

超流動ヘリウム4 デモンストレーション実験

新液化機披露宴より

Demonstration of Superfluid Helium-4

松原 明

低温物質科学研究センター

A.Matsubara

Research Center for Low Temperature and Material Sciences, Kyoto University

1. はじめに

さる 2003 年 11 月 21 日, 低温物質科学研究センターの新液化機の公開を行い, 記念の公開講座を開いた. ここではその公開講座の報告, 特にそこで行われた超流動ヘリウム4のデモンストレーション実験についての解説を行う.

公開講座は大学院理学研究科6号館401号室に於いて開かれた. 講師は, 低温物質科学研究センター・センター長の水崎隆雄教授, 国際融合創造センターの前野悦輝教授, 低温物質科学研究センターの松原明助教授の3名であった. 講演内容は, 水崎隆雄氏が「絶対零度を目指して 低温の科学史」のタイトルで, 気体の液化に始まる低温における科学研究の歴史について講演を行った. 低温研究の歴史は永久気体と呼ばれたヘリウムガスを液化することから始まり, その後の超伝導, 超流動の発見など多くの新しい現象の発見へとつながっていった. 人類は絶対に到達することのできない絶対零度を目指し多くの努力を行い, とてつもなく低い温度を得るに至っている. そこから得られた知識をもとに新しい技術への応用が現在も続いている. 前野教授は「低温科学の魅力 今年度ノーベル物理学賞: 超伝導と超流動」というタイトルで, 2003年度ノーベル物理学賞に輝いた, A.A. Abrikosov氏, V. V. Ginzburg氏, A. J. Leggett氏の業績に関連して, 超伝導・超流動の解説を行った. 松原明助教授は, 液体ヘリウム4の超流動に関連した実験を行った. このデモンストレーション実験に関しては以下に詳しく述べる. これら大変興味深い講演内容の講演内容に関しては, 低温物質科学研究センターのweb pageに掲載してあるので, 興味のある方はご覧いただきたい.

(<http://www.ltm.kyoto-u.ac.jp/kouen/newLIQ031121/>)

2. 超流動ヘリウム4の デモンストレーション実験

図1 ヘリウム4の相図

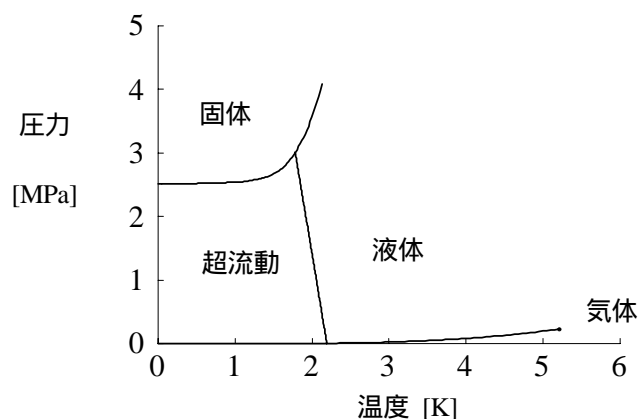


図 1 にヘリウム 4 の相図を示す。ヘリウム 4 は 1 気圧のもとでは 4.2 K で液化し、加圧しなければ絶対零度まで液体で存在する。固化させるには 2.5 MPa の圧力を要する。これはヘリウム原子同士の相互作用が弱くかつヘリウム原子の質量が軽いため、量子力学的なゼロ点振動が液化を妨げるからである。さらに、液体ヘリウム 4 は 2.17 K (転移温度という) 以下の温度で超流動状態になる。この液体状態は粘性測定の実験で粘性が観測されなかったことからこう呼ばれるようになった。この状態は粘性がなく熱を運ばない”超流動成分”と、通常の液体と同じように粘性を持ち熱を運ぶことのできる”常流動成分”の 2 成分の混合状態とする 2 流体モデルで説明される。2 成分の割合は温度とともに変化し、転移温度ではほぼ全て常流動状態にあるのに対し、絶対零度では全て超流動成分になる。この”2 成分の混合状態”のために、様々な興味深い現象が観測される。デモンストレーション実験ではそのうちから直接目で見てわかる現象を実際実験装置で演示した。

デモンストレーション実験で演示した現象は、超熱輸送による沸騰のない気化、スーパーリークの実験、噴水効果、フィルムフローの実験である。これらは全て超流動成分に粘性がないことがキーポイントとなっている。

3. 超熱輸送による沸騰のない気化

通常の液体では熱の流れがある場合、高温部分で熱くなった液体が冷たい方へと流れ、対流により熱を運ぶ。(ここでは拡散による熱の伝達が小さい場合を考えている。) 対流は、逆向きに流れる液体がお互いをさける効果と粘性のために流れが制限されてしまう。しかし超流動状態の液体ヘリウムでは、超流動成分に粘性がないため、”熱い”常流動成分が熱を運び、”冷たい”超流動成分が抵抗なく逆向きに進むことで、常流動成分のスムーズな流れができ、通常の 10000 倍もの速さで熱を運ぶことができる。デモンストレーション実験では、沸騰の様子からこの現象を間接的に見ることができる。温度を下げるための減圧排気を開始した直後は液体ヘリウムに沸騰が見られるが、超流動になった後は沸騰が収まる。これは通常の沸騰のように液体の中で気化せずに、超熱輸送のため液体の表面でのみ気化が起こるためである。

4. スーパーリークの実験

小さな容器の底に直径数ミリの穴を用意し、その穴に粒径の小さな微粒子(ここでは数百程度の大さを考えている)の粉をつめる。通常の液体は粘性のためにその穴を通過できない。しかし、超流動体は粘性のない超流動成分があるため、

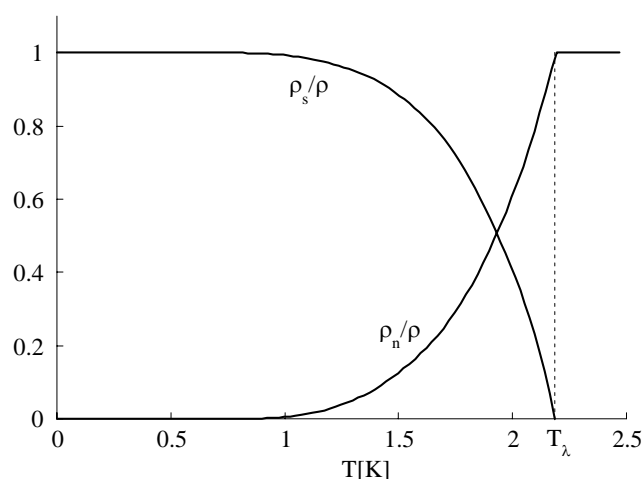


図 2 超流動成分と常流動成分の密度比



図 3 スーパーリーク

そのような狭い隙間でも通過することができる。この超流動体のみ通過できる隙間のことをスーパーリークと呼ぶ。デモンストレーション実験では、ガラスの容器の下に穴を設け、そこにアルミナ (Al_2O_3) の微粒子を詰めたものを用いた。液体ヘリウムが常流動状態の時は粘性のために液はスーパーリークを通過できないが、超流動になると徐々にスーパーリークを通過する様子が見て取れる。

超流動成分の割合は温度の低下とともに増えるので、温度が下がるほどスーパーリークを通過する液体ヘリウムの量が増える。そのため、最初は滴っていたものが、やがては水道の蛇口から水が流れるように液体ヘリウムが流れ落ちるのがわかる。

5. 噴水効果

超流動成分と常流動成分の割合は温度とともに変化する。低温になるほど超流動成分の割合が大きくなる。噴水効果は超流動ヘリウム 4 をスーパーリークで隔てた 2 つの空間に入れ、一方のみヒーターで加熱して温度を上げ、超流動成分と常流動成分の割合を変えることでおこる。超流動成分と常流動成分の割合が変わると、2 つの空間の化学ポテンシャルに差ができる。その差を打ち消すために、温度の高い方の空間内の液体の圧力が上昇する。この圧力が高くなる方の空間の先端を液面から出しておくとし、ヒーターに電流を流したときに圧力が上昇して液体ヘリウムが噴水のように吹き出すのが見える。出口の直径やヒーターに入れる電力にもよるが、数十センチの高さまで簡単に吹き上がる。



図 4
噴水効果

6. フィルムフロー

バケツ状の容器の下端を液体ヘリウムに浸すと、非常にゆっくりとはあるが液体ヘリウムが容器の壁をはい上がり、やがて容器の中の液面が周りの液体ヘリウムの液面と同じになるまで液が入り続ける。この現象をフィルムフローという。これは液体ヘリウムが壁から受けるファンデルワールス力によって引き上げられたものであり、数センチ程度の高さのところまで重力ポテンシャルと釣り合って 300 程度の厚みとなっている。通常の液体では粘性のためにこのように薄い膜が流れることはできないが、超流動状態のヘリウム 4 では十分流れうる。その結果、容器の内部と外部が超流動ヘリウム 4 の液でつながれた形となり、サイフォンの原理によって、液面の高い方から低い方へ液体が流れる。デモンストレーション実験では、下端をすこし尖らせたバケツ状の容器に液体ヘリウムを汲み、数センチの高さまで持ち上げて容器内部から超流動ヘリウム 4 が流れ出てくる様子を観察した。超流動ヘリウム 4 が超流動状態を保ったまま流れる速度には上限があるため、フィルムフローの実験では毎秒数滴の液体ヘリウムのしずくが滴る程度である。これをデモンストレーション実験で見るには、容器の下端の尖り具合や、光の当て具合に多少の試行錯誤が必要である。

7. デモンストレーション実験の実際

デモンストレーション実験ではガラス製の魔法瓶(デュワーと呼ぶ)を用いて実験を行った。しかし、単に魔法瓶を用いるだけでは室温から入ってくる熱のために液体ヘリウムがすぐに蒸発してしまう。そこで、液体ヘリウムを用いる実験ではデュワーを 2 重にし、液体ヘリウムの外側に液体窒素を配置している。これにより、液体ヘリウムに入る熱は液体窒素温度(約 -196)からとなり、蒸発が格段に少なくなる。現在の最先端の研究では金属のデュワーを用いており、液体窒素を用いなくてもかなり蒸発を抑え

ることができるが、直接液体ヘリウムを見ることはできない。液体ヘリウムの温度を下げるには、真空ポンプを用いて気液共存の状態が減圧していく。減圧を開始した当初は激しい沸騰が見られるが、2.17 Kを下回ると沸騰が収まるのが見られる。用いたポンプは660 リットル/分の容量のもので、液体ヘリウムが入っている部分から1インチ管でつないで減圧した。通常この程度であれば液体ヘリウムの温度を1.2 K以下まで下げることが可能である。スーパーリークの実験のための微粒子はアルミナの粉を用いた。リンデ社製の500 の微粒子を用いたが、大きさが十分小さければ粉の材質には依存しない。噴水効果の実験も同じアルミナ粉を用い、中に100 の電気抵抗をいれてヒーター代わりとした。白熱電球の光でも暖められて噴水効果を示すが、ヒーターの方が電力を変えることで噴水の高さをいろいろ変えられるので便利である。フィルムフローの実験では、容器の下端の形状がキーポイントとなる。今回はガラスの容器の先端を尖らせたものと、エポキシ系樹脂（スタイキャスト 1266）の容器の先端に1 mmの銅線をつけて、ヤスリで先端を尖らせたものを用いた。今回は1 mmの銅線を用いた方が落下する液滴の時間間隔が適度であった。

8. デモンストレーション実験の映像

今回のデモンストレーション実験を撮影した映像を低温物質科学研究センターのweb page 上においてある。興味のある方はご覧いただきたい。

http://www.ltm.kyoto-u.ac.jp/kouen/newLIQ031121/superfluid_video