

2008年3月

固体  $^4\text{He}$  の超流動 (supersolid) と量子渦状態の研究 :

静止下及び回転下でのねじり振り子実験

物質系専攻 66154 安田 吉紀

指導教員 : 久保田 実 (准教授)

キーワード : 超流動、量子渦、量子固体、量子渦液体、超流動転移

## 研究背景

「ボーズ=アインシュタイン凝縮 (BEC)」は、粒子の量子統計性と数密度のみによって転移温度が決まるユニークな相転移である。これは粒子間の相互作用の無い理想気体で議論され、実際には相互作用の弱い希薄気体および液体で実現し、これと深く関連した超流動現象が現在までに知られている。これら流体中で起こる事が確認されているボーズ凝縮や超流動現象が、さらに強い相互作用で結ばれた固体の中でも起こるものなのか。つまり、一方で格子を形成しつつ、同時に格子間を動き回るような状態が実現しうるのか。この問題については、1960年代後半から Chester[1]や Andreev 及び Lifshitz[2]によって、固体中に有限の欠陥 (zero-point vacancy 等) が存在し、それらが粒子と同様に運動して BEC を起こすことで、固体中でも超流動が起こりうるという議論がなされた。さらに Leggett[3]によってそれがどの様に観測されるべきかが検討されたが、その超流動密度の絶対値や転移温度は大変低いことが想定された。それ以降、世界中で多くの実験的努力がなされてきたが長くその兆候は観測されなかった。

2004年になって、ペンシルバニア州立大学の Kim と Chan はねじり振り子を用いた固体  $^4\text{He}$  の実験において、「非古典的慣性モーメント (NCRI)」(超流動密度に対応する量) を発見した[4]。その後、我々の研究室を含む4つの研究室において彼らの実験事実の追試及び、さらなる固体  $^4\text{He}$  の性質を探る実験が実現されてきており、今、超流動を起こす固体 (supersolid) の研究は大きな注目を集めている。これまでの実験から、欠陥の少ない完全に近い結晶では非古典的慣性モーメント (NCRI) は小さく、欠陥を多く含んだ固体でその信号はより大きく出ることがわかってきた。一方、超流動密度に対応する非古典的慣性モーメント (NCRI) が観測されたと主張されては来たが、格子欠陥が固体中に有限の量存在するとはいえ、それは微小であるため、NCRI を BEC で説明するのは困難である。固体  $^4\text{He}$  については、未解明なことが多く、supersolid 自体の存在が確定的ではない。

超流動 (超伝導) を起こす系はいくつか知られているが、それらに共通するのは、BEC と共通な巨視的なスケールで位相のそろった状態が実現でき、量子化した循環流、量子渦 (量子磁束) を発生させることができるという点である。一方、この様な転移が  $\sim 100\text{mK}$  以上という高温で起きる事、また直流の流れに対しては粘性が無い流れが観測されていないという事を説明するものとして、P. W. Anderson は、最近の Nature Physics 誌[5]で、「Kim and Chan や他のグループが見出した実験結果は、高温超伝導体の underdoped (UD) Cuprate 系で報告されている  $T_c$  以上で観測される量子渦液体状態を指し示しているのではないか」と提案した。これから以下のことが考えられる。

(I) BEC の転移温度としては説明のつかない、NCRI の出現温度  $100\text{--}300\text{mK}$  について、低次元性をもったサブシステムでの局所的凝縮体が絡んで量子渦液体状態ができる。

(II) 量子渦液体は巨視的 3次元相関をもたないが、更に温度を下げてゆくと巨視的 3次元相関をもった超流動転移が存在するだろうと考えられる。

なお、低次元系では量子渦のエネルギーが小さいため、熱的に励起されうるが、3次元系では渦の特徴的エネルギーは超流動の出現温度に比べ  $10^6\text{--}10^8$  も大きいのが通常であり、熱的に励起される事はない。

## 実験方法

本研究で用いた主な研究手法は、Kim と Chan が当初用いた手法と同じねじり振り子法である。ねじり振り子はサンプルセルを共鳴振動させ、フィードバックをかけたドライブ電圧を加えて駆動を維持する。セル内の慣性モーメントの変化に起因する共鳴周期の変化とそれに対応する振動振幅の情報から、それぞれ固体  $^4\text{He}$  の NCRIF とエネルギー散逸が測定でき、振動速度や温度を変化させた測定が可能である。エネルギー散逸は空セルのときの振幅に対し、固体を入れて測定した値がどれだけ小さくなっているかを比べることで求めることができる。NCRI については共鳴周期(慣性モーメントの変化)から求まる。我々は冷凍機ごと回転させることのできる回転冷凍機を開発しており、高安定、高感度で働くねじり振り子[6]と回転冷凍機を生かして、固体  $^4\text{He}$  の回転に対する応答を調べることができる。サンプルは円筒容器内に作成し、できるだけ安定性の高い試料を用意することとした。

## 結果と考察

### 1. 振動速度依存性の精密測定と量子渦状態の始まりの温度 $T_0$ の決定

ねじり振り子の振動速度:  $V_{ac}$  を細かくとり、その温度依存性ととも測定することで、Anderson が提唱する「量子渦液体状態」での NLRS (NCRIF) の Onset 温度:  $T_0$  を、エネルギー散逸と対比させて決定した。[図 1] この  $T_0$  以下では NCRIF とエネルギー散逸がともにねじり振り子の振動速度:  $V_{ac}$  に対する依存性を持つようになる。これが、通常の固体の状態から量子渦液体状態への転移であると考えられる。また、NCRIF とエネルギー散逸はともに  $V_{ac}$  を速くした方が値は小さくなる。これは、速く振ることで NCRIF をつくるものと散逸を作るものを抑えていることを意味し、NCRIF の起源と散逸の起源が  $T_0$  以下で大きな熱揺らぎによって特徴付けられているのではないかと考えられる。

### 2. 量子渦乱流状態と共通の温度依存性について

また、[図 2]において、 $V_{ac}$  依存性を見ると、

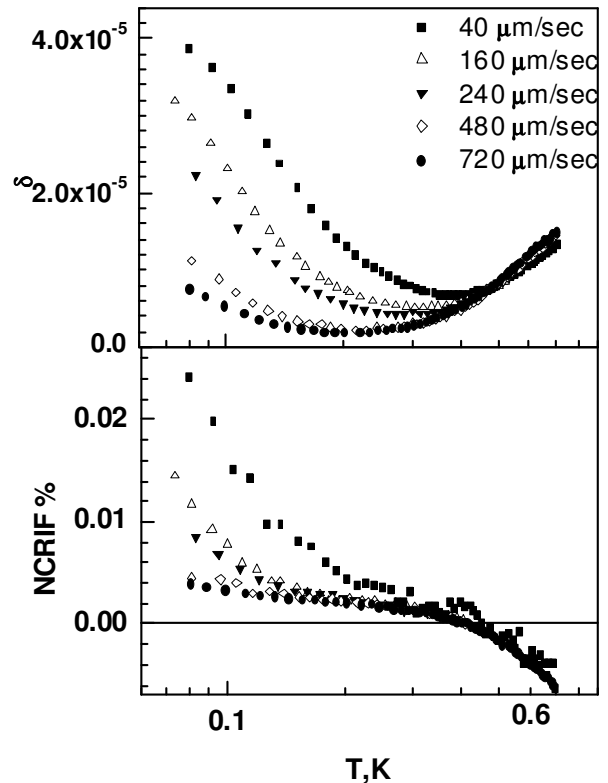


図 1. ねじり振り子による固体  $^4\text{He}$  のエネルギー散逸:  $\delta$  と、NCRIF fraction の温度依存性

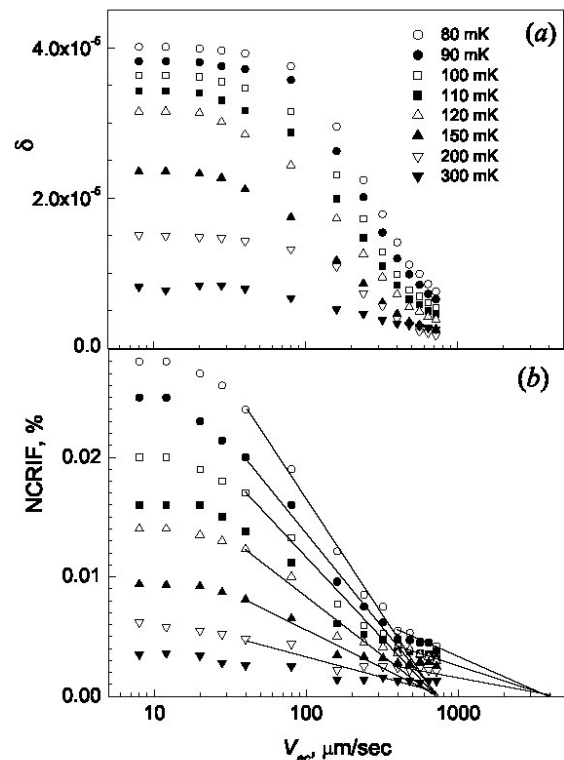


図 2. エネルギー散逸:  $\delta$  と、NCRIF fraction の振動速度:  $V_{ac}$  依存性。

40 [ $\mu$  m/s] < Vac < 400 [ $\mu$  m/s] の速度範囲の NCRIF は  $\log \text{Vac}$  に線形な依存性を示すが、これは「量子渦液体状態」の証拠として P. W. Anderson が指摘している点である。AC 速度によって乱れた渦輪の集団の中に渦糸を形成することによって揺らぎを抑えていることに対応する可能性がある。この線形部分の傾きをとると  $T^{-2}$  という非常に単純な温度依存性を示す。その意味するものについて定量的に検討を進めている。

## 今後の展望

○ 準安定状態の出現と回転による 3 次元超流動への転移と見られるエネルギー散逸変化

Anderson によると量子渦液体状態  $T_c < T < T_0$  の温度範囲で存在し、 $T_c$  以下では、「3 次元の長距離相関をもった本物の超流動への転移」が想定されているが、これを本研究室が所持する回転冷凍機によって実験的に見出しつつある。また、Kojima らの報告している低温でのヒステリシス [7] についても、回転実験とともに調べていくことが今後の課題である。

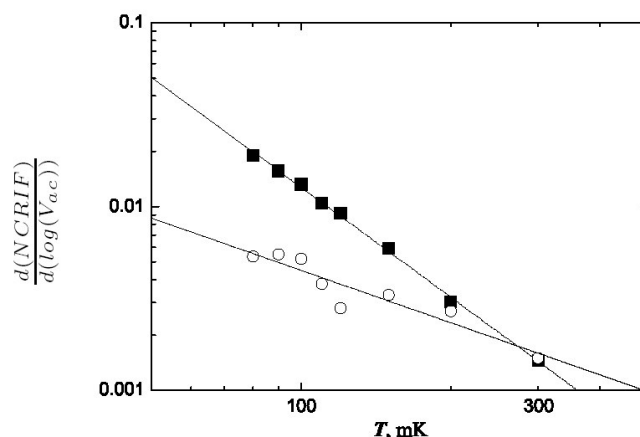


図 3. 図 2 の NCRIF のグラフでの線形領域での傾きの温度依存性。黒が 40 [ $\mu$  m/s] < Vac < 400 [ $\mu$  m/s] で、白は Vac > 400 [ $\mu$  m/s] の範囲。

## 参考文献

- [1] G. V. Chester, Phys. Rev. A 2, 256 (1970)
- [2] A. F. Andreev and I. M. Lifshitz, Sov. Phys. JETP 29, 1107 (1969)
- [3] A. J. Leggett, Phys. Rev. Lett. 25, 1543 (1970)
- [4] E. Kim and M. H. W. Chan, Nature 427, 225 (2004)
- [5] P. W. Anderson, Nature Phys. 3, 160 (2007)
- [6] M. Fukuda, K. Ooyama, T. Obata, V. Kovacic, and M. Kubota, J. Low Temp. Phys. 113, 423 (1998)
- [7] Y. Aoki, J. C. Graves, and H. Kojima, Phys. Rev. Lett. 99, 015301 (2007)

## 【論文・学会発表】

1. 第 61 回 日本物理学会秋季年会「超流動固体 4He のアニーリング効果」
2. 第 62 回 日本物理学会春季年会「固体 4He の超流動固体相と通常固体相でのエネルギー散逸の違い」
3. PSM International Workshop “Physics of Supersolids and Related Topics” at Keio University. ポスター出展「Torsional Oscillator Study of solid 4He under DC Rotation」
4. QFS 2007 “International Symposium on Quantum Fluids and Solids” at Kazan, 1-6 August, 2007. ポスター発表「Supersolid Torsional Oscillator Experiment under DC Rotation」
5. J. Low Temp. Phys. 148, (2007) 677, A. Penzev, Y. Yasuta, and M. Kubota
6. “arXiv:0711.0212v2 [cond-mat.other] 13 Nov 2007” A. Penzev, Y. Yasuta, and M. Kubota