

課題名 (タイトル) :

超流動ヘリウム 3 におけるマヨラナ粒子の理論研究

利用者氏名 : ○堤 康雅

所属 : 和光研究所 古崎物性理論研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

超流動ヘリウム 3 はトポロジカル超流動体であり、トポロジカルにトリビアルな表面との境界でトポロジカル相転移によりアンドレーフ束縛状態が形成される。また、ハミルトニアンが粒子-ホール対称性を持つため、表面に局在した準粒子が生成と消滅の演算子が等しいマヨラナフェルミオンとして振る舞う。

超流動ヘリウム 3 では A 相と B 相の 2 つの相が安定となるが、A 相はカイラル超流動状態、B 相はヘリカル超流動状態に分類されトポロジカルな性質が異なっている。A 相ではカイラリティが異なる状態が縮退しており、それらはトポロジカル数の符号の違いとして特徴付けられる。そのため、異なるカイラリティのドメインの境界ではトポロジカル相転移が起こり、マヨラナフェルミオンが局在している可能性がある。

また、超流動ヘリウム 3-B 相と等しいトポロジエを持つギャップ関数は、重い電子系超伝導体である UPt_3 でも実現している。そのため、 UPt_3 の表面でもトポロジカル相転移が起こり、マヨラナフェルミオンが局在していると考えられる。

2. 具体的な利用内容、計算方法

まずは準古典 Eilenberger 理論により、ドメイン境界または表面を含む系の準古典グリーン関数と秩序変数を自己無撞着に求める。得られた準古典グリーン関数の松原周波数を実エネルギーに解析接続することで、準粒子状態を導くことができ、アンドレーフ束縛状態の性質、マヨラナフェルミオンの有無を議論することができる。この計算は、Runge-Kutta 法により Riccati 形式の微分方程式を解くことで実行した。この際、

OpenMP による並列化を行い計算時間の短縮を図った。

3. 結果

超流動ヘリウム 3-A 相のカイラルドメイン境界の束縛状態は質量を運んでいることが明らかとなった。ただし、束縛状態の準粒子はマヨラナフェルミオンではなく、質量流の方向は A 相表面とは逆向きとなる。

一方で、 UPt_3 の表面にはマヨラナフェルミオンが局在しており、ギャップレスな線形分散を持つことを明らかにした。この分散は特定方向の磁場に対してのみギャップを開く性質を持ち、実験での観測が期待できる。

4. まとめ

超流動ヘリウム 3-A 相のカイラルドメイン境界と UPt_3 の表面について準粒子束縛状態を調べた。準古典 Eilenberger 理論により、準古典グリーン関数と秩序変数を自己無撞着に決定し、得られた準古典グリーン関数を用いて準粒子状態を求めた。その結果、A 相境界にはマヨラナフェルミオンは存在しないが、 UPt_3 表面にはマヨラナフェルミオンが存在することを明らかにした。この研究によりマヨラナフェルミオンの存在条件を絞り込めたと言える。

5. 今後の計画・展望

超流動ヘリウム 3-A 相のカイラルドメイン境界の質量流の向きはドメイン間の位相差で決まる。この位相差を最適化することで、質量を流さないカイラルドメインの安定性を調べ、準粒子状態を明らかにしたい。

平成 25 年度 RICC 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

Y. Tsutsumi, M. Ishikawa, T. Kawakami, T. Mizushima, M. Sato, M. Ichioka, and K. Machida, “UPt₃ as a Topological Crystalline Superconductor”, *Journal of the Physical Society of Japan* **82**, 113707 (2013).

【国際会議などの予稿集、proceeding】

Yasumasa Tsutsumi, “Mass Current at a Domain Wall in Superfluid ³He A-Phase”, *Journal of Low Temperature Physics*, Online First.

【国際会議、学会などでの口頭発表】

Yasumasa Tsutsumi, “Topological mass current on a domain wall in superfluid ³He A-phase”, APS March Meeting 2014, Mar. 2014, Denver, USA.

堤康雅, 「超流動ヘリウム 3-A 相のカイラルドメインにおける質量流」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月, 東海大学.