

## 「スピン三重項超流動体の新奇界面現象」の最近のトピックス

石川 修六 / 大阪市立大学 大学院 理学研究科 教授

B01 班では、スピン三重項超流動体である超流動  $^3\text{He}$  を主な研究対象とし、液体界面での新奇現象や秩序変数の制御により発現する現象の探索と物理的解釈、また同じスピン三重項状態であるカイラル超伝導物質で起こる現象との類似性・普遍性の探求、さらにボース-アインシュタイン凝縮状態や冷却原子系の研究を通して、トポロジカル量子現象の研究を進めている。以下に今年度に得られたトピックスをまとめた。

### 1. 平行平板中の超流動 $^3\text{He}$ -A 相での半整数量子渦

超流動  $^3\text{He}$ -A 相のクーパ対は軌道角運動量  $l$  の大きさであり、エネルギーギャップの異方性（両極にノードを持つ）が本質的にあるために、超流動  $^4\text{He}$  とは異なり多くの渦構造が提案されてきた。バルク液体では多くの渦構造が、核磁気共鳴法（NMR）を用いて確認されてきた。渦部分でのスピン波励起が特徴的な共鳴周波数を示すことを利用した同定である。

未だに存在が確認されていない渦の1つに“半整数量子渦”と呼ばれるものがある。半整数量子渦は、軌道空間とスピン空間の双方の空間において、渦の周りでの位相回転が  $\pi$  で、全体では足し合わされて位相回転が  $2\pi$  となっている渦のことであり、カイラル超流動状態特有の構造である。バルク液体で観測された渦では、渦の周りでの軌道部分の位相回転が  $2\pi$ （あるいは  $2\pi$  の整数倍）となる渦であることとは対照的に、 $2\pi$  の半整数倍であることから、このように呼ばれる。これは A 相を記述する理論モデルである Anderson-Brinkman-Morel (ABM) 状態では、双極子相互作用を無視すると軌道自由度とスピン自由度が独立になっているために起こりうる。

高木は、このような渦状態が実現できたとして、計算機シミュレーションにより、NMR 実験での共鳴周波数の計算を行った。双極子コヒーレンス長（10  $\mu\text{m}$ ）程度の間隔を持つ平行平板間に超流動  $^3\text{He}$ -A 相を入れて、平行平板に垂直方向の磁場を掛けて双極子相互作用による配向の効果を除くことが出来るテクスチャー構造を作り、系を回転して半整数渦を設定した。この系での特徴的なスケールは、双極子相互作用が効かないために渦芯の特異領域長（GL コヒーレンス長）と渦間隔となる。この系の NMR 共鳴振動

数を考察すると、渦芯付近は  $d$ -ベクトルの特異性のために磁気共鳴的に“硬い”領域が発生する。この領域はおおよそ双極子コヒーレンス長であり、磁気共鳴には参加しない。このため、バルク full negative shift ( $R_l^2 = -1$ ) の共鳴振動数は、この領域の摂動を受け Larmor 振動数側に移動する。この効果を計算したものが図 1 であり、横軸は渦間距離を表す。ここで、pair vortex とは、半整数渦が対を作っている状態を考えたものである。

また、中原は、半整数量子渦の安定性に関する理論計算を行った。自由エネルギーの計算を磁場と圧力をパラメータにして行い、半整数渦の安定存在領域は、比較的高磁場下であるとの結論を得た。石川は、実験で半整数量子渦の検出を目指すために新たな NMR 測定法を開発した。

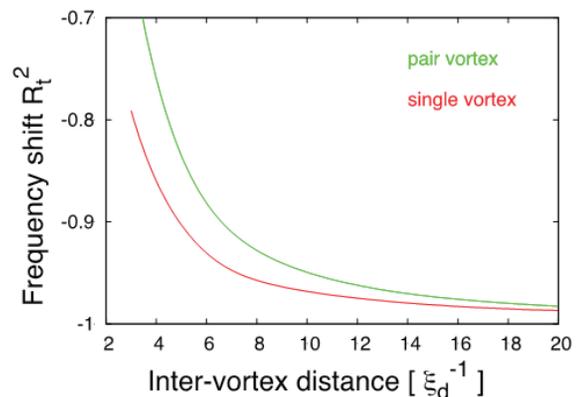


図 1：磁気共鳴周波数の半整数渦間距離依存性

## 2. $^3\text{He}$ 奇周波数クーパー対による増強パウリ常磁性

超流動 $^3\text{He}$ とエアロジェルの境界面には、スピン三重項s波の対称性をもつ奇周波数クーパー対が形成されることが予想されている。石川等はエアロジェル境界面付近のNMR測定（圧力24bar）より図2に

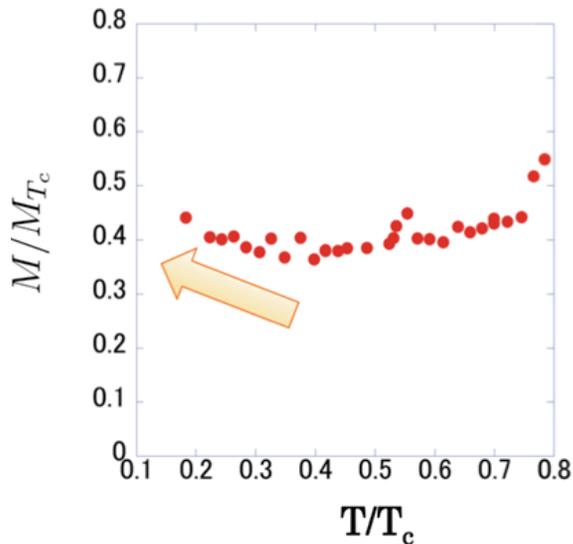


図2：エアロジェル界面近傍の磁化の温度変化

示すような非常に低温での磁化の増大を観測した。

東谷等は、この近接構造の局所スピン帯磁率が境界付近で増大することを見だし、この現象が奇周波数クーパー対の形成に由来していることを明らかにした[1]。境界面近傍の局所スピン帯磁率を積分した量（界面帯磁率）の温度変化を図3に示した。奇周波数クーパー対が低温の急激な温度変化を生み出している。図2に示した温度変化は理論計算結果と同様な振る舞いであり東谷等が指摘する奇周波数クーパー対の出現に起因する現象であることを示唆するものである。

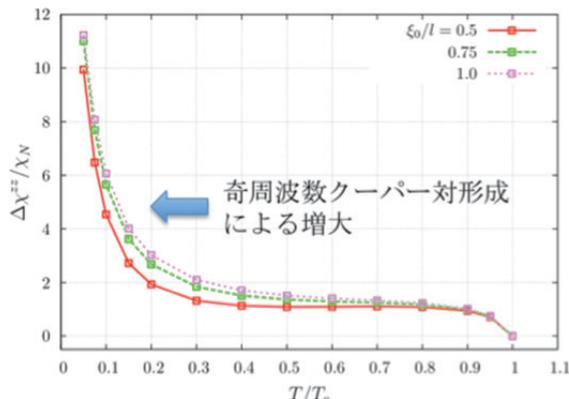


図3：界面帯磁率の温度変化

## 3. 超流動 $^3\text{He}$ -B相の表面マヨラナ状態に対する磁気効果

超流動 $^3\text{He}$ -B相は時間反転対称性を持ったトポロジカル超流体であると理論的に分類されている。野村等の行ってきたゼロ磁場下での横波音響インピーダンス測定により、壁の鏡面度が大きいときに運動量に線形な分散関係（マヨラナコーン）を持った表面束縛状態の存在が示され、B相が確かにバルク - エッジ対応を示すトポロジカル超流体であると実験的に明らかになった。磁場下でのB相では、時間反転対称性によって守られていた表面マヨラナゼロモードが、トポロジカル相転移により消失すると期待される。

野村らは最近、磁場中での超流動 $^3\text{He}$ -B相の横波音響インピーダンス測定に成功した。壁の境界条件は鏡面度が小さい拡散的散乱の極限での測定である。ゼロ磁場での温度依存性に表れたインピーダンスの虚部のピーク構造が、0.1 Tの磁場下では消失することが分った。このピーク構造は、拡散的散乱極限での表面状態密度の特徴を反映した対励起に起因することが分っている。磁場中でのピークの消失は、ギャップエネルギーが磁場により歪むことにより、対励起に起因する効果がぼやけたためと考えられる。磁場中での横波音響インピーダンスの理論的研究はまだ成されていないが、理論との比較が可能になればトポロジカル相転移の効果の有無も明らかになると期待できる。

### 参考文献

- [1] "Magnetic Response of Odd-Frequency s-Wave Cooper Pairs in a Superfluid Proximity System" S. Higashitani, H. Takeuchi, S. Matsuo, Y. Nagato, and K. Nagai, Phys. Rev. Lett. **110**, 175301 (2013).