

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	笠井 純
論文題目	超流動 $^3\text{He-A}$ におけるカイラルドメイン構造の可視化		
(論文内容の要旨)			
<p>超流動ヘリウム3のA相は、超流動原子対の公転運動が一方向になるために時間反転対称性を破るカイラル超流動状態にあると知られている。笠井氏は、超低温磁気共鳴映像法を発展させた超低温磁気共鳴分光映像法の開発に成功し、超流動ヘリウム3の巨視的波動関数の実空間変化を可視化することに世界で初めて成功した。100ミクロン厚の薄板状の空間に閉じ込めた液体ヘリウム3を2ミリケルビンに冷やすことで生成した超流動ヘリウム3のA相について、同映像法を用いる巨視的波動関数の実空間変化測定を行い、理論的に予想されていたほぼ空間均一な巨視的波動関数ではなく、局所的に空間変化する構造を含む特殊な巨視的波動関数により記述される状態が頻繁に生成することを発見した。この構造を詳しく調べることにより、原子対の軌道角運動量が揃い、すなわちカイラリティの揃った、巨視的な大きさのドメインが複数個並接して共存する、カイラルドメイン構造であることを解明した。このように並接するドメイン間を接続する局所的な面状の構造体はドメインウォールと呼ばれるが、今回発見したカイラルドメインウォールは、ダイポールロックドソリトン (DLS) と名付けたように、磁気双極子エネルギーを最小化した状態 (ダイポールロック) を保ったまま、その両側で逆向きのカイラリティをもつ状態を滑らかに反転接続する空間構造である。</p> <p>超流動ヘリウム3のA相におけるダイポールロック状態は、巨視的波動関数を特徴づける原子対の軌道角運動量の方向軸1ベクトルと磁気異方性の特徴軸dベクトルとが、お互いに平行を保った状態である。面状のDLSを挟む2つの半空間に広がった巨視的波動関数は、各々の半空間では両ベクトルはほぼ平行で同じ向きに揃っているものの、2つの空間ではお互いに逆向きとなる方向に揃った状態にあり、DLSを含むほぼ全空間で平行状態を保ったまま、DLS面に直交する直線上を通過する空間移動の間に、その方向が180度回転する構造を取っている。このような構造はトポロジカルな巻き数が基底状態と同じくゼロであるため、バルクの空間内では連続的変形により消滅することが期待される。しかし、今回の研究で用いた薄板状の容器内では、準安定に存在しうることが実験的に明らかになった。理論的考察により、DLSの容器壁と接する領域に巨視的波動関数の振幅をゼロにするシンギュラリティが存在することで、この構造が準安定化されることがわかった。また同様に、DLSの厚さは薄板状容器の厚さ100μmと同じオーダーになると考えられるが、この結果は磁気共鳴映像法により観測された空間形状と合致する。また、今回発見したDLS構造のドメインウォールの自然冷却時における発生頻度は極めて高いことも驚くべきことである。これまで世界中で多数回行われてきた、平行平板試料室に閉じ込めた超流動ヘリウム3のA相の実験において、実際にはかなりの頻度でDLSが発生していたと考えられるが、その存在は気づかれていなかった。対称性の異なる量子渦各種やソリトン構造に代表される様々な空間構造は主として磁気共鳴 (NMR) 周波数のシフトにより検出されてきた。</p>			

しかしながら、DLSは磁気的にはテクスチャーの基底状態とほとんど変わらないため、周波数のシフト量からでは、検出することが困難であり、それ故にこれまで見逃されてきたと推察される。本研究においては、通常のNMRの発展形である磁気共鳴映像法(MRI)、磁気共鳴分光映像法(MRSI)の手法を用いることで、DLS近傍で局所的にNMRの線幅が増大していることを検出し、初めてその存在を捉えることができた。

実験で取得したデータを詳細に分析するために、準安定状態の巨視的波動関数の空間形状すなわちテクスチャーを、各種の異方性エネルギーの和を極小化することで推定する、数値解析プログラムを構築した。このプログラムを用いることで、様々な対称性を持つ準安定なテクスチャーを数値的に再現することが可能となった。また、空間変化する双極子相互作用ポテンシャルの中で形成されるスピン定在波の数値解析プログラムを用いて、推定されたテクスチャーの中で形成されるスピン定在波のスペクトルを推定した。これらの数値解析の結果を実験により取得した結果と比較することで、新しく発見した構造がDLSであることを決定した。DLSはそのほぼ全域でダイポールロックされた構造を持つものの、容器壁にシンギュラリティを伴うことが必要な構造で、その付近にわずかながらダイポールロックの外れた構造が存在する。その構造を反映して、基底状態のテクスチャーと比べてわずかに小さな周波数シフトを持ち、かつ、空間対称で磁気共鳴測定により観測されうるモードと反対称で観測されにくいモードが、DLS近傍の定在波として安定化することを発見した。この二つのモードがスピン流を通して結合することで局所的なNMRの線幅が増大するものと考えた。また、磁気共鳴映像法で観測されたDLSの形状は、厚さ100ミクロン程度の薄膜状であり、数値解析の結果とも合致した。

この研究成果は、カイラル超流動・超伝導体の研究をさらに発展させるための重要な一歩であると言える。カイラルドメイン構造はその存在が予想され、間接的証拠が実験的に観測されてはいたが、実空間における形状を可視化することで、その存在は遥かに確かなものとなった。さらに、カイラルドメインウォールの実空間での位置や形状を制御する可能性が見えたことにより、ドメインウォール近傍に自発的に流れることが理論的に予想されてきたエッジ超流動流の観測可能性へとつながることとなる。また、同様に理論的にその存在が予想されながら、未だに観測されていない巨視的な自発的軌道角運動量を検出することにもつながる可能性がある。

また、この研究により開発された超低温磁気共鳴分光映像法は、カイラル超流動の研究に止まらず、量子凝縮系物質を記述する巨視的波動関数の空間形状の測定技術として世界で始めて実用化されたものと考えられる。トリプレットP波の波動関数で記述される超流動ヘリウム3にとって、空間変化する波動関数で記述される姿はその本

質を映し出したものに他ならない。この方法で可視化されることで、これまで推定しているだけであった空間形状を実測できることとなり、それにより新たな発見につながる可能性が十分にある。その意味でも特筆すべき実験技術のブレークスルーであると言える。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

笠井純氏は、時間反転対称性の破れにより、カイラル対称性の破れたカイラル超流動体である超流動ヘリウム3のA相の実空間構造を超低温磁気共鳴映像法により世界で初めて観測し、各々均一なカイラリティを持つドメインが複数個並接して共存するカイラルドメイン構造が準安定に存在することを発見した。さらに、ドメイン間の境界すなわちカイラルドメインウォールは、双極子相互作用を最小にする局所配置を取りながら、カイラリティを与える1ベクトルが空間反転する、ダイポールロックドソリトン構造を取っていることを発見した。これらの発見は学術上極めて重要な意義を持つことから、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認めた。また、平成30年9月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降