

量子固体 ^3He における転位の量子運動とピン止め機構

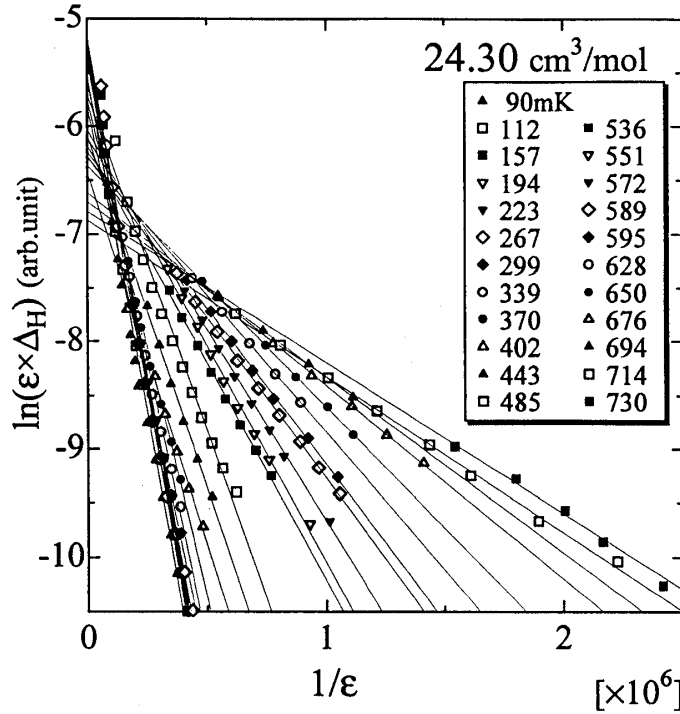
名古屋大学理学研究科 三浦裕一

固体に外部応力が加えると変形するが、一般に応力を除いても固体は完全には元には戻らない。これは固体中に存在する転位が運動するためであり、その運動は摩擦(内部摩擦)を伴うのでエネルギーを損失する。転位は線状の格子欠陥でありパイエルスポテンシャルと呼ばれる結晶場を乗り越えて運動している。また、金属やイオン結晶では転位の運動は両端がピン止めされた弦模型で良く記述されている。

現実の固体の機械的性質はパイエルスポテンシャルで決まることはまれであり、それよりも遥かに大きな不純物と転位との相互作用に依存する。そのため転位運動のパイエルス過程を研究するためには 1 ppm より遥かに高純度の固体が必要であるが実現はなかなか困難である。この点、 ^3He は不純物を極低温で吸着により除去できるので極めて純粋な固体を作ることができる。 ^3He に最後に残る不純物は同位体の ^4He であるが、蒸気圧の違いを利用してあらかじめ極低温で蒸留して数 ppm まで除いた後、残留原子を極低温で銀の超微粒子の表面に吸着することにより除去する。 ^4He 原子の吸着エネルギーは ^3He より大きいので、我々の実験温度領域では固体 ^3He の純度は十のマイナス 20 乗以上と計算される。このように金属やイオン結晶では実現不可能な超高純度を達成できるので、固体 ^3He は転位運動のパイエルス過程を研究するのに最も適した対象である。

ただし、固体 ^3He は零点振動が大きく、加圧しなければ固化しないので自由表面が無く、通常の固体のように引っ張り試験はできない。また、過去に超音波測定の場合もあるが転位運動に対する感度が充分でなかった。そこで我々は捻れ振動子を用いて固体 ^3He の剛性率とエネルギー損失を同時に測定している[1]。この方法は振動数を測定中に可変できないが、共鳴振動を利用するので著しく感度が高い。この測定手段により、固体 ^3He における損失の温度依存性は、転位とフォノンの相互作用で説明されることが示された。

通常の固体と同様に、固体 ^4He における転位の運動は両端がピン止めされた弦模型で良く記述されている。固体 ^4He の場合、不純物である ^3He 原子は壁の表面に吸着されないために、ある混合比までバルクに溶解できる。そして転位をピン止めする現象が報告されている[2]。しかし、固体 ^3He の本実験ではピン止めする不純物が無視できるにもかかわらず、やはりピン止め現象が剛性率と損失の温度変化に見られた。



1 図. $\ln(\epsilon \Delta_H)$ vs $(1/\epsilon)$.

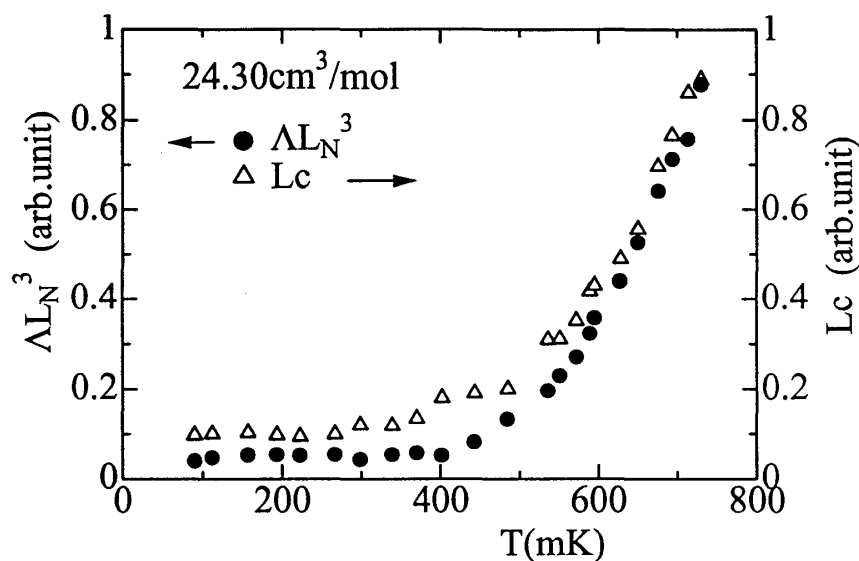
ここで、 ϵ は捻れ歪み率、 Δ_H はエネルギー損失である。
直線部分がモデルで良く記述できる歪み率の範囲である。

1 図は損失の歪み率(振幅)依存性を示す。結果を Granato & Lucke のモデル[3]と比較するため、縦軸と横軸を図のように選んである。図の切片と傾きから転位の平均長さ L_c の温度依存性を求めた。更に、転位は固体中で他の転位とノードで結び付いたネットワークを構成することが知られている。ノードは3本以上の転位の交点であり、転位をピン止めできることが知られている。モデルによれば、

$$\begin{aligned}\epsilon \Delta_H &= C_1 \exp[-C_2/\epsilon], \\ C_1 &\sim \Lambda L_N^3 C_2/L_c, \\ C_2 &\sim 1/L_c.\end{aligned}$$

ここで、 ϵ は捻れ歪み率、 Δ_H はエネルギー損失、 Λ は単位体積当たりの転位線の全長、 L_N は転位のネットワークノード間の平均距離、 L_c は転位の平均長さを示す。

通常の固体では、転位は主に不純物でピン止めされている。そのため、温度が上昇するにつれ熱エネルギーの支援でピン止め中心から離脱するため、平均長さは急激に増加する。しかし、固体 ^3He の場合は異なる機構が必要である。



2図. Δ は単位体積当たりの転位線の全長、 L_N は転位のネットワークノード間の平均距離、 L_c は転位の平均長さを示す。つまり、左縦軸 ΔL_N^3 はネットワークのユニットセル内部の転位の長さとなり L_N に比例する。

1図の結果から、このネットワークの平均長さ L_N の温度変化も求められた。2図にその結果を示すが、転位の平均長さと相対的な温度変化がほとんど等しいことが分かる。これは、転位のピン止め中心が転位のネットワークのノードと考えれば、 L_c と L_N は同じとなり、結果を説明できる。

固体 ^4He における転位の運動では、結晶が hcp のため異方性が大きく、実験結果は結晶の c 軸と振動子の捻れ軸との角度に大きく依存した。それに対し、我々の bcc 固体 ^3He の実験では、多くの固体を振動子の中に生成し、結晶軸はそれぞれ異なるはずであるが、捻れ軸に対する異方性は観測されなかった。

更に、軽い質量に起因する転位運動の量子効果の検証と有効質量の評価も試みている。また、空格子点と転位との相互作用も今後の課題である。加工歪みの緩和など、動的な研究も視野に入れて研究を進めている。

本研究は小川健一、森一央、馬宮孝好氏との共同研究である。

有益な議論をしていただきました次の先生方、鈴木敬愛、小杉俊男、鈴木秀次、岩佐泉、長岡洋介の各氏に感謝いたします。

REFERENCES

- 1). Y.Miura, T.Nakayasu, T.Mamiya, and H.Kato, J. Low Temp. Phys. **110**, 115 (1998).
Y.Miura, K.Mori, T.Mamiya, and T.Nakayasu, J. Low Temp. Phys. **113**, 757 (1998).
Y.Miura, K.Mori, and T.Mamiya, Physica **B284-288**, 357, 2000.
Y.Miura, K.Ogawa, K.Mori, and T.Mamiya, J. Low Temp. Phys. in press.
- 2). M.A.Paalanen, D.J.Bishop, and H.W.Dail, Phys. Rev. Lett. **46**, 664 (1981).
- 3). A.Granato and K.Lucke, J. Appl. Phys. **27**, 789 (1956).