

平成 21年 4月 1日現在

研究種目:基盤研究(B)

研究期間:2007~2008

課題番号:19340091

研究課題名(和文) 核偏極した超流動ヘリウム3の生成とスピン流体力学

研究課題名(英文) Production of polarized superfluid ^3He and its spin fluid dynamics

研究代表者

石本 英彦 (ISHIMOTO HIDEHIKO)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号:60044773

研究成果の概要:P波超流動体である超流動 ^3He A_1 相のスピン緩和時間が、15 Tまでの強磁場において広い温度・圧力領域の亘り初めて行われた。磁気噴水効果およびスピンプンピング効果という2つの方法により得られるスピン緩和時間に大きな差異はなく同じ物理量が測定されていることが判り、理論との比較が容易になった。次にスピンプンピング法を用いて、熱平衡状態より高い核偏極度を得るために新しい試料セルの開発を行い、熱平衡状態より大きな核偏極度を得た。

交付額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2008年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
年度			
年度			
年度			
総計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

研究分野:数物系科学

科研費の分科・細目:固体物性II・4303

キーワード:量子流体、超流動、偏極スピン流、磁気噴水効果、スピンプン、
マイノリティスピン、ヘリウム3、P波対

1. 研究開始当初の背景

液体 ^3He は非常にきれいな強い相関を持つ中性フェルミ流体である。約 0.1 K 以下の常流動相は強くフェルミ縮退し、圧力によりフェルミ温度や ^3He 準粒子間の相互作用を容易に制御することができる特異な系である。さらに数 mK 以下で存在する超流動 ^3He は軌道角運動量 (L) 及びスピン角運動量 (S) が 1 の P 波超流動体で、内部自由度の存在により A 相、B 相のほかに磁場中でのみ存在する A_1 相がある。この A_1 相の超流動成分は

^3He 核磁気モーメントが磁場に平行なクーパー対のみで超流動の質量流はスピン流と同一である。一方常流動成分は磁場に反平行な核磁気モーメントを持つ ^3He 準粒子と平行な核磁気モーメントを持つ励起された ^3He 準粒子から成っている。この様な A_1 相をスパーリクに通すと常流動成分が除去され、完全偏極した強磁性超流動体を得られる筈である(スピンプンピング法)。これを実現するには、強磁場中の A_1 相自身のスピン緩和の情報が必要である。しかし A_1 相の温度幅 $T=T_{c1}-T_{c2}$

(T_{c1} は常流動相から A_1 相、 T_{c2} は A_1 相から A_2 相への転移温度)は非常に狭く(3.4 MPa で 0.06 mK / Tesla)、従来の Kojima らの結果は A_1 相に接する境界相(A_2 相や常流動相)の存在に大きく影響されているとされてきた。最近、物性研の広い強磁場空間を持つ核冷凍機を用いて境界面のない A_1 相のみの試料について磁気噴水効果の測定が行われた。得られたスピン緩和時間は、強い磁場 (< 8 T) 及び圧力 (< 2.9 MPa) において予想以上に長く、強い温度・磁場依存性を持つこと、中間温度領域でキंकのような急激な変化を示すことが判ってきた。ここで特徴的なことは、 A_2 相に近付くと緩和時間が急速に短くなることである。この A_2 相近傍の振舞は容器の表面を非磁性の固体ヘリウム 4 でコートしても、変化なく表面緩和によらない A_1 相固有の緩和であると考えられた。その緩和時間の振舞は、核磁気モ-メントが磁場に反平行なク-パ-対(minority spin pair)が僅かに存在することを考慮すると、Leggett-Takagi の機構でよく説明できる。以上の結果は A_1 相での minority spin pair の存在を示唆する初めてのものではあった。そこで、上述の測定過程で見出された T_1 の温度依存性の急激な下降キंकの起源の解明とより強い磁場での T_1 測定が望まれていた。

2. 研究の目的

- (1) 強い磁場 (> 10 T) でのスピン緩和の測定と前述のキंक機構の解明
- (2) 偏極した超流動 ^3He の生成とその物性測定

3. 研究の方法

(1) 磁気噴水効果

プロトンを含まないマコール製の新しい試料セルを製作する。vibrating wireを検出室と外側試料室にそれぞれ設置し温度をモニターすることによりキंकの起源を解明する。

(2) スピンポンピング効果

我々が初めて観測に成功したスピンポンピング効果を利用して、より強磁場中 (< 15 T) での緩和時間の測定を試みる。

4. 研究成果

これまでのセルは全て Epoxy(Stycast1266) から出来ていたが、成分として大量のプロトンを含んでおり、強磁場中ではその長い核スピン緩和による熱の発生が危惧される。そこで今回はプロトンを全く含まない Macor という物質を用いることとした。しかしこの物質は低温での収縮率が非常に小さく、金属部との接合でクラックなどにより

度々真空漏れを起した。形状の工夫など幾多の試行錯誤を経て何とか問題のないセルを得ることに成功した。次にスーパーリークを隔てる 2 つの試料空間に温度計として vibrating wire をそれぞれ設置し、同時に測定による熱発生に十分な注意を払い磁気噴水効果を試みた。その結果、これまでの緩和時間の温度依存性に見られたキंकは、検出室と外側試料室の間の微小な温度差によりスーパーリーク内に A_1 A_2 相界面が生じるためであることが判明した。この温度差を除き、 A_1 相全域に亘りスムーズな温度・圧力依存性を持つ T_1 が得られ、理論との比較が容易になった。以上の磁気噴水効果による緩和時間の測定では、磁場勾配を生成するために超伝導磁石に NbTi 線を用いているので、現存のシステムでは外部磁場は 8 T が限界である。そこでより高い磁場領域での測定のために、機械的に超流動の流れを起すスピンポンピング効果を試みることにした。図 1 中の挿図の差圧圧力計 (c-d) に DC 電圧 (数 10 V) を印加すると、可動電極のメンブレンは固定電極に引き付けられて膨らむのでスーパーリークを通して液体が流入する。十分な時間経過後この電圧を除去したときの差圧 P に対応するメンブレン変位の時間変化が図 1 に示されている。

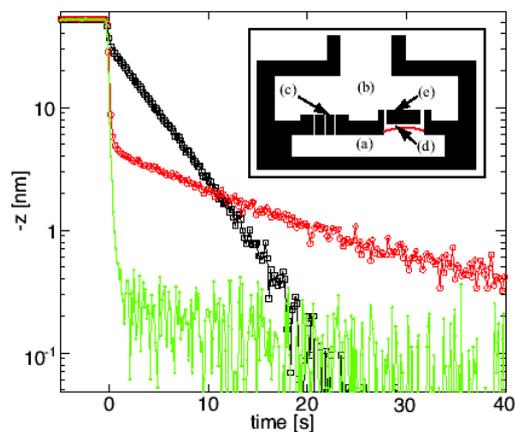


図 1 : 可動電極変位の時間依存性
(赤: A_1 相、緑: A_2 相、黒: 常流動相)

その振舞は液体が超流動 ^3He A_1 相、 A_2 相で大きく異なっている。PIによるケミカルポテンシャル差は超流動流により直ちに解消されるが、その後 A_1 相では熱平衡に達するにはある時間を要することが判る。そこで磁場領域を15 Tまで拡大し、同じセルを用いてスピンポンピング効果によるスピン緩和の測定を試みた

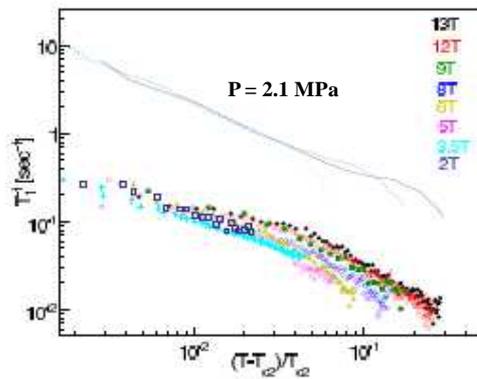


図2：スピンプンピング法によるスピン緩和率

その結果、8 Tまでは2つの方法により得られる結果に大きな差異はなく同じ物理量が測定されていることが判り、より高い磁場領域では、スピンプンピング効果により緩和の測定が可能となった。図2には 2.1 MPaでのスピン緩和率が示されているが、予想されていた値(点線)より小さい。この相違は、恐らく minority spin pairの存在量の不確かさによるものと思われる。

次の大きな目標は熱平衡状態では不可能な偏極度の大きい超流動 ^3He の生成である。このスピンプンピング方式では、 $\Delta V/V$ (V : 検出室の体積)を大きくする必要があり、実際的には、i) 可変電極膜のstiffness を小さくし、ii) DC 電圧による力を大きくするために駆動用の容量と検出用の容量を分離した図3の様な構造を採用した。

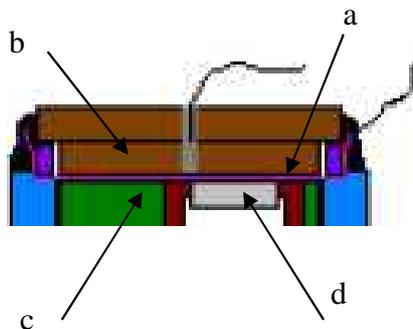


図3：核偏極用検出室

- (a) メンブレン
- (b) 上部固定電極
- (c) 下部固定電極
- (d) スーパーリーク

このとき問題となるのは、スーパーリークの形状である。超流動の流速は臨界速度で抑えられており、多量の偏極した超流動成分を短時間に検出室に取り込むには断面積を大きくする必要がある。一方、常流動成分の影響

を小さくするには、フローインピーダンスは大きくなければならない。その妥協として公称・直径 $5 \mu\text{m}$ の孔を約6000個含む厚みが1.5 mmのガラスキャピラリーアレイを用いることとした。開発された検出室を持つセルを用いた実験が進行中で短時間ながら偏極度の上昇が観測されている。しかしこれをさらに向上させるには、メンブレン、スーパーリークともまだまだ改善の必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Magnetically Induced Spin Flow and Relaxation in Superfluid ^3He A₁, A. Yamaguchi, Y. Aoki, K. Suzuki, H. Ishimoto and H. H. Kojima, J. Phys. : Conference Series 150, 032122 (1-4) (2009). 有

Superfluidity of Liquid ^3He in Nanometer sized Porous Alumina, A. Yamaguchi, T. Hayakawa, H. Nama and H. Ishimoto, J. Phys.: Conference Series 150, 032122 (1-4) (2009). 有

Spin-polarized Superfluid ^3He A₁, H. Kojima and H. Ishimoto, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 111001 (1-14) (2008). 有

Large Boundary Magnetism and Superfluidity of Liquid ^3He in Nanometer-sized Porous Aluminum, A. Yamaguchi, T. Hayakawa, H. Nema and H. Ishimoto, J. Low Temp. Phys. 150, 336-341 (2008). 有

Spin Pumping Effect in Superfluid ^3He A₁, A. Yamaguchi, S. Kobayashi, H. Ishimoto and H. Kojima, J. Low Temp. Phys. 148, 513-518 (2007). 有

〔学会発表〕(計 20 件)

超流動 ^3He A₁ 相におけるスピンプンピング実験 II, 山口明, 荒井美穂, 村川智, 青木悠樹, 鈴木邦彦, 石本英彦, 小島東生, 日本物理学会第64回年会, 立教大学, 2009年3月30日

強磁場中における超流動 ^3He の横波音響応答 II, 村川智, 山口明, 荒井美穂, 田村雄太, 和才将大, 青木悠樹, 石本英彦, 野村竜司, 奥田雄一, 日本物理学会第64回年会, 立教大学, 2009年3月30日

^3He Spin Pump, A. Yamaguchi, H. Ishimoto and H. Kojima, American Physical Society, March meeting 2009, Mar. 18, 2009, Pittsburg.

Surface State Spectroscopy of Superfluid ^3He under High Magnetic Field, S. Murakawa, A. Yamaguchi, A. Arai, Y. Tamura, M. Wasai, Y. Aoki, K. Suzuki, H. Ishimoto, R. Numura and Y. Okuda, Super-Clean Materials Annual Meeting, Dec. 21, 2008, Nara.

Mechanical Spin Pump Experiment in Superfluid ^3He A_1 , A. Yamaguchi, A. Arai, S. Murakawa, Y. Aoki, K. Suzuki, H. Ishimoto and H. Kojima, Super-Clean Materials Annual Meeting, Dec. 21, 2008, Nara.

強磁場中における超流動 ^3He の横波音響応答 I, 村川智, 山口明, 荒井美穂, 田村雄太, 和才将大, 青木悠樹, 石本英彦, 野村竜司, 奥田雄一, 日本物理学会秋の分科会, 岩手大学, 2008年9月22日

超流動 $^3\text{He}A_1$ 相におけるスピンプンプ実験, 山口明, 青木悠樹, 鈴木邦彦, 石本英彦, 小島東生, 日本物理学会秋の分科会, 岩手大学, 2008年9月22日

Mechanical Spin Pumping in Superfluid ^3He A_1 , A. Yamaguchi, Y. Aoki, K. Suzuki, H. Ishimoto and H. Kojima, Ultra-Low Temperature Symposium, Aug. 16, 2008, London.

Transverse Acoustic Impedance Measurements in Superfluid ^3He A_1 and A_2 Phases, S. Murakawa, A. Yamaguchi, Y. Tamura, M. Wasai, Y. Aoki, H. Ishimoto, R. Nomura and Y. Okuda, Ultra-Low Temperature Symposium, Aug. 16, 2008, London.

Mechano-Magnetic Effect in Superfluid ^3He A_1 , Y. Aoki, A. Yamaguchi, K. Suzuki, H. Ishimoto and H. Kojima, XXV International Conference on Low Temperature Physics, Aug. 7, 2008, Amsterdam.

Magnetically Induced Spin Flow and Relaxation in Superfluid ^3He A_1 , A. Yamaguchi, Y. Aoki, K. Suzuki, H. Ishimoto and H. Kojima, XXV International Conference on Low Temperature Physics, Aug. 7, 2008, Amsterdam.

スピンプンプによる高磁場下における超流動 ^3He A_1 相のスピンの緩和, 青木悠樹, 鈴木邦彦, 山口明, 石本英彦, 小島東生, 日本物理学会第 63 回年会, 近畿大学, 2008年3月26日

磁気噴水効果による高磁場下における超流動 ^3He A_1 相のスピンの緩和, 鈴木邦彦, 青木悠樹, 山口明, 石本英彦, 小島東生, 日本物理学会第 63 回年会, 近畿大学, 2008年3月26日

超流動 ^3He A_1 相におけるスピンの緩和測定とマイノリティスピンの凝縮対の観測, 山口明 若手奨励賞授賞記念講演, 日本物理学会第 63 回年会, 近畿大学, 2008年3月24日

Spin Pumping in Superfluid ^3He in High Field, H. Kojima, K. Suzuki, Y. Aoki, A. Yamaguchi, and H. Ishimoto, American Physical Society, March meeting 2008, Mar. 12, 2008, New Orleans.

Spin Relaxation in Superfluid ^3He A_1 , K. Suzuki, A. Yamaguchi, Y. Aoki, H. Ishimoto, and H. Kojima, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, Oct. 30, 2007, Gifu.

Magnetic -Fountain Effect and Minority Spin Condensate in ^3He A_1 , A. Yamaguchi, S. Kobayashi,

K. Suzuki, Y. Aoki, H. Ishimoto and H. Kojima, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, Oct. 29, 2007, Gifu.

強磁場下における超流動 ^3He A_1 相のスピンの緩和 IV, 山口明, 鈴木邦彦, 石本英彦, 小島東生, 日本物理学会第 62 回年会, 北海道大学, 2007年9月24日

Large Boundary Magnetism and Superfluidity of Liquid ^3He in Nanometer-sized Porous Alumina, A. Yamaguchi, T. Hayakawa, H. Nema and H. Ishimoto, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Aug. 1, 2007, Kazan.

Magnetic Fountain Effect in Superfluid ^3He , H. Kojima, A. Yamaguchi, S. Kobayashi, K. Suzuki and H. Ishimoto, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Aug. 1, 2007, Kazan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石本 英彦 (ISHIMOTO HIDEHIKO)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号: 60044773

(2) 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

(3) 連携研究者

Haruo Kojima, Serin Physics Laboratory,
Rutgers University, Professor