

氏名	うえのともひろ 上野智弘
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	理博第2424号
学位授与の日付	平成14年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科 専攻
学位論文題目	超低温MRIを用いた ^3He — ^4He 混合液体相分離界面ならびに固体 ^3He 磁区構造の研究

論文調査委員 (主査) 教授 水崎隆雄 教授 大見哲巨 助教授 松原 明

論文内容の要旨

超低温での量子液体・固体 ^3He やその混合液体では、試料中にマクロな磁気構造が存在する。本論文では、超低温で液体・固体 ^3He が示す種々の磁気的な構造を可視化することを目的に、超低温に適応できる磁気共鳴映像法(MRI)の開発を行い、MRIによる可視化による量子液体、固体Heの磁区構造の研究を行った。本論文は3つの部分、1)超低温に適用出来るMRIの開発研究、2) ^3He — ^4He 混合液の相分離界面の形状の精密測定による濡れ転移の観測と混合液体の核スピン磁気緩和における表面緩和と相分離界面の影響、3)核整列固体 ^3He の低磁場相(U2D2)での磁区構造の研究から成り立っている。

1)MRIは医学分野を中心として急速に応用が広がった技術であるが、それを超低温の物理に応用するためにはいくつかの困難がある。その一つは、通常のMRIはパルス・勾配磁場を用いるため近くに金属があると大きなジュール発熱を伴う。超低温にMRIを適用するためにはMRI測定時の発熱をnWよりも十分小さく抑える必要がある。本論文では静的磁場勾配法を用いたMRIを行い、その磁場勾配の方向を回すことによって2次元あるいは3次元の映像を構築する方法を開発した。 ^3He — ^4He 混合液の相分離界面の解像度から、MRIの空間分解能をテストしたが、10MHzで2次元画像で1ピクセル約15 μm という高分解能を達成した。

2)超低温MRIを用いて、 ^3He — ^4He 混合液の相分離の形状を観測した。界面の形状から、相分離界面と試料壁との接触角と毛管長が求められる。毛管長から界面張力が求められるが、それは既知の界面張力の値と一致した。相分離界面と試料壁との接触角の測定は始めて行った。低温では接触角が小さい角度(ゼロかもしれない)であるが、3重臨界点に近づくと従って大きくなることを見出した。この実験は、別の光干渉法を用いた高分解能の光学的観測で測定され、MRIで見い出された接触角の臨界点近傍の異常と定性的に一致する結果が得られた。幾つかの古典液体では臨界点に近づくと臨界点濡れ転移を起こすことが分かっているが、本研究の場合には3重臨界点近傍で接触角が大きくなり、濡れとは逆であり、興味深い結果である。ついで、MRIを動的現象に適応した。磁化を飽和させた後の磁化の回復を時間経過と共に画像化し、磁化が試料壁から回復し試料全体に広がっていく様子や、相分離面を通して一方の磁化が他の相に流れ込む様子を観測することに成功した。磁化の流れが界面を通過する時には磁気緩和はなく、両相の \uparrow スピンと \downarrow スピンの化学ポテンシャルが各々等しいとして、界面での磁化の飛びの比率が一定に成るように磁化が回復していることが明らかになった。

3)bcc固体 ^3He は0.93mKで核整列が起こり、磁気構造は1軸異方性を持つ反強磁性体(U2D2構造といわれる)になる。超流動液体 ^3He 中で結晶成長させると数 mm^3 の大きな結晶単結晶ができるが、3つの等価な異方軸に対応して3つの大きな磁区から出来ていることが分かっている。なぜ3個の磁区から成り、なぜ単磁区結晶が出来ないのか、大きな謎である。核整列固体 ^3He のスピン動力学は非線形であるので、上記に開発したMRIをそのまま用いることは出来ない。非線形効果をさける方法を見い出して、超低温におけるU2D2固体 ^3He の磁区構造を2次元投影図として可視化することに成功した。非常に小さい種結晶の中に既に3個の磁区が存在し、それを細長い試料室中で成長させると、成長に伴って2つの磁

区の境界面（磁壁）は曲ることなく平らな平面で伸び（曲らない）、試料壁まで伸ると試料壁と磁壁で囲まれた磁区は成長出来なくなることがわかった。この場合、結晶は試料室上部では単磁区になっている。画像の解析から磁壁は(110)面であることがわかった。坪田等が予測しているエネルギー的に最も安定な(110)a又は(110)bのどちらかであるかはMRI画像では区別出来ない。磁場が約4KG以上で存在する高磁場核整列の磁気構造は立方対称を持ち、磁区は存在しない。U2D2相と高磁場相の間を磁場サイクルさせるとU2D2の磁区構造が変化するが、大きな結晶では磁区の記憶効果が見出された。記憶効果は1軸性の歪みから来ると推定している。

論文審査の結果の要旨

本論文では、超低温で液体・固体 ^3He が示す種々の磁気的な構造を可視化することを目的に超低温に適応できる磁気共鳴映像法（MRI）の開発を行い、MRIを用いた可視化による量子液体、固体の磁区構造の研究を行っている。1）超低温に適用出来る高分解能MRIの開発を行った。MRIを応用して、2） ^3He — ^4He 混合液の相分離界面の濡れ転移の研究と混合液体での核スピン緩和における表面緩和と相分離界面の影響、3）核整列固体 ^3He の低磁場相（U2D2）での磁区構造の研究を行った。

1）医学分野などで急速に発展した従来の室温で用いられるMRIを超低温に適用できるように改造した。主な改造点は従来のパルス磁場勾配法は金属などがあれば大きなジュール発熱があり、超低温に適用するためには測定の発熱をnWより十分小さくする必要がある。そのために静的磁場勾配法を用い、磁場勾配を回転させることにより、2次元投影MRIを行った。希釈冷凍機温度で ^3He — ^4He 混合液を用いた10MHzでの分解能テストでは、2次元画像の絶対分解能 $15\mu\text{m}$ 、相対分解能は相分離界面の位置の決定に関して約 $1.5\mu\text{m}$ であり、極めて高解像度であった。今後、超低温での量子液体・固体の磁気構造の研究や他の物質への応用が期待され、多くの新しい物理を切り開いて行くことが期待される有力な測定手段である。

2） ^3He — ^4He 混合液の相分離界面の可視化を始めて行った。MRIの空間高分解能を利用して、相分離界面を精密に測定し、始めて相分離界面と試料容器の壁との接触角を測定した。接触角は混合液の3重臨界点（相分離曲線と超流動転移が交わる点）近づくにつれて大きくなる傾向が見られた。これは幾つかの液体—気体臨界点近傍で見られる臨界濡れ転移とは逆である。申請者はパリ高等師範大学で、光学干渉法を用いた接触角の精密測定を行ったが、MRIの測定結果を指示する結果を得た。説明は出来ていないが、興味深い結果である。更に動的現象にMRIを適用し、相分離した混合液の磁化を飽和させた後の試料空間の磁化の回復の様子を映像化することに成功した。表面緩和が磁化回復の機構であり、相分離界面では磁気緩和が起こらないこと等、動的空間情報は極めて有力な研究手段であることを示した。

3）当初の主目標であったサブmK温度域での核整列固体 ^3He のU2D2相で見られる磁区構造の可視化に成功した。従来から単結晶 ^3He のU2D2相に3個の磁区が存在すること、細長い試料の中で成長させると試料上部は殆ど単磁区になることが知られていたが、MRIを用いてその原因を調べた。MRI画像から磁壁は(110)面であること、大きな結晶では一度出来た磁区は磁区を消しても記憶が残ることがあることなどを見出した。細長い試料では上部が単磁区になることは従来から知られていたが、MRIの結果から種結晶では3つの磁区が存在し、結晶成長につれて磁壁が真直ぐに平面で伸び、試料壁に当たると磁壁と試料壁に囲まれ磁区は成長を止める様子が見られた。百聞一見に如かずである。

新しい技術開発と、それを適用した ^3He — ^4He 混合液と核整列固体 ^3He の磁区構造の研究は、今まで未知であった現象を新しい測定手段を用いて新しい切り口で捉え、多くの成果を出しており、本論文は博士（理学）の学位論文としては十分な価値を有するものと認められる。

本論文に報告された研究業績を中心に、参考論文の内容ならびに、これらに関連した研究分野について口頭試問を行った結果、合格と認めた。