

## 超流動ヘリウム 3-A<sub>1</sub> 相におけるスピンの緩和とその緩和

物質系専攻 66126 鈴木 邦彦

指導教員 石本 英彦 (教授)

キーワード：ヘリウム 3，超流動，核スピン，スピン緩和，超低温実験

### 【背景】

液体 <sup>3</sup>He は核スピン 1/2 をもつ Fermi 液体で約 2 mK で超流動状態になることが知られている。<sup>3</sup>He 超流動はスピン軌道部ともに三重項の P 波の対形成をしていて多様な状態をとることができる。近年、重い電子系の超伝導体や酸化物超伝導体において非 S 波超伝導の研究が進められており、<sup>3</sup>He の P 波超流動の研究を通してこれらの超伝導に対する理解にも繋がるものと期待される。多様な状態をとる <sup>3</sup>He の超流動相であるが、ゼロ磁場中では対称性の異なる A 相と B 相が知られている。さらに磁場中では限られた温度域で Normal 相と A(A<sub>2</sub>)相との間に A<sub>1</sub> 相と呼ばれる相が現れる (図.1)。A<sub>1</sub> 相には磁場に平行なクーパー対しか存在せず、超流動成分は完全に偏極しているといわれている。従ってこの相ではスピン流と質量流は全く同じものとなる。我々の研究室では磁気噴水効果を利用し <sup>3</sup>He-A<sub>1</sub> 相のスピン密度緩和を測定してきた[1]。磁気噴水効果とは超流動成分しか通り抜けられないような細い通路(スーパーリーク)によって結合された容器間に磁場勾配を印加することで圧力差

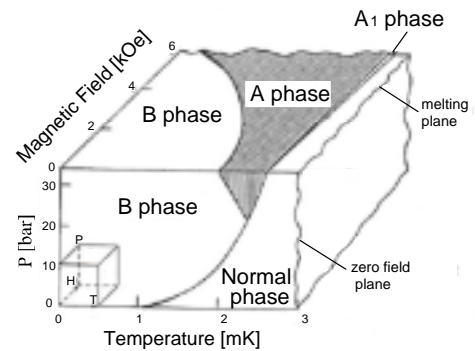


図.1 <sup>3</sup>He の相図

$\frac{1}{\rho} \nabla P = \frac{\gamma \hbar}{2m} \left[ \nabla H - \left( \frac{\gamma}{\chi} \right) \nabla S \right]$  が生じる A<sub>1</sub> 相特有の現象である。ここで H, S,  $\gamma$ ,  $\chi$  は磁場勾配, スピン密度勾配, 磁気回転比, 帯磁率である。本論分では最近の新しいセルを用いた結果を報告する。また、機械的にスピン流を起こす Spin Pumping Effect の測定も同時に行い、結果を比較する。

### 【実験】

図.2 に測定に用いたセルの概略を示す。Reservoir Chamber, Detector Chamber と呼ばれる二つの容器の間は厚さ 18 μm のスーパーリークで結ばれている。容器間の差圧を測定するために、厚さ 6 μm の Mylar でつくられたダイアフラム型圧力計が設置されている。容器間に磁場勾配を印加するとスーパーリークを通して超流動成分が流入するためにダイアフラムが変位し、電極間の電気容量が変化する。図.3 は 21 bar, 8 Tesla における磁気噴水効果の測定例である。時刻ゼロにおいて磁場勾配を印加するとダイアフラムが変位し、その後磁場勾配を印加し続けても  $\exp(-t/\tau)$  に従って平衡状態に戻っていく。これは A<sub>1</sub> 相のスピン密度が緩和し、 $(\gamma/\chi) S$  が H に緩和することに起因している。図.4 は図.3 と圧力など同じ条件下での Spin Pumping Effect の測定結果である。時刻ゼロまではダイアフラムに 30 V の電圧が印加し、時刻ゼロで 0 V にしている。電圧を取り除くとダイアフラムはある位置までは瞬間的に変位し、その後比較的ゆっくりと緩和する。この部分の緩和はスピンの緩和に由来していると思われる。

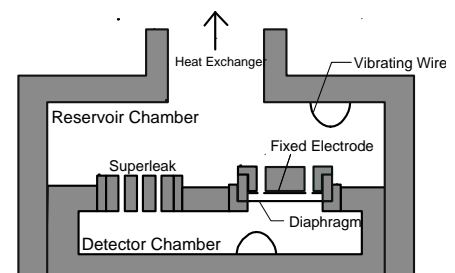


図.2 測定セルの概略図

また、両容器には Vibrating Wire Viscometer が設置されている。超流動  $^3\text{He}$  の粘性は強い温度依存性を示し、相転移温度において明確な折れ曲がりを出すために液体の温度を直接計測する温度計として働く。今回の実験は超低温、強磁場冷凍機の均一な磁場の下で磁気噴水効果は 8 Tesla, Spin Pumping Effect は 13 Tesla までの強磁場において測定された。

【結果】

本研究室における以前の測定では、ごく小さい温度変化のうちに磁気噴水効果の緩和時間が 2 倍程度変化する様子が観測されていた。Vibrating Wire Viscometer を用いてセル内の温度勾配を測定したところ、容器間に 100  $\mu\text{K}$  程度の温度差があることが判明した。容器間にできていた相界面が、このような温度依存性を示す原因であると考えられた。セルの材質を Stycast から Macor に変えるなど発熱を抑える工夫をしたところ容器間の温度差は数  $\mu\text{K}$  に抑えられ、温度がほぼ均一な状態での測定が可能になった。

図.5 は 21 bar での磁気噴水効果におけるダイアフラムの緩和時間の温度、磁場依存性を示したものである。横軸に規格化温度を用いている。グラフ左側が低温側  $A_1 - A_2$  の転移点 ( $T_{c2}$ ) であり、右側が高温側 Normal -  $A_1$  の転移点 ( $T_{c1}$ ) に対応する。緩和時間の最も大きな特徴として非常に強い温度依存性が挙げられる。 $T_{c2}$  付近では 1 sec 以下で非常に早く緩和しているのに対して  $T_{c1}$  付近では最大 30 sec 近いゆっくりとした緩和を見せている。以前の実験では温度依存性に急激な変化があったがセルの発熱を抑えた今回の実験ではスムーズな温度依存性を示している。磁場依存性については、高磁場ほど緩和時間が長くなる傾向が見てとれる。図.6 は Spin Pumping Effect における緩和時間である。磁気噴水効果と似たような緩和時間を示しており、勾配磁場により起こしたスピン流と機械的に起こしたスピン流がほぼ同じものであると確認できたといえる。ただし磁気噴水効果では磁場が強くなるほど緩和時間が長くなっていったが、Spin Pumping Effect では 5 Tesla 以上で緩和時間が飽和しているように見える。両者の 8 Tesla での実験結果の差異の原因は今のところわかっていない。

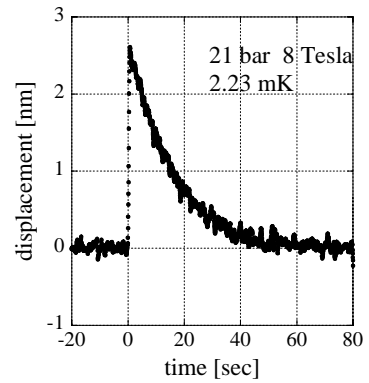


図.3 磁気噴水効果の測定例

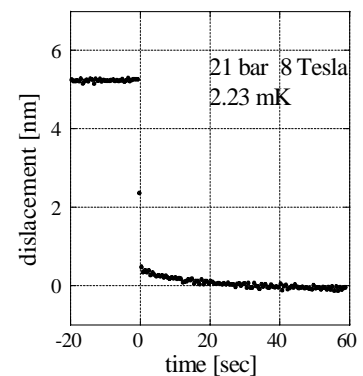


図.4 Spin Pumping Effect の測定例

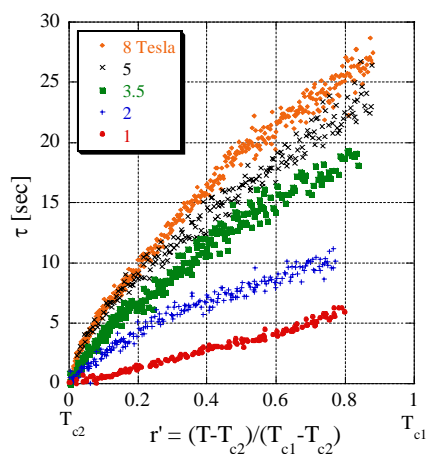


図.5 緩和時間の温度、磁場依存性 (磁気噴水効果, 21 bar)

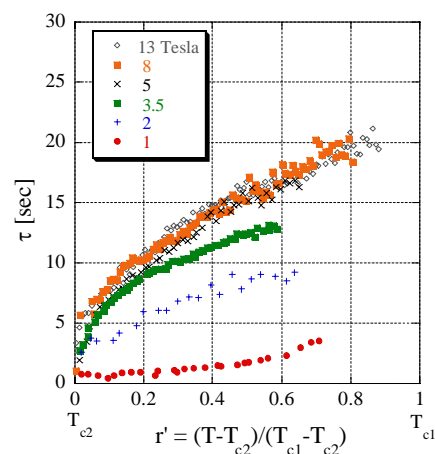


図.6 緩和時間の温度、磁場依存性 (Spin Pumping Effect, 21 bar)

### 【考察】

ダイアフラムの緩和時間は、常流動成分も多少スーパーリークを通過すること等を考慮した hydrodynamics を解くことで、スピンの緩和時間  $T_1$  に変換することができる。図.7 は磁気噴水効果におけるスピン緩和時間の逆数（スピン緩和率）を規格化温度に対し両対数でプロットしたものである。スピン緩和率が規格化温度の冪乗で変化するような、非常に強い温度依存性をもつことがわかる。また、磁場によらずほぼ一定の冪乗で緩和率が変化することは何か普遍的な緩和機構の存在を示唆しているものといえる。Spin Pumping Effect でも似たような結果が得られた。

$A_1$  相におけるスピン緩和の原因として考えられるのが Minority Spin Condensate(M.S.C.)の成長である。M.S.C.とは  $A_1$  相中で磁場に反平行なスピンをもつクーパ対からなる凝縮体であり、理論的には20年ほど前からその存在が予想されていた[2]。M.S.C.が存在するものとして Leggett-Takagi によるスピン緩和の理論[3]を用いて緩和時間を求めると、実験で観測された緩和時間と定性的に良い一致を示した(図.8)。このことより、M.S.C の存在が実験的に示されたと考えられる。

### 【まとめ】

超流動  $^3\text{He}$ - $A_1$  相におけるスピン緩和の様子を磁気噴水効果、Spin Pumping Effect を用いて測定した。測定はセル内の磁場、温度が均一で相境界のない条件下で行われた。スピン緩和時間は非常に強い温度依存性を持ち、低温側で素早く緩和する。また磁場が高いほど緩和時間が長くなる傾向にある。スピン流を磁氣的に起こす磁気噴水効果と、機械的に起こす Spin Pumping Effect でほぼ同じ緩和時間が観測された。スピン緩和の原因として M.S.C.の存在を仮定してスピン緩和時間を計算したところ実験結果と良く一致し、 $A_1$  相における M.S.C.の存在を実証する実験事実が得られたものと考えられる。

### 【参考文献】

- [1] A. Yamaguchi, S. Kobayashi, H. Ishimoto, H. Kojima, Nature, **404**, 909 (2006)
- [2] H. Monien, L. Tewordt, J. Low. Temp. Phys. **60**, 323 (1985)
- [3] A. Leggett, S. Takagi, Ann. Phys. **106**, 79 (1977)

### 【学会発表】

日本物理学会 第63回年次大会 鈴木邦彦, 青木悠樹, 山口明, 石本英彦, 小島東生  
「磁気噴水効果による高磁場下における超流動  $^3\text{He}$ - $A_1$  相のスピン緩和」

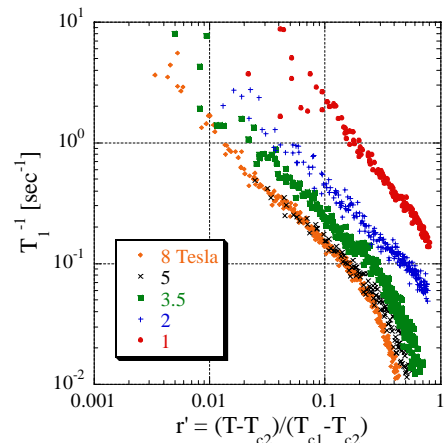


図.7 磁気噴水効果におけるスピン緩和率 (21 bar)

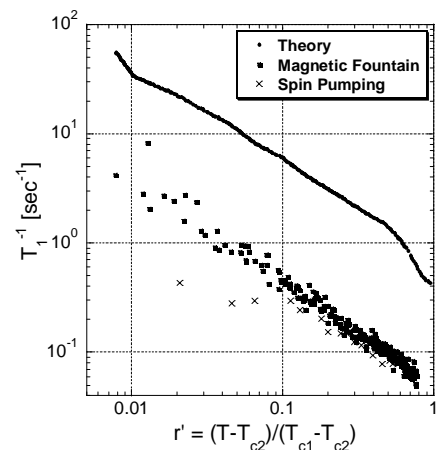


図.8 スピン緩和率の比較 (21 bar 2 Tesla)