

ナノポーラスアルミナに閉じ込められた超流動ヘリウム3

物質系専攻 66137 早川 貴裕

指導教員: 石本 英彦 (教授)

キーワード: 超流動、ヘリウム3、制限空間、核磁気共鳴、極低温

【背景】

超流動ヘリウム3をそのコヒーレンス長程度の狭い空間に閉じ込めると何が起こるのだろうか。並行平板 [1]や細孔 [2]等の制限空間を用いた過去の実験において、超流動転移温度 T_c 、AB転移温度 T_{AB} の抑制等、制限空間中超流動ヘリウム3が、バルク空間中とは異なる性質を示すことが報告されている。また、制限空間中では境界条件の影響を強く受けるため、相を規定するベクトルの空間分布(テクスチャー)は、閉じ込められた空間に特有の構造をとること等も分かっている。さらに、理論的にPolar相等の新たな量子相が現れる可能性が示唆される等 [3]、大変興味深い対象である。

そこで、本研究では孔径100 nmの細孔を持つポーラスアルミナディスク [4]を用い、細孔中液体ヘリウム3の連続波核磁気共鳴(cw-NMR)測定を、様々な圧力下約0.5 mKまで行った。超流動ヘリウム3のコヒーレンス長は、圧力(0~3.4 MPa)によって50~10 nmと大きく変化するため、選択した孔径は超流動ヘリウム3のサイズ効果を研究するのに適していると言える。また、過去の実験で用いられた最小の細孔は孔径300 nmのものであるため、今回の実験では液体ヘリウム3の制限空間中での性質がより顕著に現れる可能性がある。

【実験】

実験セルは、85枚のAnoporeメンブレンによって構成されている(図1)。Anoporeメンブレンは、直径13 mm、厚さ60 μm の Al_2O_3 素材のディスクで、方向の揃った公称孔径100 nmの多数の細孔がこのディスクを貫いている。ここで、各ディスク間に厚さ12.5 μm のリング状のカプトンシートをスペーサーとして挿入し、実験セル内の空間をよりよく制御する工夫をしている。実験セル内の空間は、細孔内とディスク間の空間からなっている。窒素BET法により得られたディスクの空孔率は約26.25%だったので、これらの空間の体積比は約1.0:0.7となる。

液体ヘリウム3は希釈冷凍機と核断熱消磁冷凍機を組み合わせで冷却され、温度計はヘリウム3融解圧曲線温度計(MCT)とプラチナNMR温度計を温度領域によって使い分けた。

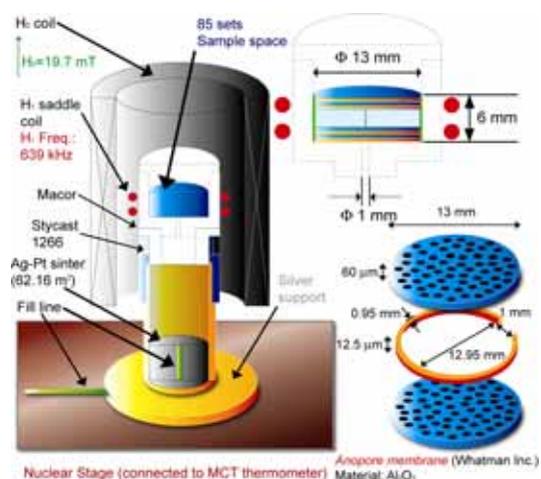


図1 実験セルの模式図

【結果】

図2は、1.79 MPaの圧力下、昇温過程において測定したNMRシグナルの温度変化の様子である。縦軸は吸収強度を表しており、横軸はラーマー周波数からの周波数シフトに対してプロットしてある。温度変化の様子を示すために、縦軸は各温度でシフトしてあり、上に行くほど温度が低い。図中の数字は、転移温度 $T_c'=2.111$ mKを用いて規格化したそれぞれの温度を示す。 $T/T_c'=1$ 以上の高温領域で、液体ヘリウム3は常流動状態にあり、ラーマー周波数の位置にピークを持つ。図中で色分けした $T/T_c'=1$ の点で周波数シフトが始まり、さらに低い温度領域でダブルピークが観

測された。

シグナル強度から求めた磁化と、ピークの周波数シフトを温度に対してプロットしたものが図3である。ダブルピークが見える温度領域では、2つのピークの周波数シフトをプロットしてある。磁化に関しても、シグナルの分離がよい低温領域では、2つのローレンツ曲線を用いることによってシグナルをフィッティングし、2つのシグナルの磁化をそれぞれ求めている。ここでは、昇温過程と降温過程において測定したデータを同時に載せた。T/T_c'=1で磁化が減少し始めた。これらの変化が観測された温度、磁化と周波数シフトの温度変化の様子と、バルク液体ヘリウム3の相図との比較から、T/T_c'=1において、液体ヘリウム3でB相への超流動転移が起きたと考えられる。

B相と思われる温度領域のダブルピークの起源として、細孔中とディスク間の液体ヘリウム3が考えられる。周波数シフトの温度変化を見ると、低周波数側のピークのシフトの開始温度が、高周波数側のピークのシフトの開始温度より、0.05T_c'程低い。制限空間中ではT_c'の抑制が予想されるため、低周波数側のピークが細孔中液体のシグナルではないかと考えられる。さらに、磁化の温度変化の様子を見ると、低温領域で高周波数側のシグナルの磁化が温度の減少と共に減少しているのに対し、低周波数側のシグナルの磁化は減少していない。これは、細孔中液体が磁化の減少を示さないA相にあることを示唆している。この圧力下では、バルク液体はA相にならないが、制限空間中ではA相が安定化し、孔径100nmという非常に狭い空間中では、AB転移が起こらないと考えられる。

0.34、0.85MPa下でも同様の結果が得られている。上で述べた細孔中とディスク間の液体の転移温度差ΔT_c'の圧力依存性を、図4に示した。低圧側で抑制が大きいのが、これは、コヒーレンス長が長い低圧側で、制限空間中の性質がより強く現れたのではないかと考えられる。

次に、2つのシグナルの強度比に関して述べる。A相的信号とB相的信号の強度比は、1.0:8.0程度であるが、これは細孔とディスク間の空間体積比から予想される信号比(約1.0:0.7)と異なる。図5は、磁化測定から得られたA相的信号と、見積もりから得られる細孔中液体がすべてA相とした場合の磁化の比の圧力依存性である。いずれの圧力下においても、見積もりの20%程の磁化しか観測されていない。これは、図6のようにB相が細孔中に大きく浸入していることを示している。

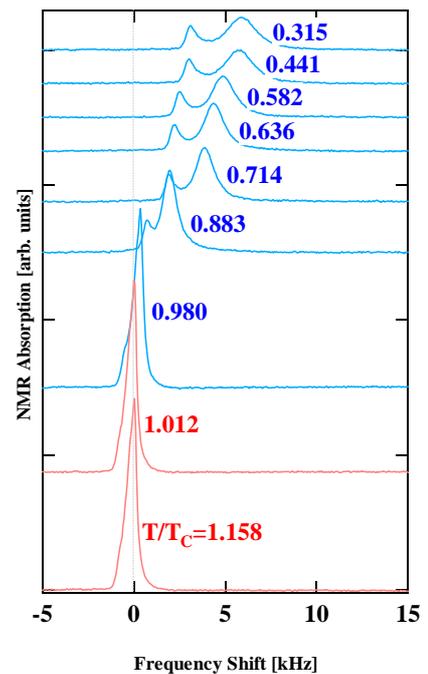


図2 1.79 MPa下、昇温過程で得られたNMRシグナルの温度変化の様子

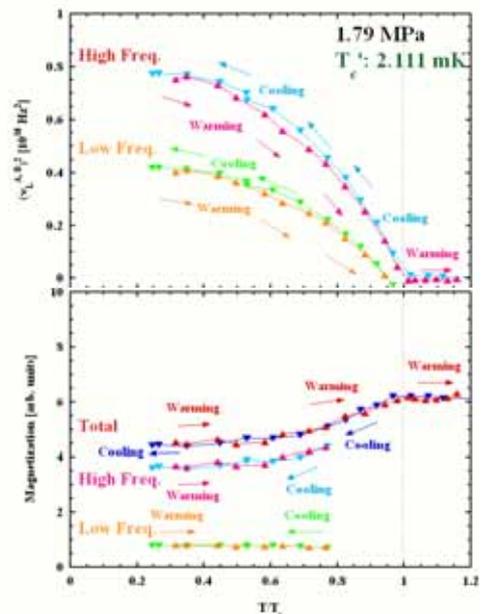


図3 1.79 MPa下における周波数シフトと磁化の温度変化の様子

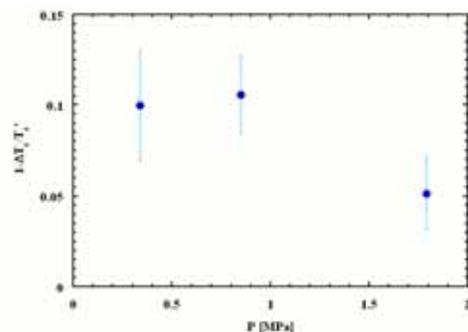


図4 ΔT_c'の圧力依存性

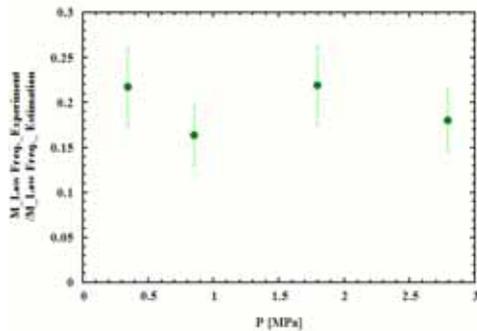


図 6 磁化測定から得られる A 相の磁化と、体積から予想される細孔中液体の磁化の比の圧力依存性

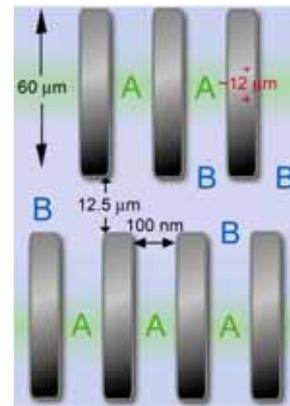


図 5 実験セル中液体の超流動状態の模式図

【まとめと今後の課題】

孔径 100 nm の細孔中超流動ヘリウム 3 は、低圧領域においても A 相にあり、低温領域でも AB 転移は起きなかったと考えられる。また、 ΔT_c は圧力依存性を持つが、コヒーレンス長の長い低圧領域において抑制が大きく、制限空間中の性質がより強く現れている可能性がある。今後の展開として、磁場方向を変えて周波数シフトの変化を調べることや、さらに孔径の小さな細孔を用いたときの様相を調べることが考えられる。

【参考文献】

1. K. Kawasaki *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **93**, 105301 (2004); S. Miyawaki *et al.* *Phys. Rev. B* **62**, 5855 (2000); M. R. Freeman and R. C. Richardson, *Phys. Rev. B* **41**, 11 011 (1990); M. R. Freeman, R. S. Germain, E. V. Thuneberg and R. C. Richardson, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 596 (1988)
2. M. T. Manninen and J. P. Pekola, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 812 (1982); M. T. Manninen, J. P. Pekola, R. G. Sharma and M. S. Tagirov, *Phys. Rev. B* **26**, 5233 (1982); V. Kotsubo, K. D. Hahn and J. M. Parpia, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 804 (1987)
3. Y.-H. Li and T.-L. Ho, *Phys. Rev. B* **38**, 2362 (1988); L. H. Kjädman, J. Kurkijävi, and D. Rainer, *J. Low Temp. Phys.* **33**, 577 (1978)
4. Anopore, product of Whatman Inc.

【学会・研究会等発表】

1. 文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」平成 18 年度研究成果報告会「Boundary Magnetism and Superfluidity of Liquid ^3He in Nanometer-sized Porous Alumina」T. Hayakawa, A. Yamaguchi, H. Nema and H. Ishimoto
2. 第 61 回 日本物理学会春季大会「孔径 20 nm ポーラスアルミナ中の液体 ^3He の cw-NMR」早川貴裕、山口明、根間裕史、石本英彦
3. 第 62 回 日本物理学会年次大会「孔径 100 nm ポーラスアルミナ中の液体 ^3He の cw-NMR」早川貴裕、山口明、根間裕史、石本英彦
4. International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007) 「Superfluidity of Liquid ^3He in Nanometer-sized Porous Alumina」Takahiro Hayakawa, Akira Yamaguchi, Hirofumi Nema and Hidehiko Ishimoto
5. 4 特定領域合同研究会「超伝導が拓く物性科学の最前線」「ナノメートルサイズポーラスアルミナ中液体 ^3He の超流動」早川貴裕、山口明、根間裕史、石本英彦