

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 基幹研究所 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。このため、A 相と B 相の境界でもトポロジカル相転移によるアンドレーフ束縛状態が形成され、マヨラナフェルミオンが局在している可能性がある。しかし、A 相と B 相は安定な温度-圧力領域が異なるため、A 相と B 相のドメインを実験的に制御することは難しい。

A 相と B 相の境界は B 相の量子渦である A-phase-core vortex の周りでは安定している。この量子渦は渦芯が A 相成分で埋められているため A 相と B 相の境界が存在する。

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、A-phase-core vortex 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

A-phase-core vortex の周りでは、アンドレーフ束縛状態として超流動ギャップ内に 2 本のブランチが存在することが明らかとなった。これらはフェルミエネルギーを横切っており、A 相の北極と南極のポイントノードを繋ぐフェルミアークを形成していることも明らかになった。しかし、局在している準粒子はマヨラナフェルミオンとしての性質は持っていない。

4. まとめ

カイラル超流動体である超流動ヘリウム 3-A 相とヘリカル超流動体である B 相の境界でのトポロジカル相転移に注目し、A-phase-core vortex 周りの準粒子状態を調べた。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-phase-core vortex 周りに 2 本のブランチとしてアンドレーフ束縛状態が存在し、フェルミアークを形成していることが明らかとなった。しかし、局在している準粒子はマヨラナフェルミオンとしての性質は有していない。

5. 今後の計画・展望

B 相では double-core vortex と呼ばれる量子渦も安定することが知られている。この量子渦は渦芯が B 相とはトポロジカルに異なる性質を持つ planar 相で埋められている。今後は double-core vortex 周りの planar 相と B 相の間のトポロジカル相転移を研究し、マヨラナフェルミオンの有無を明らかにする計画である。

平成 24 年度 RICC 利用報告書

平成 24 年度 RICC 利用研究成果リスト

【国際会議、学会などでの口頭発表】

Yasumasa Tsutsumi, “Topological current at an interface between superfluid ^3He A- and B-phases”,
APS March Meeting 2013, Mar. 2013, Baltimore, USA.

堤康雅, 川上拓人, 町田一成, 「円筒容器中の超流動ヘリウム 3 **-B** 相における準粒子状態」,
日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月, 横浜国立大学.

堤康雅, 石川昌樹, 川上拓人, 市岡優典, 町田一成, 「トポロジカル超伝導体としての UPt_3 」,
日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月, 広島大学.