

計画研究 B01

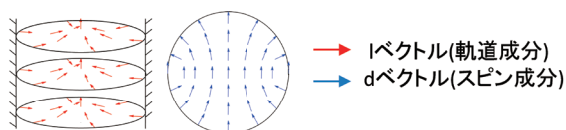
## 「スピン三重項超流動体の新奇界面現象」の最近のトピックス

石川 修六／大阪市立大学 大学院 理学研究科 教授

B01 班では、スピン三重項超流動体である超流動  $^3\text{He}$  を主な研究対象とし、液体界面での新奇現象や秩序変数の制御により発現する現象の探索と物理的解釈、また同じスピン三重項状態であるカイラル超伝導物質で起こる現象との類似性・普遍性の探求、さらにボース-アインシュタイン凝縮状態や冷却原子系の研究を通して、トポロジカル量子現象の研究を進めている。以下に今年度得られたトピックスをまとめる。

### 1. 回転する細管容器中の超流動 $^3\text{He}$ -A 相における固有角運動量の検出

超流動  $^3\text{He}$ -A 相のクーパー対は、両極にノードを持つ軸対称なギャップ構造を有し、軸方向に大きさ  $\hbar$  の軌道角運動量（固有角運動量；IAM）を持つ。軌道角運動量の向きが揃った系はカイラル超流体となる。超流動発見以来の問題は、この場合に固有角運動量が巨視的な量として検出できるかどうかである。数多くの理論的推察がなされ、巨視的固有角運動量が存在するという結論と巨視的な量ではないという結論の両極端な状態であった。この問題に決着をつけようとする実験が、昨年より、石川、國松、久保田により東大物性研で行われてきた。直径 0.1mm の 1 本の細管容器からなる試料セルを用意し、その中に閉じ込めた超流動  $^3\text{He}$  -A 相の cw-NMR 実験を行ってきた。昨年度、回転下で B 相から A 相に昇温させることによって、Mermin-Ho (hyperbolic) 型の秩序変数の織目構造（テクスチャー）（図 1）が安定に形成できることを示した [1]。回転角速度  $\Omega$  において、回転系での自由エネルギー  $E' = E - \Omega \cdot L$  ( $E$ : 静止下での自由エネルギー、 $L$ : 静止下での全角運動量) を最小にするようにテクスチャーが変形し、その変形度合いは一定の角速度のときに観測されるスピン波信号の核磁気共鳴周波数に反映されると予想されてきた [2]。今年度当初から、昨年度と同様な方法で Mermin-Ho テクス



Mermin-Ho hyperbolic

図 1 : Mermin-Ho(hyperbolic) テクスチャー

チャーを得て、AB 転移温度直上の 2.03mK において、スピン波信号の共鳴周波数の回転速度変化を測定した。図 2 に示したようにスピン波の共鳴周波数の回転応答は、巨視的軌道角運動量が観測された場合の計算結果（高木【D03 班公募研究】による）と良い一致を示した。今後のデータの集積によって、積年の問題に終止符を打てる見通しが立ってきた。



図 2 :  $\Omega = 5\text{rad/s}$  で作った M-H テクスチャーのサテライト共鳴周波数の回転速度変化。縦軸は規格化された周波数。赤色、青色実線はそれぞれ巨視的 IAM が存在しないとき、するときの理論計算結果。

### 2. エアロジェル／超流動 $^3\text{He}$ 界面でのスピン帯磁率異常

超流動  $^3\text{He}$  を満たした容器の一部にエアロジェルを導入すると、エアロジェルの不純物効果を利用して超流動を部分的に壊すことができる。その結果得られる不均一系は、不純物を含む "dirty" な常流動体 (DN) とスピン三重項超流動体 (TS) の接合系と見ることができる [3,4]。東谷と竹内は、エアロジェルと超流動  $^3\text{He}$ -B 相で構成される DN / TS 系のスピン帯磁率を数値計算し、近接効果によってエアロジェル中に誘起される奇周波数  $s$  波クーパー対に起因して、エアロジェル／超流動  $^3\text{He}$  界面付近の局所スピン帯磁率にピーク構造が現れることを見いだした（図 3）。石川はエアロジェルを用いた実験を昨年度から継続して行い、磁化の温度変化を調べている。図 4 に示したのは、圧力 24bar での cw-NMR による磁化の測定結果である。非常に低温度で磁化の増加が観測されているが、表面固体  $^3\text{He}$  等に因る可能性があり、東谷等が指摘する奇周波数クーパー対の出現に起因する現象かどうかを確定することは出来ていない。

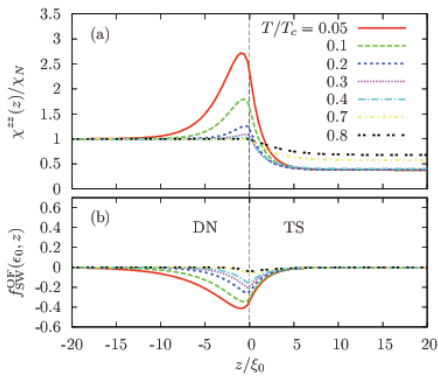


図3：エアロジェルと超流動<sup>3</sup>He-B相で構成されるDN / TS系の (a) 局所スピン帯磁率と (b) 奇周波数  $s$  波クーパ対振幅の空間依存性。エアロジェルは  $z < 0$  の領域にある。低温でエアロジェル層中に局所スピン帯磁率のピークが現れる。このピーク構造は奇周波数  $s$  波クーパ対によって生み出される。

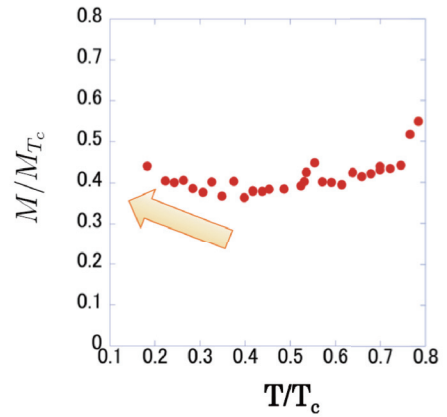


図4：エアロジェル界面近傍の磁化の温度変化

### 3. 超流動<sup>3</sup>Heの表面束縛状態に対する磁気効果

超流動<sup>3</sup>He-B相の表面束縛状態は、壁が十分滑らかなときに運動量に線形な分散関係（マヨラナコーン）を持つことが、横波音響インピーダンス測定により明らかになっている [5]。マヨラナコーンはB相の持つ時間反転対称性により、ゼロエネルギー状態が保護されるために生じる。一方で双極子磁場より大きな磁場をかけると、時間反転対称性が破れてマヨラナコーンにエネルギーギャップが生じるはずである。野村はこのトポジカル相転移を観測するために、磁場中の横波音響インピーダンス測定を進めるとともに、平行平板中のNMR実験の準備も進めている。マヨラナコーンのギャップ生成は、表面帯磁率の増加として観測されるはずである。両測定は、ギャップ生成をそれぞれ力学的応答、磁氣的応答として捉えるもので、相補的観測となる。

### 4. 超流体におけるブレーン対消滅とタキオン凝縮

2種類のボース気体からなる2成分ボース・アインシュタイン凝縮体（BEC）は、異成分間の斥力相互作用が強くなると2相に相分離し、2相間にドメイン壁（界面）が安定に実現する。竹内は新田【D03 班公募研究】等と共同で、超弦理論におけるブレーンの対消滅によるタキオン凝縮と類似する現象が、2成分BEC中の界面の対消滅過程において引き起こされることを理論的に見出した [6]。ブレーンに見立てた3次元空間中の界面の対消滅過程は、界面に沿った‘射影’2次元空間において強磁性相転移のような自発的対称性の破れを引き起こす（図5）。一方、ランカスター大

学の超低温物理グループは、ブレーンに見立てた超流動<sup>3</sup>HeのA相とB相の界面を対消滅させた後、秩序変数の空間変調による構造物が取り残されるという興味深い実験結果を得ている [7]。この現象の理論的解明は今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] “Textures of Rotating Superfluid <sup>3</sup>He -A in a Single Narrow Cylinder”, T. Kunimatsu, H. Nema, R. Ishiguro, M. Kubota, T. Takagi, Y. Sasaki, and O. Ishikawa, to be published in J. Low Temp. Phys.
- [2] “Mermin-Ho Texture and Its Transverse NMR Spectrum in a Rotating Cylinder”, T. Takagi, J. Phys. Soc. Jpn. 65, 1722 (1996).
- [3] “Proximity Effect between a Dirty Fermi Liquid and Superfluid <sup>3</sup>He”, S. Higashitani, Y. Nagato, and K. Nagai, J. Low Temp. Phys. 155, 83 (2009).
- [4] “Theory of the Proximity Effect in Junctions with Unconventional Superconductors”, Y. Tanaka and A. A. Golubov, Phys. Rev. Lett. 98, 037003 (2007).
- [5] “Surface Andreev bound states of superfluid <sup>3</sup>He and Majorana Fermions”, Y. Okuda and R. Nomura J. Phys.: Cond. Matt. 24, 343201-1-19 (2012).
- [6] “Tachyon Condensation Due to Domain-Wall Annihilation in Bose-Einstein Condensates”, H. Takeuchi, K. Kasamatsu, M. Tsubota, and M. Nitta, Phys. Rev. Lett. 109, 245301 (2012).
- [7] “Relic topological defects from brane annihilation simulated in superfluid <sup>3</sup>He”, D. I. Bradley, S.N. Fisher, A.M. Guenault, R. P. Haley, J. Kopu, H. Martin, G. R. Pickett, J. E. Roberts, and V. Tsepelin, Nat. Phys. 4, 46 (2008).

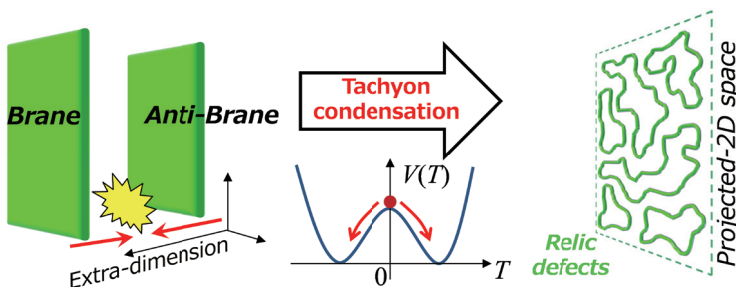


図5：二つの界面（BraneとAnti-Brane）の対消滅によるタキオン凝縮の概略図。射影2次元空間（Projected-2D space）においてタキオン場  $T$  の成長が自発的対称性の破れを引き起こす。