

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22684019

研究課題名（和文） 超流動ヘリウム3高偏極状態の実現に向けたスピンの制御の研究

研究課題名（英文） Spin current manipulation for highly spin-polarized superfluid helium-3

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：強磁性体のように核スピンの完全に偏極した超流動ヘリウム3のA1相と呼ばれる状態のスピンの制御し、これまで実現されていない高偏極状態の超流動の研究することを目的に実験を行った。そのための新たな超低温冷凍機を建設し、稼働を始めた。スピンの生成による偏極状態を圧力・温度・磁場をパラメータとして系統的に調べ、スピンの緩和機構の詳細を明らかにした。得られた知見を元に新たなスピンの生成のためのデバイス開発に取り組んだ。

研究成果の概要（英文）：We have investigated for a spin current manipulation of the spin-polarized superfluid helium3-A1 phase, which enables us to boost spin polarization of liquid 3He to much greater level than feasible by available static magnetic fields. A cryostat working in ultra-low temperature was constructed and began to be operated. The detailed spin fluid dynamics in the A1 phase was studied as function of pressure, temperature, and magnetic fields. Based on the knowledge and experience, we have developed a new apparatus to boost spin polarization more efficiently.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	17,900,000	5,370,000	23,270,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	20,800,000	6,240,000	27,040,000

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：①低温物性

②量子流体

③超流動

④ヘリウム3

⑤スピン偏極

1. 研究開始当初の背景

超流動ヘリウム3の高スピン偏極状態についての安定性については、低温物理学の分野での長い間の謎であり、理論、実験面から

解明しようとする努力が試みられていた。研究代表者を含むグループでは、数年前より超流動ヘリウム3のA1相では超流体成分のスピン偏極度が揃っていることを利用したス

ピンポンプ法と呼ばれる方法で、超流動ヘリウム3のスピンの偏極度を上昇させる方法を報告してきた。この方法をうまく発展させることができれば、より高偏極状態の超流動ヘリウム3を実現できるのではないかと期待が高まっていた。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、核スピンが完全に偏極したヘリウム3は、どのような超流動性を示すのか？また、そもそも、超流動状態として安定に存在しうるのか？といった低温物理学における根源的な疑問を解明することを本研究の目的とした。そのためにオリジナルな手法であるピンポンプ法を発展させ、高偏極超流動ヘリウム3の生成を目指した。併せて、高偏極超流動ヘリウム3中のスピン流、超流動流の動力学を明らかにし、超流動スピントロニクスと呼べるような新しい分野の開拓に挑戦した。

3. 研究の方法

まず、液体ヘリウム3の超流動状態の実現には約2mK以下の超低温環境が必要である。更に、A1相が発現するのは磁場中であるので、数テスラ程度の強磁場を印加した超低温・強磁場複合極限環境での実験が必要である。超低温環境での実験を行えるように研究代表者が所属する兵庫県立大学理学部の播磨理学キャンパスに新たに超低温冷凍機の建設を始めた。ベースとなる希釈冷凍機は購入し、10mK以下の超低温環境を生成するための断熱消磁冷凍機部分は、設計、工作、組立てを自らの手で進めた。また、それと平行して、東京大学物性研究所の超低温共同利用施設を申請し、毎年1~2回ほど実験を行った。物性研究所の設備は、超低温冷凍機に強磁場用超伝導マグネットを組み合わせた施設であり、本格的なA1相の実験ができる国内で唯一の施設である。

スピン流制御の実験は、超低温・強磁場環境に置かれた「実験セル」と呼ばれる実験装置を作成して行う。実験セルは、超流動状態の液体ヘリウム3を OUTER 容器と、その中に置かれる実際にスピン流を流すための INNER 容器の部分に分かれる。実験セルの INNER 容器部分を行いたい実験の内容に合わせて変更・改良することにより様々な実験を行った。本研究機関では、合計4つのセルを作った。

INNER 容器の作成、評価は予め兵庫県立大で行う。本研究期間内に試したのは、スピン流を選択的に流すためのスーパーリーク、スピン流を発生させるためのアクチュエータ、発生したスピン流を高感度に計測するための

センサー部分である。低温での液体のリークがないかどうかや、作成したスーパーリークの液体流量が適切かどうか十分テストしたのちに超低温実験を始める。物性研で行う場合は、兵庫県立大で製作した実験セルを物性研究所まで輸送し、セットし超低温実験を行った。1回の超低温実験は大体1~2ヶ月程度の期間行う。核断熱消磁冷凍機による超低温環境の調整までに約3週間程度かけ、その後、数週間~1ヶ月ほど実験を行った。得られたデータを解析し、その結果を基にして次のセルの設計をして、あらたな実験をするというサイクルを繰り返した。

4. 研究成果

(1) 新しい超低温冷凍機の製作・実験開始

兵庫県立大学理学部播磨理学キャンパスにて超低温実験可能な新たな冷凍機を製作した。フランス Cryoconcept 社製の 3He-4He 希釈冷凍機（最低到達温度 9mK）の下部に断熱ヒートスイッチ、実験空間用ステージ、核断熱消磁用寒剤（PrNi5, 0.48mol）を備えており、Oxford 社製超伝導マグネット（最高磁場 6T）で磁場印加し、断熱消磁を行う。一晩の予備冷却で、最低到達温度は約 1 mK に達するコンパクトな冷凍機であり、超流動ヘリウム3の弱磁場下の実験が可能となった。兵庫県立大学内ではもちろんのこと、兵庫県下でも唯一の超低温冷凍機である。

(2) 磁場・温度・圧力をパラメータとした A1 相でのスピン緩和機構の詳細を解明

A1 相でのピンポンプ実験と、過去に行われた磁気噴水効果実験の結果をまとめて、詳細に解析しなおし、磁場・温度・圧力をパラメータとした詳細な A1 相のスピン緩和時間の議論を行った(図1)。A1 相に存在すると理論的に考えられているマイノリティスピンの影響を考慮するとこれらの依存性を系統的に説明できることを明らかにした。スピン緩和時間の詳細な解析により、スピン蓄積実験におけるスピン流緩和がスーパーリークの不完全性による常流動成分流出の影響を強く受けていることが判明し、以下で述べるセルの改良を行う方針を立てることができた。

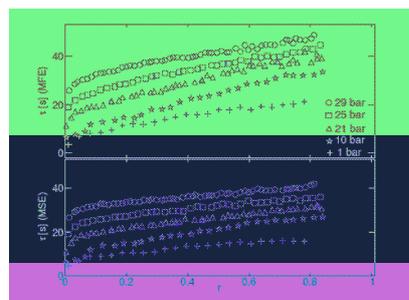


図 1. 様々な圧力での磁気噴水効果(上)とピンポンプ実験(下)のスピン緩和時間

(3) 新規超低温アクチュエータの開発

高スピン偏極状態を目指したスピン蓄積実験ではスピン流を生成するためのアクチュエータを大きく動かして実験することが必要だということがわかった。そこで、それまでの実験で採用していた、直流電場による静電力を利用した静電ダイヤフラムアクチュエータから、液体ヘリウムの圧力差で金属性ダイヤフラムを駆動する圧力制御ダイヤフラムアクチュエータへの転換を図ることとした。冷凍機の4K プレートにヒーター制御可能な圧力調整チャンバーを準備し、その圧力変化によりダイヤフラムを押し出すことができる構造を新たに構築した。その結果、それまで1~2 μm 程度だったアクチュエータの動作距離を100 μm 程度まで拡大することに成功した。

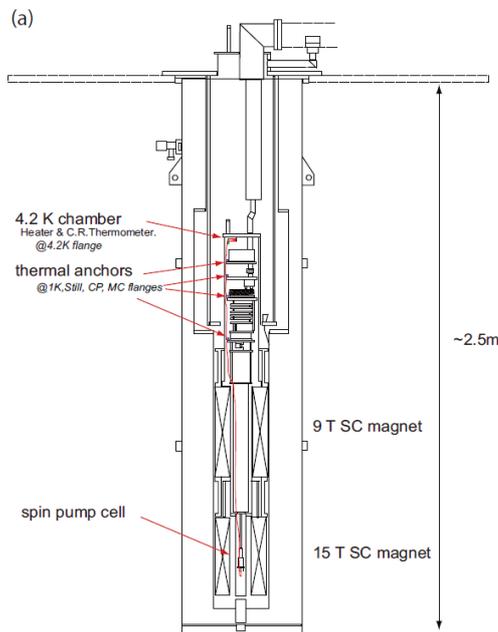


図2. 実験セルとアクチュエータの配置図

(4) 粉末充填型スーパーリークの開発

スピン蓄積では、スピン流が緩和する前の短時間の間に大量にスピン流を効率よく流すことが重要であることがわかってきた。そこで、A1相においてはスピンフィルターとしても機能するスーパーリークを改良することにした。スーパーリークとは粘性のない超流体成分のみ選択的に通すことができる非常に細い穴でできたフィルターであり、それまでの実験では、厚さ数 μm のアルミ箔を水酸化ナトリウムでエッチングして溶かして作ったギャップや、内径5 μm 程度のガラスのキャピラリー細管が数千本束ねられてできたガラスキャピラリーアレイというものを使用してきた。ただ、これらのスーパーリークでは常流動成分を完全にブロックすることができず、常流動成分の流れがス

ピン蓄積の程度を支配しているということもシミュレーションを通じてわかった。本研究で試みた粉末充填型のスーパーリークは超流動ヘリウム4の実験では非常に馴染み深いもので、低温のデモ実験などではよく用いられているものである。ただ、超流動ヘリウム3の実験(特にA1相)ではこれまで用いられたことがなく、どのように動作するか未知の部分があり、実際に作成し測定を行うこととした。粉末はアルミナ粉を用い、室温において圧縮成形で作成した。X線CT、水銀圧入法による孔径分布計測、室温の流量計測などの基本情報を収集し、最適と思われる流量インピーダンスのものを超低温実験に使用した。この時の流量インピーダンスは以前のものより10倍程度大きいものを選択し、常流動成分をよりブロックできるように配慮した。スーパーリークを挟んでフローを起す実験では、2mK以下で観測されるヘリウム3の超流動状態で、明らかに圧力差が消失し、粉末充填型のスーパーリークが超流動ヘリウム3においても確かに機能することが確かめられた。ただし、同時に臨界流量を計測したところ、臨界流量の大幅な減少が見られ、単位時間に流すことができる超流動流の流量は大きく制限されてしまうことが判明した。おそらくアルミナ充填による経路の乱雑さや、孔径分布のうち極端に孔径が小さいところにおける超流動成分の抑制などが効いているものと考えられ、スーパーリークとしては、これまでのスリットやキャピラリーアレイ型の方が優れているという結論が得られた。

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4件)

① A. Yamaguchi, N. Kamada, G. Motoyama, A. Sumiyama, Y. Aoki, Y. Okuda, M. Kubota, and H. Kojima, Recent Spin Pump Experiments on Superfluid $^3\text{He-A1}$, *J. Low Temp. Phys.*, 査読有, 171(2013), 220-225, DOI: 10.1007/s10909-012-0695-3

② A. Yamaguchi, M. Wada, H. Tanaka, G. Motoyama, A. Sumiyama, Y. Aoki, Y. Okuda, S. Murakawa, Y. Karaki, M. Kubota, and H. Kojima, Development of a ^3He -hydraulic actuator for spin pump in superfluid $^3\text{He-A1}$, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 査読有, 400(2012), 012081, DOI: 10.1088/1742-6596/400/1/012081

③ A. Yamaguchi, M. Wada, R. Tani, K. Takeda, T. Matsumoto, H. Kashiwaya, G. Motoyama, S.

Kashiwaya, S. Ohkoshi, and A. Sumiyama, An Operation Circuit of a Micro-SQUID Magnetometer below 1 K, J. Low Temp. Phys., 査読有, 162(2011), 748-753
DOI: 10.1007/s10909-010-0255-7

④Y. Aoki, A. Yamaguchi, K. Suzuki, H. Ishimoto, and H. Kojima, Spin fluid dynamics observed by magnetic fountain effect and mechanical spin pumping effect in the ferromagnetic superfluid He-3 A1 phase, Phys. Rev. B, 査読有, 82(2010), 0545271-054527112,
DOI: 10.1103/PhysRevB.82.054527

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 鎌田尚史(山口明), 超流動ヘリウム3-A1相スピンポンプ実験のためのスーパーリークの改良 II, 日本物理学会 2013 春季大会, 2013 年 03 月 27 日, 広島大学(広島県)
- ② A. Yamaguchi, Recent Spin Pump Experiments on Superfluid $^3\text{He-A1}$, QFS2012: International Conference on Quantum Fluids and Solids, 2012 年 08 月 16 日, ランカスター(イギリス)
- ③ 山口明, 超流動ヘリウム3-A1相におけるスピンポンプ流, 日本物理学会 2012 秋季大会, 2012 年 09 月 19 日, 横浜国立大学(神奈川県)
- ④ 鎌田尚史(山口明), 超流動ヘリウム3 A1相スピンポンプ実験のためのスーパーリークの改良, 日本物理学会 2012 年春季大会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学(兵庫県)
- ⑤ A. Yamaguchi, Development of a ^3He -hydraulic actuator for spin pump in superfluid $^3\text{He-A1}$, 低温国際会議 LT26, 2011 年 8 月 13 日, 北京(中国)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

http://www.sci.u-hyogo.ac.jp/material/low_temp/yamaguchi/yamaguchi.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：