

超流動量子渦に閉じこめられた不純物粒子の

ポーラロンドダイナミクス

高知大学総合人間自然科学研究科応用自然科学専攻 博士後期課程 3 年（助成時）

同上 博士後期課程 3 年（現 在）

越智 一成

1. 研究の背景と目的

媒質中に印加された異種原子（不純物原子）は、媒質を構成する粒子との相互作用により、その性質が真空中に比べて変化することが知られている。この不純物原子の状態は、不純物原子と媒質間の相互作用により素励起を纏った状態（ポーラロン状態）として記述される。近年、冷却原子系（原子気体を電場、磁場によりトラップし、原子の微細構造を利用して自

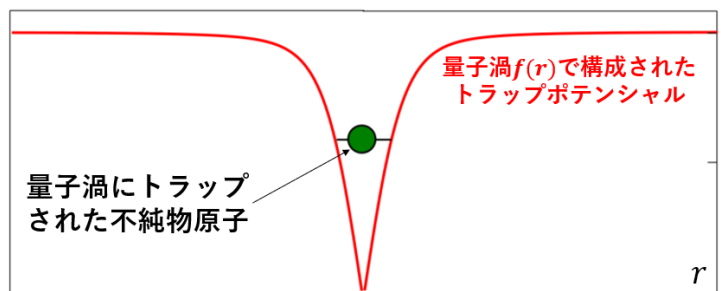


図 1. 量子渦構造にトラップされた不純物原子の概念図。

在に制御可能な実験系)における原子の制御技術の発展に伴い、精力的にその性質が調べられてきた。これに伴い理論でも一様系やトラップ系において、ポーラロンの基底状態の性質や励起状態におけるダイナミクスが解明されてきた[1]。一方、不純物原子が物理現象の主要な役割を担う物理系は多様である。その一つとして回転と非一様な空間構造を有した特異な真空状態である量子渦状態が挙げられる（古典対応物としては鳴門の渦が挙げられる。）。量子渦中の不純物問題は、中性子星のグリッチ（天体の特異な自転現象）を説明する前駆状態[2]や、ヘリウム中の量子渦の可視化のためのプローブ[3]などに関連している。冷却原子系においても量子渦状態が実現しており[4]、不純物原子を導入すれば、より操作性に富んだ状況下で、その性質を観測量から調査できると考えている。そこで本研究では、媒質として軸対称な量子渦を伴うボース超流動体を考え、その渦の中心付近にトラップされた不純物原子（図 1）のポーラロンとしての性質を明らかにすることを目的とした。

2. 研究結果

本研究では、ポーラロン状態を構成する不純物原子と素励起のエネルギーと波動関数を用いて、変分法によりポーラロンエネルギーを求めた。まずは渦中の不純物原子と素励起について紹介する。

・量子渦中の不純物原子と素励起

図2に角運動量 $m = 0$ を持つ基底状態の不純物原子(赤)と角運動量 $m' = -1$ を持つ素励起(青と緑)の動径波動関数を示す。これらの波動関数は渦の中心付近(図1参照)にトラップされていることが分かる。 $m' = -1$ を持つ素励起はケルビンモードと呼ばれ、渦糸特有の低エネルギー励起であり、渦糸に沿って伝播するヘリカルモードである[5]。素励起は渦度の影響を受け、ケルビンモードはそれを打ち消す角運動量を持つため原点に局在している。不純物原子はこれを含む素励起と相互作用してポーラロン状態を構成する。

・ポーラロン基底状態と励起状態

図3に変分法で求めた角運動量ごとのポーロンエネルギー(実線)を示す。破線は不純物原子のエネルギーであり、素励起の寄与によりエネルギーは抑えられる。 $m = 0$ が基底状態であり、 $|m| > 0$ は有限の寿命で素励起を放出して不純物原子に崩壊する励起ポーロンである。主な結果は、ポーロンエネルギーの角運動量縮退の分裂が挙げられる。不純物原子のエネルギーは $\pm m$ の縮退があるが、ポーロンは、ケルビンモードなどの角運動量縮退の解けた素励起を纏うことで、ポーロン角運動量の縮退が解かれる。これは図3の内挿図に示すポーロンエネルギー差から見て取れる。この結果は、不純物原子のみの解析では得られない量子渦中のポーロン特有の結果である。

3. まとめ

本研究では量子渦にトラップされたポーロンの基底状態と励起状態の性質を変分法により示した。このために渦の非一様性を正確に考慮し、渦中心にトラップされた不純物原子と素励起の寄与を取り入れた。不純物原子には平均場と素励起を通して渦の性質が反映され、量子効果によってエネルギー準位の縮退が解けることを示した。

- [1] F. Scazza, *et al.*, *Atoms* 10, 55 (2022).
- [2] P. W. Anderson and N. Itoh, *Nature*, 226, 25 (1975).
- [3] G. P. Bewley *et al.*, *Nature* 441, 588 (2006).
- [4] K. W. Madison, *et al.*, *Phys. Rev Lett.* **84**, 806 (2000).
- [5] K. Ochi, *et al.*, *Phys. Rev A.* **111**, 023302 (2025).

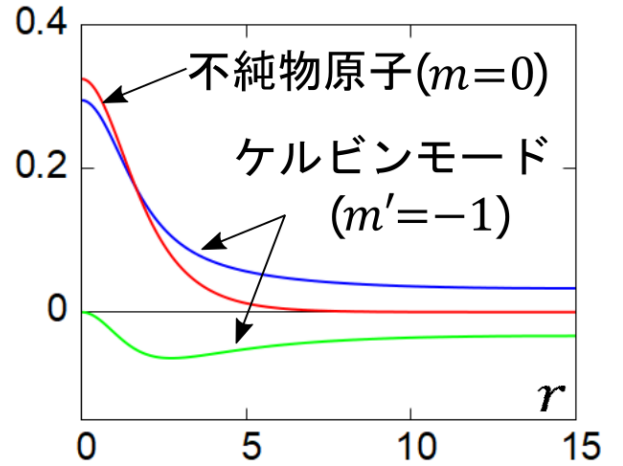


図2. 不純物原子とケルビンモードの動径波動関数。

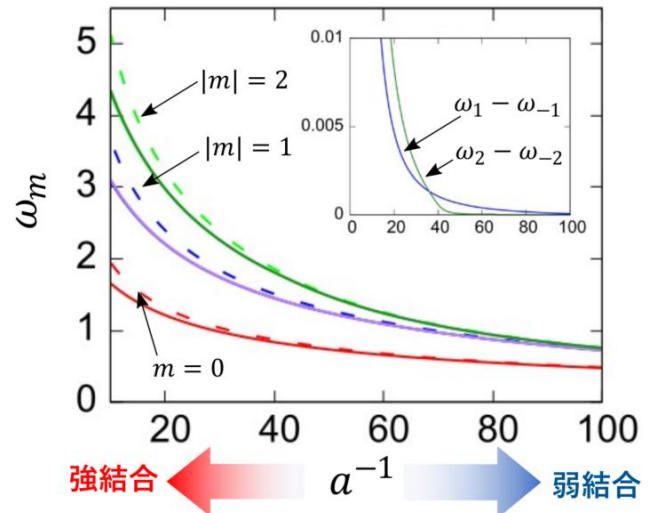


図3. ポーロンエネルギー(ω_m)の不純物—ボソン間相互作用(a^{-1})依存性。