

超流動 $^3\text{He-A}_1$ におけるスピン・エントロピー波の異常減衰

東工大・理・奥田雄一

超流動 ^3He のA相は、外部磁場によって A_1 相と A_2 相にスプリットする。 A_1 相とは、磁場方向の磁気モーメントを有する ^3He 原子対のみが凝縮している、強磁性超流動相である。大変興味深い相であるが、スプリット幅が大変狭く、5テスラの磁場でもわずか300 μK しかないので、この相での実験は難しい。この相では、超流動密度は強磁性流体、常流動密度は常磁性流体であり、スピン成分とエントロピー成分がカップルした、大変ユニークなスピン・エントロピー波が存在する。常流動密度と超流動密度が位相を 180° ずらせて振動するいわゆる第2音波は同時にスピン密度波でもあり、この名称がつけられている。この波の存在は、M.Liu[1,2]によってrelative symmetry breakingの理論を $^3\text{He-A}_1$ に適用することで最初に予言された。二流体モデルと内部磁場の揺らぎより次の方程式群が得られる。

$$\rho = \rho_n + \rho_{s\uparrow} \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_n + \rho_{s\uparrow} \left(\frac{\hbar}{2m} \right) \quad (2)$$

$$\omega = \gamma(\gamma S / \chi - H) \quad (3)$$

$$\dot{\rho} + \nabla(\rho_n v_n + \rho_{s\uparrow} v_{s\uparrow}) = 0 \quad (4)$$

$$\dot{\rho\sigma} + \nabla(\rho\sigma v_n) = 0 \quad (5)$$

$$\dot{S} + \nabla(S_n v_n + \rho_{s\uparrow} \frac{\hbar}{2m} v_{s\uparrow}) = 0 \quad (6)$$

$$\dot{v}_{s\uparrow} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \left(\frac{S}{\rho} - \frac{\hbar}{2m} \right) \nabla \cdot \omega \quad (7)$$

$$\dot{v}_n = -\frac{1}{\rho} \nabla P - \frac{\rho_{s\uparrow}}{\rho_n} \sigma \nabla T + \frac{\rho_{s\uparrow}}{\rho_n} \left(-\frac{S_n}{\rho} + \frac{\hbar}{2m} \right) \nabla \cdot \omega \quad (8)$$

これらの連立方程式からスピン・エントロピー波の波動方程式が導出され、その音速は次式で与えられる。

$$C_{S/E}^2 = \frac{\rho_{s\uparrow}}{\rho_n} \frac{T\sigma^2}{C} + \frac{\rho_{s\uparrow}}{\rho_n} \left(\frac{\hbar}{2m} \right)^2 \frac{\rho\gamma^2}{\chi} \approx \frac{\rho_{s\uparrow}}{\rho_n} \left(\frac{\hbar}{2m} \right)^2 \frac{\rho\gamma^2}{\chi} \quad (9)$$

超流動 ^3He では、通常の第2音波の音速(9式の第一項)は $\sim \text{mm/s}$ のオーダーで大変小さく、またそのためダンピングが大変大きく、観測が困難である。しかしスピン・エントロピー波は、本質的にはスピン密度波であるので、その音速は $\sim \text{m/s}$ のオーダーになり(9式の第二項)、ダンピングも大変小さい。この波のユニークなところは、音響的な手法で励起、受信ができることである。M.Liuの理論直後に、CorrucciniとOsheroff[3]によって実

験的にこの波の存在が確認された。

我々は、出来るだけ高い磁場によって幅広い温度範囲、幅広い圧力範囲でこの波を詳細に調べる実験を始めた。我々は、 $3\mu\text{m}$ の細孔の開いたNucleporeを静電的に励振する（励振、受信）ことにより、この波の観測に成功した。共鳴法により、共鳴周波数と共鳴曲線の Q 値より、音速とダンピング係数を求めた。共鳴は8次まで観測された。常流動相と A_1 相との転移点 T_{c1} 及び A_1 相と A_2 相との転移点 T_{c2} の同定は、共鳴器内にとりつけた小型vibrating wire viscometerの信号で行った。 T_{c2} 直上での共鳴周波の自乗は外部磁場によるスプリット幅に比例しており、(8)式の示すとおりの ρ_s に比例していることが確認された。

音速の方は特に異常は観測されなかったが、振幅の方に異常が見られた。Corruccini & Osheroffの論文では、 T_{c2} 近傍では特に異常はなく、 $1\mu\text{K}$ の温度範囲で突然この波が消失すると報告されているが、22.5気圧、1~5テスラの条件下で測定したところ、明らかに A_1 相内にありながら、 T_{c2} に向かって、 Q 値はどんどん悪くなっていくことが見いだされた。 T_{c2} の上、 $\Delta T/(T_{c1}-T_{c2})\sim 20\%$ のところで、 Q 値は極大になり、 T_{c2} に向かって $Q^{-1}\propto 1/(T-T_{c2})^{1/2}$ というような発散が見いだされた。下図にこの波の Q 値が示されている。

この効果が A_1 相から A_2 相へ転移したときの異方的なテクスチャーベクトルの方向の変化によるものとは考えられない。ドライブレベルは十分低く、臨界速度に関連した非線形効果ではないことは確認されている。外部磁場の非一様性はずっと小さく、試料内部に A_2 相が存在して異常な緩和が起こっているという問題はない。また、別の共鳴器でも本質的に同じ現象が見られており、実験上のspuriousな効果ではない。

高木[4]の計算によれば、 T_{c2} 以下（ A_2 相）においては、ダウン磁気モーメント対が急速に成長してくるので、この領域ではスピン・エントロピー波は急激に減衰していく。しかし、本実験結果の場合、共鳴器内部に置かれたvibrating wire viscometerによってスピン・エントロピー波が A_1 相内で異常減衰していることは明らかである。我々は、Monien & Tewordt[5]が計算した極わずかのダウン磁気モーメント対の存在が、スピン・エントロピー波のダンピングに非常に敏感に効いているのではないかと考えている。彼らによれば、ダイポールエネルギーを考慮に入れて、 A_1 相の自由エネルギーを計算すると、約0.1%のダウン磁気モーメント対の存在が可能になる。0.1%という大変小さい量であるが、スピン・エントロピー波のダンピングにとっては大きな効果をもたらす可能性は十分にある。また、図に示されているように、 T_{c2} に向かって発散的にダンピングが大きくなっているが、[5]の計算でもダウン磁気モーメント対が、 T_{c2} に向かって発散的に増大している。残念ながら、定量的比較は現在のところ出来ない。また、ダウン磁気モーメント対の存在を示唆する実験が他にも報告されている。 A_1 相において磁気勾配による超流動の流れを起こす実験[6]で、 T_{c2} 近傍に近づくと超流動の流れが起こりにくくなるという類似の現象

が観測されている。この結果もダウン磁気モーメントの存在を示唆している。

以上、まとめると、我々は22.5気圧の超流 $^3\text{He-A}_1$ 相において、5テスラまでの外部磁場のもとで、スピン・エントロピー波を音響的手法で観測することに成功した。そして、そのダンピングが T_{c2} に向かって発散的に大きくなっていることを発見した。これは、Monien and Tewordtによって予測されたわずかのダウン磁気モーメント対の存在を示すものであると解釈している。

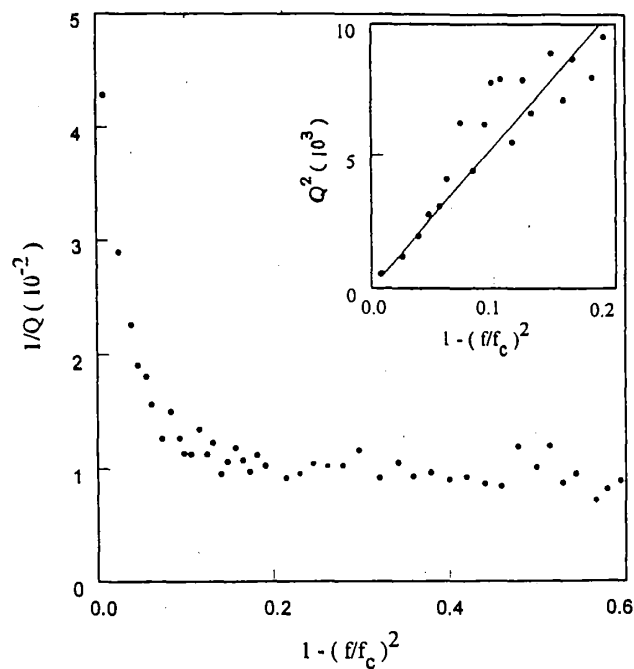


図1. T_{c2} 近傍のスピン・エントロピー波のQ-値. f_c は、 T_{c2} における共鳴周波数.

参考文献

- [1] M.Liu, Phys. Rev. Lett. 43, 1740 (1979).
- [2] M.Liu, Z.Pysik B40, 175(1980).
- [3] L.R.Corruccini and D.D.Osheroff, Phys. Rev. Lett. 45, 2029(1980).
- [4] H.Takagi, Progr.Theor.Phys.,65, 1145(1981).
- [5] H.Monien and L.Tewordt, J. Low Temp. Phys. 60, 323(1985).
- [6] R.Ruel and H.Kojima, Phys. Rev. B34, 6511(1986).