

# 学位論文の要旨

## 論文題目

### 高速回転下での多重連結ヘリウム薄膜の ねじれ振り子実験

(英文題目) Torsional Oscillator Experiments of Multiply Connected Helium-4  
Films under High Speed Rotation

氏名 小幡 利顕

液体ヘリウム4はバルクの液体として超流動性を示すとともに単原子膜以下の薄膜でも超流動性を示すことが知られている。前者は $\lambda$ 転移、後者はKosterlitz-Thouless(KT)転移として広く知られており、ヘリウム4は同じ元素で次元の異なる相転移を起こす、相転移とその次元の関係性を調べる上で非常に有用な元素である。

多孔質体に吸着したヘリウム薄膜の超流動(以下、多連結超流動薄膜と記述する。)は吸着基盤である多孔質体が3次元的に繋がっているため秩序パラメタである波動関数に3次元性に似通った性質があると考えられる。実際に平均孔径が $80\text{\AA}$ と孔径の小さい多孔質体を用いた超流動薄膜の実験結果では3次元性が深く相転移にかかわっていることが指摘されて来た。一方、このような薄膜系では孔径を大きくしていくとその転移温度が徐々に低くなるという現象が観測されている。用いられた孔径サイズは $50\text{\AA}\sim 1\mu\text{m}$ である。この現象は有限サイズのKT理論により得られる相転移温度のサイズ依存性を考えることにより理解できる。これより多連結超流動薄膜の相転移にはKT理論と同様に熱励起する量子渦対が寄与している。一方様々な実験で多連結超流動薄膜は2次元の性質と3次元の性質両方が報告されている。

2つの一見相矛盾する見解は、相転移と次元性の関係を基本的な理解するための鍵となる可能性を秘めているため、長年に渡り多くの研究者によって研究されてきた。両者のメカニズムが結びつけば相転移現象と次元性の関係をより深く理解できると言う目論見がある。2つの見解の整合性を取るために多くの研究者は多孔質体の表面で量子渦対の励起を考察し、3次元相関を満たすように拡張すると言う方法を取ってきた。長年のたゆまぬ努力にもかかわらず、KT理論の3次元的な拓

張はなされていない。このような KT 理論の 3 次元への拡張の中で、以下のことが定性的に議論されている。

1. 多孔質体で位相のコヒーレンスを問題にした場合、量子化条件は KT 理論で論じられているような量子渦周りの量子化条件だけではなく、多孔質体の枝周り、孔周りの量子化条件が適用される。このことから、ジャングルジム模型を多孔質体のモデルとして用いることが出来る
2. 有限サイズ KT 理論と実験との整合性がとられている。KT 理論で議論される渦対相互作用の距離を表す渦対の相関長が孔径程度になったとき、相転移が起きる。転移点より低温では渦対の相関長は孔径サイズよりも長く、高温では渦対の相関長が孔径サイズよりも短い。
3. 渦対の相関長が孔径サイズよりも長いとき、多孔質体の格子定数程度の長さの相関が存在する。このときジャングルジム模型の格子点近傍の位相に注目すると多孔質の枝両面の超流動薄膜を介して 3 次元的な相関を持つ。

このような定性的な議論のうち、3 の議論に注目すると、孔径サイズ程度の限られた空間に局所的に摂動をかけるような実験が望まれる。

ヘリウム 4 は電氣的に中性であり、磁気モーメントも持たないため、その物性を調べるために取り得る方法は非常に限られる。最も有用な方法のひとつは力学的な方法である。サンプルを振動させたり、装置全体を回転させたりする方法が取られる。多連結超流動薄膜を回転させるとバルクと同様量子渦糸が励起することが期待される。前述の定性的な議論 1 とエネルギーの簡単な見積もりより多孔質体の孔の内側に沿ってあたかも孔径程度の渦糸半径を持ち、多孔質体の孔を貫くような量子渦が励起すると考えられる。多孔質体の孔を通る渦は KT 理論で議論されている熱励起渦対とは異なり、波動関数の振幅に特異点を持たないため孔を通る渦と言う意味で孔渦 (pore vortex) と呼ばれる。孔渦はその量子化条件より孔の周りに次のような大きさの速度場を起こす。

$$v_s \cong \frac{\kappa}{4l}$$

ここで  $\kappa = h/m$  は量子循環単位であり、 $l$  は多孔質ガラスの孔径である。渦糸の生成する速度場は渦糸中心からの距離を  $r$  として  $1/r$  で減衰するので、孔渦は超流動薄膜に極めて局所的に速度場を誘起し、局所的に摂動を加えることが出来る。またバルクヘリウムの回転実験で励起する量子渦糸の直径は  $3\text{\AA}$  であるのに対し、多連結超流動薄膜は量子渦糸の有効半径を孔径で完全に制御できる。

申請者らのグループは六本木キャンパスにおいて秒速 1 回転の回転希釈冷凍機を用いてねじれ振り子実験を行い、孔径  $1\mu\text{m}$  の多孔質中に吸着された超流動薄膜について研究してきた。この系で超流動転移点近傍での熱励起する量子渦に起因するエネルギー散逸ピークの低温側に新たなピークが生じるダブルピーク構造が測定されている。近年、申請者も加えて共同研究でこのピークの解析が進められた。孔径が  $1\mu\text{m}$  のとき、渦糸回りの速度場の大きさはおよそ  $2.5\text{cm/s}$  となる。このような大きな速度場によりヘリウム薄膜上に熱励起した渦対はある種の非線形な効果を受けると考えられる。そこで、多連結超流動薄膜の非線形速度応答の実験との比較を試みたところは定性的にはあるが、コンシステントであることが示された。

もし、最高回転速度が上昇すればピークが大きくなり、そのメカニズムをより明確かつ直接的に理解することが期待できる。そこで申請者はこのメカニズムをより確定的に理解するため、また秒速 1 回転では観測されていない回転による非線形な効果を観測するために、回転希釈冷凍機の抜本的な改良を行ってきた。冷凍機のセンタリング精度を上げ、回転に対する空気抵抗を減らすために

冷凍機全体をプラスチック製のカバーで覆うなどの冷凍機全体にかかわる改良を施し、現在のところ秒速 6 回転の高速回転下で希釈冷凍機温度を保つことに成功した。

申請者は高速回転希釈冷凍機に孔径  $1\mu\text{m}$  と  $10\mu\text{m}$  の多孔質ガラスを吸着基盤としたねじれ振り子実験を行った。高速回転下での両者の実験結果を図 1 に示す。 $1\mu\text{m}$  のデータはエネルギー散逸がダブルピークとなるが、 $10\mu\text{m}$  のデータはダブルピーク構造にならずピークの低温側が膨らんでいる。まず、2 種類の一連のデータをそれぞれの非線形効果の実験結果と比べることにより両者の違いは孔径の大きさによるものである。両者に孔渦が励起しているとき、孔渦の周りの多孔質体の最短の経路にそって励起する速度場の大きさはそれぞれ  $2.5\text{cm/s}$ 、 $0.25\text{cm/s}$  となる。実験結果は  $1\mu\text{m}$  のセルの方が変化が著しいので孔渦の作る速度場の大きさが大きい方が回転により著しい変化をしている。両者をそれぞれの非線形効果の実験結果と比較したグラフを図 2 に示す。 $1\mu\text{m}$  のデータは非線形効果の実験データとピークの温度に関して一致している。 $10\mu\text{m}$  のデータは回転速度が 0.75 までは非線形効果のコンシステンシーが取れたが、それ以上の回転速度ではピークの高さが比例せずピークの温度もわずかながらずれているようである。

実験で観測される量は超流動密度とエネルギー散逸量であるが、多連結超流動薄膜の性質を議論するためには KT 理論などで便宜上導入される誘電関数を求めることが必要である。誘電関数はその実数成分は渦対のエネルギーの遮蔽効果と超流動密度の温度変化に寄与し、虚数成分はエネルギー散逸を起す渦対の数に比例する。それぞれのデータは回転させても超流動密度に明確な変化を生じていないので実数成分は回転によりさほど変化しない。回転による効果はエネルギー散逸ピークに顕著に現れるので、誘電関数の虚数成分を求めた。それぞれのセルでの虚数成分の温度変化を図 3 に示す。すると両方のセルでそれぞれ特徴的な結果を得た。まず、 $1\mu\text{m}$  のデータは回転数を変えても一定の曲線が平行移動するだけであった。つまり虚数成分は

$$\text{Im}[\epsilon(\omega)] = n_{\Omega}\epsilon_{rot}$$

と記述できる。ここで、 $n_{\Omega}$  は回転で励起する渦糸の密度である。この結果は回転下におけるエネルギー散逸ピークが渦対と孔渦の相互作用により起きていることを表している。この結果は非線形効果と回転下におけるエネルギー散逸ピークの整合性を強く支持する。一方、 $10\mu\text{m}$  のデータは回転数が 0.75Hz までのデータに関しては誘電関数の虚数成分が一様に増えていくが、0.75Hz から 3Hz では 1 つの曲線に重なっていることがわかる。ある温度での誘電関数の虚数成分は孔渦の密度に比例すると考えられるので、0.75Hz から 3Hz の回転速度では孔渦が入りにくくなっていると考えられる。

以上のように申請者は高速回転希釈冷凍機を開発し、高速回転下でねじれ振り子実験を行った。孔径  $1\mu\text{m}$  と  $10\mu\text{m}$  の多孔質ガラスにヘリウム薄膜を吸着させ、回転下でのねじれ振り子実験も行い、両者は低速回転では非線形効果により定性的に示されることを示した。 $10\mu\text{m}$  のセルに関しては回転により生じるピークに回転速度に対する非線形効果を測定した。さらなる高速化と孔径の大きなセルでの実験に期待がもたれる。

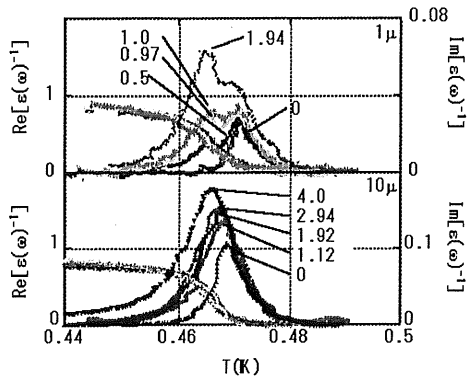


図 1: 回転下での孔径  $1 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$  多孔質ガラスに吸着したヘリウム薄膜のねじれ振子実験の実験結果

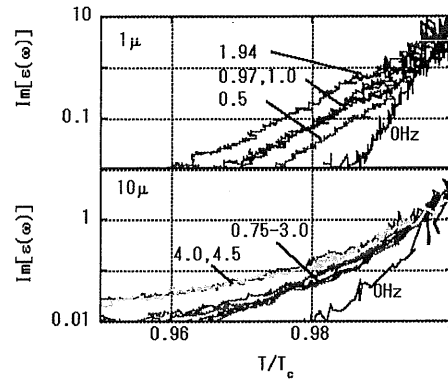


図 3: 実験結果より得られた孔径の違う多孔質ガラスに吸着したヘリウム薄膜の誘電関数

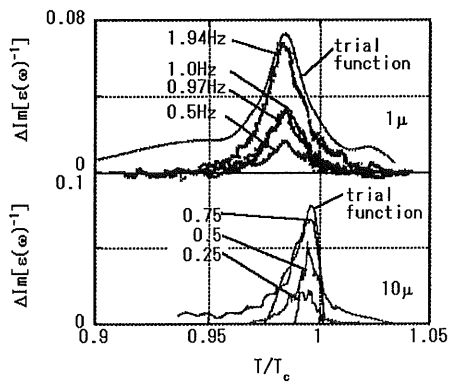


図 2: それぞれの実験結果に対する非線形効果との比較