

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 : 本所 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、位相欠陥にトポロジカル励起が存在することが知られている。これまでに表面でのトポロジカル励起についてはよく研究されてきており、ギャップレス励起が表面状態として存在することが分かっている。このギャップレス励起は生成と消滅の演算子が等しいマヨラナフェルミオンであり、系の対称性を破らない摂動に対して安定に存在できる。

トポロジカル励起は位相欠陥である量子渦にも束縛されている。トポロジカル励起を研究する上で超流動ヘリウム 3-B 相の量子渦は興味深い。超流動ヘリウム 3-B 相では空間対称性の有無により分類される多様な量子渦が形成されるので、量子渦の種類によりトポロジカル励起の性質が異なると考えられる。本課題では、超流動ヘリウム 3-B 相の量子渦に束縛されたトポロジカル励起と空間対称性の関係を明らかにすることで、マヨラナフェルミオンが束縛された量子渦を同定することを目的とする。

2. 具体的な利用内容、計算方法

まずは準古典 Eilenberger 方程式を解くことで、超流動ヘリウム 3-B 相の量子渦周りの秩序変数を準古典グリーン関数と自己無撞着に求める。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、MPI を用いた並列化を行い計算時間の短縮を図った。得られた秩序変数を用いた固有値方程式である Bogoliubov-de Gennes 方程式を解き、量子渦に束縛された準粒子の励起スペクトルを導出した。

3. 結果

超流動ヘリウム 3-B 相の量子渦でマヨラナフェルミオンが束縛されているのは、 P_3 と呼ばれる二回回転と時間反転の同時操作に対する対称性を持つ、 o vortex と w vortex と呼ばれる量子渦であることが明らかになった。 P_3 対称性のある量子渦にマヨラナフェルミオンが安定に存在することは、トポロジカル数の計算からも導くことができる。

o vortex と w vortex は自由エネルギーの損失が大きいため、バルクの超流動ヘリウム 3-B 相では実現されないと考えられている。しかし、 P_3 対称性を破らないように磁場をかけ、容器による閉じ込めを行うことで、対称性に守られたマヨラナフェルミオンが束縛された量子渦を生成できる。

4. まとめ

超流動ヘリウム 3-B 相の量子渦に束縛されたトポロジカル励起のスペクトルを準古典 Eilenberger 方程式と Bogoliubov-de Gennes 方程式を数値的に解くことで導出した。その結果、 o vortex と w vortex に P_3 対称性に守られたマヨラナフェルミオンが存在することが明らかになった。これらの量子渦はバルクの超流動ヘリウム 3-B 相では実現しないが、実験条件を整えることで生成することができる。

5. 今後の計画・展望

超流動ヘリウム 3-B 相でマヨラナフェルミオンの束縛された量子渦を生成できることを明らかにしたので、マヨラナフェルミオンが NMR 等の実験でどのように観測されるかを研究したい。

平成 26 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】

Y. Tsutsumi, T. Kawakami, K. Shiozaki, M. Sato, and K. Machida, “Topological vortex bound state in superfluid ^3He B-phase”, The 27th International Conference on Low Temperature physics (LT27), Aug. 2014, Buenos Aires, Argentina.

Y. Tsutsumi, T. Kawakami, K. Shiozaki, M. Sato, and K. Machida, “Topological vortex bound state in superfluid ^3He B-phase”, International Conference on Topological Quantum Phenomena, Dec. 2014, Kyoto, Japan.

堤康雅, 川上拓人, 塩崎謙, 佐藤昌利, 町田一成, 「超流動ヘリウム3-B相の量子渦束縛状態とトポロジー」, 物性研短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」, 2014年4月, 東大物性研.

堤康雅, 川上拓人, 塩崎謙, 佐藤昌利, 町田一成, 「超流動ヘリウム3-B相の量子渦束縛状態とトポロジー」, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月, 中部大学.