

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005～2009

課題番号：17071004

研究課題名（和文） 量子固体の磁性と結晶制御

研究課題名（英文） Magnetism of quantum crystal and crystal growth control

研究代表者

奥田 雄一 (OKUDA YUICHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50135670

研究成果の概要（和文）：

2次元3角格子 ^3He について、1mK以下における磁化曲線に1.2～2.2Tに $1/2$ 磁化プラトーを、2.5Tにショルダーを見出した。これを説明するためには多体交換相互作用パラメータが重要であるが6体までのパラメータでは説明できないことが判明した。また、固体 ^4He に混入した微量不純物 ^3He のNMR検出に成功し、 ^4He 結晶中の不均質な部分にトラップされた ^3He が微小クラスターを形成し、相分離温度以上でも安定に存在することを明らかにした。アエロジェルという空孔率の高い多孔体の中での固体 ^4He の結晶成長のメカニズムが核生成によることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The magnetization curve for two dimensional ^3He on a triangular lattice was obtained at 1 mK, revealing a $1/2$ plateau at 1.2-2.2 T and a shoulder at 2.5 T. To understand them the multiple spin exchange parameters are essential but it was found up to 6 bodies exchange parameters are not enough to explain the results. NMR signal from very dilute ^3He atoms solved in solid ^4He was successfully detected and it was found that ^3He forms a small stable cluster. The growth mechanism of solid ^4He in the porous aerogel was found due to a nucleation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	19,600,000	0	19,600,000
2006年度	18,700,000	0	18,700,000
2007年度	15,000,000	0	15,000,000
2008年度	12,700,000	0	12,700,000
2009年度	10,900,000	0	10,900,000
総計	76,900,000	0	76,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：量子固体、多体交換、フラストレーション、低次元、スピン液体、超流動、NMR、結晶成長

1. 研究開始当初の背景

ヘリウム3は原子の零点振動が大きく、量子力学的なトンネル効果による原子自身の位置交換が頻繁に起こっており、量子固体あるいは量子結晶と呼ばれている。交換する原子はハードコアのために周りの原子を押しつける必要があり、その結果生ずるヘリウム3核スピン ($S=1/2$) 間の交換相互作用では、3体、4体などのリング状多体交換 (MSE) の役割が大きく、奇数次の強磁性的、偶数次の反強磁性的相互作用の競合により、フラストレーションの内在した系である。さらに各々の多体交換相互作用は圧力に非常に敏感で異なった依存性を持っており、圧力によりフラストレーションを制御することができる。こうして固体ヘリウム3の磁性は圧力と磁場により非常に複雑な様相を示し、物性物理のなかで特異な位置を占めている。本研究の目的は、量子固体の磁性におけるリング状交換モデルの正当性を実験的に検証するとともに、その磁性を利用したヘリウム3結晶成長制御への新しい道を開くことである。

2. 研究の目的

(1) 吸着固体ヘリウム3の磁化測定

物理吸着により実現される理想的2次元固体ヘリウム3は3角格子を形成し、特に反強磁性の密度領域では幾何学的な効果もありフラストレーションが増幅された量子スピン系である。この基底状態は、絶対零度でも長距離秩序のないスピン液体と見られているが、スピングャップの有無については実験と理論的予想が一致していない。そこで Double gradient field coil を用いたファラデーセルを現有の超低温・強磁場冷凍機に設置し、1層の固体⁴He上の反強磁性4/7整合相の1mK以下における磁化曲線を測定する。

(2) 3次元固体ヘリウム3のMR I 測定

超流動状態から生成される低磁場秩序相 (単磁区のU2D2単結晶) 及び高磁場秩序相 (CNAF相単結晶) について、超音波の音速と減衰率の温度・磁場依存性を精密に測定する。それに関連して、単結晶 (UDD相) の磁区形状をMRI法により測定し、磁区の異方軸と磁壁の方向および結晶界面ないしは結晶の成長軸方向 (螺旋転移の方向) との関連を詳細に調べる。

(3) 固体ヘリウム3の結晶制御

固体ヘリウム3の結晶成長の実験を行う場

合は、ヘリウム4の場合よりもより低温が必要である。従って光学測定による熱流入に耐えるには、より強力な冷凍能力を有する希釈冷凍機が必要となる。そこで現有の冷凍機の強化を図り、50mKまでの温度域において固体ヘリウム3の結晶成長・融解を超音波・光学測定に取り組む。さらにシュリーレン法により微小な密度変化を捉える技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) 吸着固体ヘリウム3の磁化測定

Double gradient field coil を用いたファラデーセルを現有の超低温・強磁場冷凍機に設置し、1層の固体⁴He上の反強磁性4/7整合相の1mK以下における磁化曲線を測定する。

(2) 3次元固体ヘリウム3のMR I 測定

単結晶 (UDD相) の磁区形状をMRI法により測定し、磁区の異方軸と磁壁の方向および結晶界面ないしは結晶の成長軸方向 (螺旋転移の方向) との関連を詳細に調べる。

(3) 固体ヘリウム3の結晶制御

現有の冷凍機の強化を図り、50mKまでの温度域において固体ヘリウム3の結晶成長・融解を超音波・光学測定に取り組む。さらにシュリーレン法により微小な密度変化を捉える技術を開発する。

4. 研究成果

(1) グラファイト上の物理吸着にしたヘリウム3原子層は、理想的な2次元3角格子反強磁性固体を形成する。フラストレーション効果が強く現れた量子スピン系の基底状態の解明を目標に研究を行った。1層の固体⁴He上の反強磁性4/7整合相の1mK以下における磁化曲線のプラトーに1.2~2.2Tに現れる1/2磁化プラトーや2.5Tに現れるショルダーを発見した。その理論的な理解のためには、多体交換相互作用パラメータの厳密な見積もりが不可欠である。過去にフランスのグループによって報告された6体までのパラメータでは説明できないことなどが明らかになった。

(2) 固体³Heの結晶化波の観測を目指してより低い温度まで試料を冷却出来るサンプルセルを開発した。テスト冷却では従来セルよりもかなり低い300 μ K程度までの冷却に成功し、超流動³He-Bの長寿命NMR信号で

ある PPD 信号の発生と磁場勾配による制御が可能になった。その結果 PPD が容器壁と近接することによる速い緩和と、バルク中での PPD 領域の境界で働く遅い緩和機構の二種類の緩和機構を持つことを発見した。固体 4He に混入した微量不純物 3He の NMR 検出に成功し、 4He 結晶中に含まれる不均質な部分にトラップされた 3He が相分離温度以下では微小クラスターを形成し、相分離温度以上でも比較的安定に存在することを示した。

(3) スーパークリーンの代表格である 4He 固体の高速結晶成長について、新しい知見を得た。負結晶のラフニング転移と運動ダイナミクス、 c -ファセットの量子極限における成長メカニズムの解明などである。また、アエロジェルという空孔率の高い多孔体の中での固体 4He の結晶成長のメカニズムが核生成によっていることを明かにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① Hyperfine induced magnetic ordering in a $S = 1/2$ quantum magnet on Kagomé lattice, Y. Karaki, M. Kou, A. Yamaguchi, M. Kubota, H. Ishimoto, Z. Honda and K. Yamada, J. Low Temp. Phys., **158**, 653 (2010) 査読有
- ② M. Yamashita, K. Izumina, A. Matsubara, Y. Sasaki, O. Ishikawa, T. Takagi, M. Kubota, and T. Mizusaki, "Texture and Vortex of Rotating Superfluid 3He-A in Parallel-plate Geometry", J. Low Temp. Phys. **158**, 353-363 (2010). 査読有
- ③ MRI Study of Nucleation and Growth During the Field Induced First Order Phase Transition Between U2D2 and CNAF He-3 near Absolute Zero, T. Tanaka Y. Sasaki, *et al.* J. Low Temp. Phys. **158**, 737 (2010) 査読有
- ④ Magnetization Plateau of Two-Dimensional Antiferromagnetic Solid 3He on a Triangular Lattice, H. Nema, A. Yamaguchi, and H. Ishimoto, Phys. Rev. Lett. **102**, 075301 (2009). 査読有
- ⑤ Spin wave and vortex excitations of superfluid He-3-A in parallel-plate geometry, Yamashita M, Izumina K, Matsubara A, Y. Sasaki, *et al.*, PHYS. REV. LETT., **101** 025302 (2008). 査読

有

- ⑥ New aspects of crystal growth of solid 4He studied by acoustic wave Y. Okuda and R. Nomura, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 111009-1-10 (2008). 査読有
- ⑦ Competition between thermal fluctuations and disorder in the crystallization of 4He in aerogel, R. Nomura, A. Osawa, T. Mimori, K. Ueno, H. Kato and Y. Okuda, Phys. Rev. Lett. **101**, 175703 (2008) 査読有
- ⑧ Faraday Instability of Crystallization Waves in 4He , H. Abe, T. Ueda, M. Morikawa, Y. Saitoh, R. Nomura, and Y. Okuda, Journal of Physics: Conference Series, **92**, 012157-1-4 (2007) 査読有
- ⑨ Pressure-induced ferromagnetic solid He-3 layer on He-4 preplated graphite, Yamaguchi A, Watanuki T, Masutomi R, A. Yamaguchi, *et al.* PHYS. REV. B **75**, 092501 (2007). 査読有
- ⑩ Pressure-induced ferromagnetic solid He-3 layer on He-4 preplated graphite, A. Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. B **75**, 092501 (2007). 査読有
- ⑪ Magnetic relaxation and minority spin condensate in spin-polarized superfluid He-3 A1 , A. Yamaguchi, *et al.*, Nature **444** 909 (2006). 査読有
- ⑫ Facet Growth of 4He Crystal Induced by Acoustic Waves, H. Abe, Y. Saitoh, T. Ueda, F. Ogasawara, R. Nomura, Y. Okuda and A. Ya. Parshin, J. Phys. Soc. Jpn. (Letter), **75**, 023601-1-4 (2006). 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① A. Yamaguchi: "Mechanical Spin Pump and Spin Relaxation in Superfluid 3He-A1 ", Physics of New Quantum Phases in Superclean Material に関する国際会議 PSM2010, 2010 年 3 月 11 日, 横浜
- ② Y. Okuda, "Measurement of Surface Andreev Bound State of Superfluid 3He-B and Majorana Mode", International Workshop of Superfluid 3He under Rotation, Lammi, Helsinki, April, 15, 2010.
- ③ H. Ishimoto: "Two-dimensional Anti-ferromagnetic Solid 3He in High

Magnetic Fields”, QFS2009 国際会議,
2009年8月9日, Evanston, Illinois,
USA.

- ④ A. Yamaguchi: “Hyperfine induced
magnetic ordering in $S = 1/2$ quantum
magnets on Kagome”, QFS2009 国際会議,
2009年8月9日, Evanston, Illinois,
USA.
- ⑤ “Chaotic Decay of Long-Lived NMR
Signal in Superfluid $^3\text{He-B}$ ”
R. Toda, M. Kanemoto, T. Kakuda, W.
Onoe, Y. Tanaka, R. Kado, and
Y. Sasaki, International Symposium on
Quantum Fluids and Solids QFS2009, Aug.
6, 2009, Northwestern University,
Evanston, IL, U.S.A.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥田雄一 (OKUDA YUICHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号 : 50135670

(2) 研究分担者

佐々木豊 (SASAKI YUTAKA)

京都大学・低温物質科学研究センター・准
教授
研究者番号 : 60205870

(3) 研究分担者

山口明 (YAMAGUCHI AKIRA)

兵庫県立大学・大学院物質理学研究科・准
教授
研究者番号 : 10302639