効自由度である素励起を記述することが重要である。量子渦糸が存在すると、超流動フォノンに加えて並進対称性の破れに起因するケルボンが素励起として現れる。本研究では Bogoliubov-de Gennes 理論に基づき、これらの素励起を含む有効理論を構築し、フォノン放出によるケルボン崩壊過程の計算を行った。既存の実験およびシミュレーションと同様の設定において、ケルボン崩壊寿命を初めて微視的理論から定量的に再現した。

第2部) 次に量子渦糸を含む超流動体の平均場における不純物原子のエネルギー準位と固有関数を算出し、第1部) で得られた素励起の有効理論と融合することで、量子渦糸が存在する場合の不純物原子の有効理論を構築した。これを基に1ループ再加算による自己エネルギーから自己無撞着にボース・ポーラロンの基底エネルギーを求め、有効質量および角運動量ごとの運動量・エネルギー分散関係を得た。これらの結果は、超流動ヘリウムや中性子星内殻における量子渦のピン止め効果とも関連しており、将来、実験観測との比較が期待される。

上記の第1部の内容は原著論文として審査付き国際学術誌1編（うち筆頭著者論文1編）に掲載されている。第1部と第2部を合わせた内容は、第6回日米物理学会合同核物理分科会（口頭発表、2023年、ハワイ）およびThe 28th International Conference on Atomic Physics（ポスター発表、2024年、ロンドン）の国際会議2件、国内研究会2件（口頭発表）、および日本物理学会2件（口頭発表）においてそれぞれ発表された。本研究内容に関して「2024年度笹川科学研究奨励賞」を受賞した。

以上のことから、本研究は量子渦糸をボース超流動体に導入することで冷却原子ポーラロンに関する新しい研究の方向を開拓し、量子渦のトポロジカル数を反映した新規のボース・ポーラロンに関する重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の越智一成は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。