

超流動 ^3He の B 相薄膜のスピンド磁率の強い異方性

超流動 ^3He や酸化物高温超伝導体などの異方的超伝導・超流動状態が従来の s-波超伝導体と際だって異なる点は、境界効果が大きいことにある。異方的に拮がったクーパー対が境界を避けるように配置を変えることが原因であるが、さらに特徴的な性質として、境界近傍に局在した準粒子状態が生じることが知られている。バルク超伝導体の準粒子としては、ボゴリユボフ準粒子がありエネルギーギャップ Δ を持つことが知られているが、それに加えて、ギャップ Δ より低いエネルギーを持つ局在したアンドレーフ束縛状態と呼ばれる準粒子状態が境界近傍に存在する。最近、この境界束縛状態の存在は、バルク状態の位相幾何学的な性質と不可分な関係にあることが指摘され盛んに議論が行われている。

この状態を観測することができれば、その超伝導体が異方的超伝導状態にある証拠のひとつとなるが、最初に発見された異方的超流体である液体 ^3He は電的に中性なので、トンネル分光などの方法が使えず、理論的計算があるだけであった。しかし近年、東京工業大学の実験グループと広島大学の理論グループは、液体 ^3He 中に置いた水晶発振子の横波音響インピーダンスの温度・周波数依存性がアンドレーフ束縛状態の状態密度を反映した特徴的な振る舞いをしていることを明らかにした。さらに、最近広島大学の永井克彦氏は図 1 のように超流動 ^3He の B 相薄膜の帯磁率が強い異方性を持つことを理論的に示し、これがアンドレーフ束縛状態によるものであることを明らかにした。この研究成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2009 年 12 月号に掲載される。

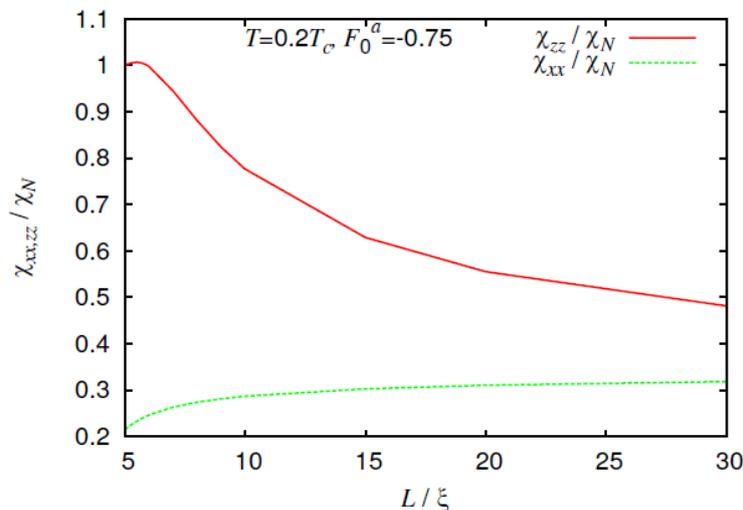


図 1 : 温度 $T=0.2T_c$ における液体 ^3He 薄膜の帯磁率の膜厚依存性 (T_c は常流動・超流動相移温度)。 χ_{zz} は磁場を膜に垂直にかけたときの帯磁率、 χ_{xx} は磁場を膜に平行にかけたときの帯磁率で、常流動状態の帯磁率 χ_N と比較している。 L は膜厚で ξ はコヒーレンス長。

超流動 ^3He の B 相は、軌道部分は p-波でスピン部分は $\uparrow\uparrow$, $\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow$, $\downarrow\downarrow$ の 3 重項のクーパー対を持つ BW 状態とよばれる状態である。この系のハミルトニアンは南部表示で書くと 4 行 4 列の行列になり、固有値方程式はディラック方程式と似た形をしていて、フェルミ面を境に正、負のエネルギー固有値を持つ。束縛状態もエネルギーギャップ Δ 以下に正、負のエネルギー固有値をもつ固有状態である。本研究では、BW 状態の自由表面に生じる束縛状態の波動関数が詳しく調べられた。その結果、束縛状態の準粒子はスピンを持たないフェル

ミ粒子であること、また、ちょうどフェルミ面上にあるゼロエネルギーの束縛状態は縮退しているため、生成演算子と消滅演算子が等価なマヨラナフェルミオンとみなせることが明らかになった。さらにスピン演算子の行列要素を調べると、スピン演算子で行列要素を持つのは表面に垂直なスピン成分だけであるという結果が得られ、しかも、正エネルギー解と負エネルギー解の間だけにしか行列要素が残らない。このことは、(1)磁場を表面に垂直にかけたときのみ、アンドレーフ束縛状態による磁化が生じる、即ち帯磁率に異方性があること、(2)その磁化はアンドレーフ束縛状態の対励起で生じること、を意味する。

薄膜では表面効果が支配的なので、束縛状態による帯磁率の異方性が観測できる可能性がある。そこで、実際の超流動 $^3\text{He-B}$ 相の薄膜を対象に、帯磁率の場所依存性を線形応答理論を用いて計算した結果を図2に示す。磁場を膜に垂直にかけた場合、垂直帯磁率 χ_{zz} は膜表面で増強され、表面から離れるとともにバルク値に近づいていることがわかる。一方、磁場を膜と平行にかけた場合の平行帯磁率 χ_{xx} には増強は見られず（図は略）、表面近傍のクーパ対の変形を反映し、むしろバルク値よりも小さくなっている。図1のグラフは、 χ_{zz} と χ_{xx} の膜全体の平均が、膜厚とともに変化する様子を表したもので、コヒーレンス長 ξ の十数倍程度の厚さでも異方性が極めて大きいことが分かる。この異方性が観測できれば、表面束縛状態の存在を確認できることになる。

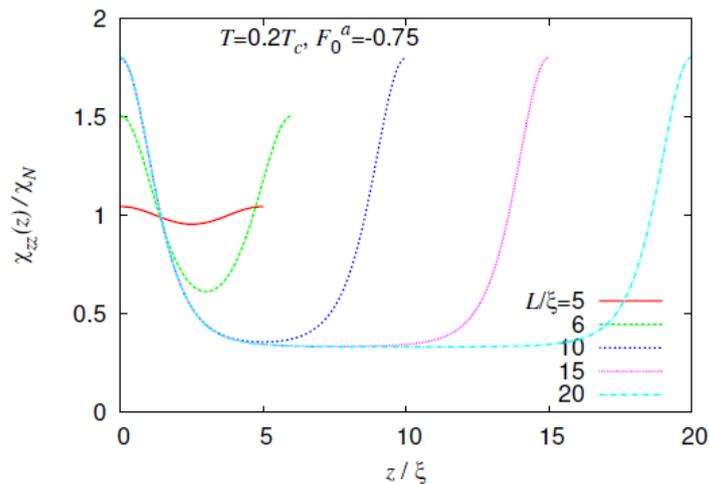


図2: : 温度 $T=0.2T_c$ での χ_{zz} の膜内の場所依存性。L は膜厚で ξ はコヒーレンス長。

本研究は、超流動 $^3\text{He-B}$ の表面束縛状態の解析に基づき、その検証のための実験を理論的に提起したものとして、多くの研究者の注目を集めている。超流動 $^3\text{He-B}$ の表面状態については、まだ解明されるべき点が多く残っている。今回の研究で得られた知見は、表面のラフネスの効果や強磁場効果を含む、表面束縛状態の全容解明に繋がるものと期待される。

論文掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn., Vol.78, No.12, p.123603

電子版: <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/78/123603> (12月10日公開予定)

<情報提供: 永井 克彦 (広島大学) >