

スピン三重項超流動体の固有軌道角運動量

石川 修六 / 大阪市立大学大学院 理学研究科 教授

超流動 ^3He -A 相のクーパー対状態は、両極にノードを持つ軸対称なギャップ構造を有し、クーパー対は軸方向に大きさ l の軌道角運動量（固有角運動量 Intrinsic Angular Momentum ; IAM) を持つ。超流動 ^3He -B 相のクーパー対も同じ大きさの軌道角運動量を持つが、量子力学的に許容される 3 つの成分（軌道量子化軸に対して +1, 0, -1) を持つクーパー対が存在している。しかし A 相のクーパー対は 1 つの成分しかもたないという違いがある。このため、B 相ではクーパー対状態の全固有軌道角運動量は液体全体では常にゼロとなるが、A 相ではゼロではない状況が考えられる。何らかの条件で A 相でのクーパー対の固有軌道角運動量の向きを揃えることが出来たときに、巨視的な量として検出できるかどうかということが超流動発見以来の未解決問題である。数多くの理論的推察がなされ、巨視的な大きさの固有軌道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がこれまで続いてきた。この問題の解決を図るためにこれまで行って来た実験について少しまとめてみる。

ここでの巨視的な大きさは大きさにクーパー対の数を変えたオーダーの大きさのことであり、巨視的ではないというのはこれより 10^6 ほど小さい大きさとなることを意味する。また、A 相ではクーパー対の軌道角運動量はいりオーダーパラメータであり、以後 \vec{l} と表記することにする。

1. どのようにして軌道角運動量の向きを揃えるか。

超流動 ^3He -A 相のクーパー対状態は両極にノードを持つ軸対称なエネルギーギャップ異方性を持つ。そしてこの軸を軌道量子化軸としたときに 1 つの成分を全てのクーパー対が持つ。クーパー対の大きさがコヒーレンス長 (ξ_0 : 20nm ~ 60nm) であるので、相対的なヘリウム原子の（古典的な）回転運動がこの固有軌道角運動を形成すると考えると、容器の壁のような平面の直ぐ近くでは回転軸が平面に垂直となることが有利であることは簡単に推測される。この直感は凝縮状態でも正しくて、 \vec{l} は壁に垂直となることは非常に強い境界条件である。従って、A 相では壁を利用すると \vec{l} の向きを揃え易くなる。

ちなみに B 相でも状況は同じだが、3 つの成分があるために軌道角運動の量子化軸が壁に垂直となることが境界条件となる。このとき凝縮エネルギーの損を少なくするために、3 成分の内 1 つの成分はもはや回転運動が出来ない向きとなるためにそのクーパー対では対破壊が起こるが、全固有軌道角運動量はゼロのままである。

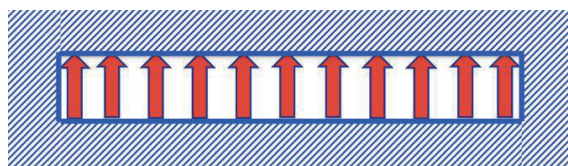


図 1: 狭い隙間の平行平板内の \vec{l} (赤色矢印)

狭い隙間の平行平板に挟まれる A 相を考える。実験を想定するので液体を閉じ込めねばならないために、断面は横に長い長方形をした円柱状の超流動体となる (図 1)。上下の壁が \vec{l} の向きを揃える働きをする。

ここで注意せねばならないことは左右の壁近傍での、 \vec{l} の振る舞いである。上下の壁と同様にこの壁に対しても \vec{l} は垂直となるので、図 2-a のような状況となる。

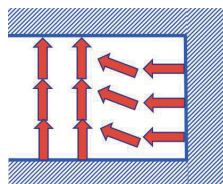


図 2-a: 図 1 の端部分を拡大

\vec{l} の向きは連続的に変化するが、十分広い上下の壁を準備すればこの端の寄与は無視できるように思われる。必要な平板間隔は双極子コヒーレンス長 ($\xi_0 \sim 10 \mu\text{m}$) 程度なので作成は容易である。端の寄与をなくして至る所同じ向き \vec{l} のとするために非常に狭い間隔（コヒーレンス長程度）を準備することが有利となると考えがちだが、この場合は端でエネルギーギャップがつぶれる (図 2-b)。

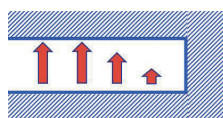
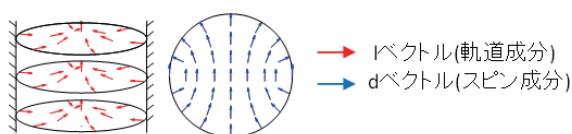


図 2-b: コヒーレンス長程度の隙間の場合、端でエネルギーギャップがつぶれる（正確さに欠けるがイメージ図である）

その結果、端の壁に沿って質量流が流れて、この回転質量流がちょうど内側の全固有軌道角運動量を打ち消すことが示されるために得策ではない。また、どのようにして、液全体の角運動量という純粋に力学的な量を検出するかは別の問題であり、図1では困難である。

2. どのようにして固有角運動量を検出するか。

図1に示したような \vec{l} の実空間での向きの変化は一般に \vec{l} テクスチャーと呼ばれる。このようなオーダーパラメータの空間変化はエネルギーの増大を含むので、変化が穏やかとなるようなテクスチャーが実現されている。 \vec{l} は2つの互いに直交するベクトル \vec{m}, \vec{n} のベクトル積で定義される。端の壁に沿って1周するときに \vec{l} が円柱容器の中心を常に向いていても、 \vec{m}, \vec{n} はいつも同じ向きを向かず \vec{l} の周りに回転し、容器を1周すると \vec{m}, \vec{n} は 2π の整数倍だけ回転することがある。このテクスチャー構造を Mermin-Ho (M-H) テクスチャーと呼ぶ [1]。



Mermin-Ho hyperbolic

図3 : Mermin-Ho(hyperbolic) テクスチャー

実際の実験では、このM-Hテクスチャーを利用して力学量である角運動量を検出することとし、図1の容器を縦方向に引っ張った細い円筒容器を試料セルとして作成した。図3にこのときのM-Hテクスチャーを示す。上下の壁はなくなり、容器の上下端でバルク液体に繋がるが、直径に比べて十分長くすればテクスチャーへの影響は無視できる。円筒容器の側面が \vec{l} の向きを揃える役目をするが、赤い矢印のベクトル的な足し算を考えると全体として \vec{l} の向きを円筒容器の軸方向に概ね揃えたことになる。これを回転する超低温装置にセットして、核磁気共鳴法により、M-Hテクスチャーで励起されるスピン波の共鳴周波数が回転角速度にどのように依存して変化するかを詳細に調べることにより、固有軌道角運動量問題に決着を付けることとした。(どのようにM-Hテクスチャーを作るかについては省略する。参考文献を参照 [2].)

角速度 $\vec{\Omega}$ で回転する系でのエネルギー E' は静止系でのエネルギーと角運動量より次式で記述される。

$$E' = E - \vec{\Omega} \cdot \vec{L}$$

この式は超流体が容器の回転に対して一緒に回転するように渦が安定化するかどうかを判断するときにも用いられる。今は、回転に対して E' を最小とするためにはどのようにテクスチャーを変化させて \vec{L} を変えるかの判断に使うのである。M-Hテクスチャーは回転質量流を有しているので、流れによる角運動量と固有軌道角運動量との起源の異なる2つの軌道角運動量がこの \vec{L} に寄与することになる。

回転によるテクスチャーの変化は図1の容器でも起こるだろうが、スピン波信号は小さく、変化は観測出来ないと予想し、図3の細い円筒容器を用いた。この場合は容器内のほとんどの領域で \vec{l} は空間変化しているためにスピン波信号も大きく、かつ大きな変化が期待できる。 \vec{l} テクスチャーの変化はNMRポテンシャルを変化させ、そこに束縛されるスピン波共鳴周波数の変化を引き起こす。回転によりテクスチャーが僅かに変化するとしたが、回転質量流による軌道角運動量と、固有軌道角運動量では、 E' を最小にするためのテクスチャーの変化が逆であるということが重要な点である。従って、最初に準備するM-Hテクスチャーの素性を正しく理解出来ていれば、回転に対するスピン波共鳴周波数の変化から得られる結論の解釈に困難さはない。M-Hテクスチャーでの超流動A相が角運動量を持っており、回転に対する非対称な応答の向きが確認できればよいのである。

3. いくつかの実験結果

実験で利用するM-Hテクスチャーを制御して実現できるかどうか、また回転によって渦が侵入するかどうかなど(本実験では渦が侵入してはならない)、基本的なことを明確にしておく必要があり、円筒容器の直径の選択は重要である。直径が100 μm と200 μm の容器を準備した。回転系でのエネルギーの式を用いる評価予想通り、200 μm 容器ではA相の渦が侵入したが [3]、100 μm 容器では侵入はなかった(使用した物性研の回転超低温装置は最大 $\sim 10\text{rad/s}$)。[3]のときのものとは異なる200 μm 容器で、回転によって量子渦が1本づつ容器内に入出入りする様子を図4に示した。

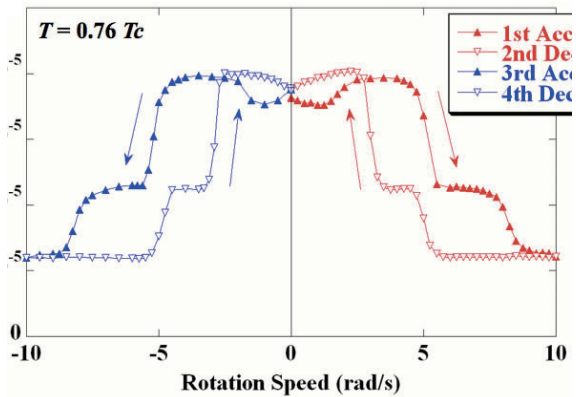


図4：NMR信号強度の階段状の変化が量子渦1本の出入りに対応

詳しく述べないが、量子渦を安定化/不安定化する角速度は図4にあるようにヒステリシスを示すことが特徴である。また、 $100\ \mu\text{m}$ では期待したM-Hテクスチャーの中心部分でのスピン波励起信号を観測した。図5に+5rad/sで実現したM-Hテクスチャーの中心部分でのスピン波励起信号の共鳴周波数の回転速度変化を示す。実験結果はIAMがあるときの理論計算結果と良い一致を示し、IAMがない場合とは変化の向きが逆であることが明らかである。

WEB 非公開

図5：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。

4. 実験結果が意味すること

超流動 ^3He -A相の発見以来の未解決問題に対して肯定的な結論を出したものと考えている。以前に行われた実験では、IAMは観測出来るほどの巨視的な大きさではないという否定的な結論であった[4]。測定手段は我々のものとは全く異なり、この方法でIAMが観測可能かどうかに関しては良く分からない。測定方法について議論する余地はないが、我々は \vec{l} の向きを静的にコントロールしたが、以前の実験では \vec{l} の向きを振動させていた。本質的な困難さは、IAMの大きさが巨視的であるかどうかと、それを観測出来る測定方法かどうかの区別が出来ていなかったことにあったと考えている。以前の報告は、IAMの存在を否定したのではなく、測定できる方法ではなかったのではないかと理解している[5]。

参考文献

- [1] "The Superfluid Helium 3", D. Vollhardt and P. Wolfe, Taylor & Francis(1990).
- [2] T. Kunimatsu et al. JLTTP **171** 280-286 (2013).
- [3] R. Ishiguro et al. PRL **93** 125301(2004).
- [4] A. J. Manninen, et al. PRL **77** 5086 (1996).
- [5] G. Volovik から、 \vec{l} の向きを振動させる方法では観測できないだろうとのコメントがあった。

著者紹介



いしかわ・おさむ

1957年 山梨県出身
1980年 京都大学理学部卒業、1986年 同大学院理学研究科博士後期課程単位取得退学、1986年より 大阪市立大学理学部助手、同講師、助教授、准教授を経て2009年より現職。大学院生時より超低温物理学の実験を行ってきた。2012年より低温工学・超電導学会関西支部長を務めている。