

やさしい物理学

液体ヘリウムIIの超流動について*

P. カピッツ¹⁾ / 小島英夫訳

液体ヘリウムとその性質の研究は、極低温物理学の一分野に属す。それは極限状態における自然現象を研究する物理学の一つである。自然の条件を極限にまで変化させたとき、例えば超強磁場、超高压、高電場などの下で、また絶対零度に近い低温下では、新しい、興味のある現象の発見が期待される。そこでは、通常の条件下では観察されにくい、まったく起こらないような新しい現象を期待できる。そういう訳で、絶対零度に近い温度領域は興味深いのである。最近の10年間の研究はそのことを明確に示した。

絶対零度 (0K) というのは、どんな温度なのだろうか？ 最近のデータによれば、絶対零度は -273.13°C である。絶対零度には決して到達できないことが知られている。常識的な、教科書的な絶対零度の定義によると、そこでは物質の熱運動がなくなると言われる。この言い方は、正確ではない。量子論に基づいた現代物理学の観点からは、絶対零度でも運動は存在しうる。その運動のエネルギーは零ではなく、それはその物質に存在しうる分子運動の最小のエネルギーである。簡単な例をあげよう。物質を高温に熱すると原子核の周りの一定の軌道を運動して

いた電子は、熱運動のために引きはがされ、飛び去り、いわゆる解離が起こる。物質を冷却すると、電子はまたもとの軌道に戻って、絶対零度までその運動は変わらない。しかし、個々の原子のまわりの軌道上の電子運動のほかに、固体中には一連の集団運動があり、現代的な観点ではそれは極低温まで持続する。そのような温度では運動の縮退と呼ばれる現象が起こり、常温では見られない、まったく新しい現象が生ずるのである。

それらの興味ある現象の一つは、カマリング-オネス²⁾が発見し、広く知られるようになった超伝導現象である。超伝導とは、ある種の導体で極低温において電気抵抗なく、したがって熱の発生なしに、電流が流れることができる、というものである。閉じた導体に誘導で生じさせた電流は、熱の発生も、減衰もなく、実験家が観察した時間の間中流れ続けることが、実験によって示された。極低温だけで起こる同種の現象の一つは、われわれが5年前³⁾に液体ヘリウムで発見した超流動である。

絶対零度に近い温度におけるこれらの現象の研究は、液体ヘリウム自体を冷却剤として用いることによってなされた。液体ヘリウムは、常圧では極低温(絶対温度で千分の一度まで)でも液体状態にとどまり、固体状態に転移しない唯一の物質である。25気圧まで加圧してはじめて、液体ヘリウムを固化することができる。

液体ヘリウム自身が極めて興味深い研究対象なのである。

ヘリウムは4.8Kで液化し(常圧で)、水の7-8倍軽い、透明な液体になる。液体ヘリウムは比熱が小さいので、真空魔法瓶の断熱剤として優れており、その魔法瓶はさらに液体空気を使った魔法瓶の中に置かれる。液体ヘリウムを

* クヴァント、1990、No.1、7-14pp

1) П. Капица (1894-1984)。サンクトペテルブルグで学んだ後、ケンブリッジでラザフォードと研究し、1934年にロシアに戻った。1938年に超流動を発見した。1978年に低温物理学の研究業績によってノーベル賞を受賞した。この論文は、本誌の1970年10月号に掲載されたものを、この雑誌の発刊20周年を記念して再録したものである(訳注3も参照していただきたい)。なお、本誌の1994年5月号は、カピッツァ生誕100周年記念号となっており、種々の興味ある論文が掲載されている。機会をみて訳出したい。

2) H. Kamerlingh Onnes (1853-1926)。オランダの物理学者。液体空気、液体水素、液体ヘリウム(1908)の作成に成功した。1911年に超伝導現象を発見した。1913年に低温物理学を開拓した業績でノーベル賞を受賞した。

3) この表現から推測すると、この文章は1943年ごろ書かれたものであろう(訳注7も参照のこと)。いずれにしても、この論文は発見者本人による。科学することの真髄を述べたものであり、随所に優れた物理的考察がみられる。特に、超流動のいわゆる2流体モデルの誕生に関連して起こった、実験と理論のダイナミックな関係が紹介されており、科学者にとって教訓的である。

つかった実験は、極めて高度な技術を要求される。それは、世界中で液体ヘリウムを使った実験ができる低温研究所が今のところ数箇所に限られていることから分かるだろう。

液体ヘリウムをその液化温度 (4.8K) からさらに冷却すると、2.19K に達したとき変化が起こり、この現象を、液体ヘリウム I が液体ヘリウム II に転移する、と表現する。また、この温度をラムダ点 (λ 点) という。最初の状態にあるとき、液体ヘリウムは絶えず沸騰しているが、それは最良の断熱剤でもどうしても避けることのできない微小な熱の流入のためである。 λ 点以下では、ヘリウムは突然沸騰を止め、その表面は鏡のようになる；それは液体ヘリウムの一連の物性が変化したことに関係している。液体ヘリウムの新しい状態はカマリング-オネスによって最初に発見され、さらにケーソム⁴⁾によって研究され、極めて興味深いことが示された。

ケーソムは、液体ヘリウムは液体ヘリウム II の状態で非常に大きな熱伝導度を持つことを発見した。毛細管の中の液体ヘリウム II の熱伝導度は、例えば最も熱伝導度の大きな金属である銅や銀の数倍もある。それゆえケーソムは、液体ヘリウム II を超熱伝導物質とも呼んだ。私はケーソムの実験をいくらか違った条件のもとで再試し、その結果、熱伝導度はさらに大きいことを見出した。

熱伝導についての現代の考え方でこの実験結果を説明する試みは、理論と実験の間の大きな矛盾を明らかにした。私はここで非常に複雑な熱伝導度の理論的解釈を詳しく述べようとは思わない。しかし、熱伝導度の物理的説明は次のようにまとめることができるだろう：ある物質の、ある場所の温度が上がると、その分子の振動運動の平均速度が大きくなる；するとすぐに平均化が始まる一より「熱い」、すなわちより多く励起された分子は隣の分子を刺激する。速度を次第に平均化するこの過程は、加熱された場所から次第に遠くへ広がっていき、これが熱の拡散過程であり、それを熱伝導というのである。熱伝導のこのような考え方に基づいてなさ

れたより詳しい解析は、自然界の物質を通して単位時間に一定量の熱が伝搬することを示した。液体ヘリウム II で最近実験的に観測されたような、非常に大きな熱伝導度は、このような見地からは説明できなかった。この矛盾から抜け出す道は、科学に確固たる基礎をもった熱伝導の機構の基本的な考え方を捨てるか、液体ヘリウム II の熱伝導現象がなんらかの違った機構によることを示すと考えるか、のどちらかであった。

よく知られているように、熱は固体や細い毛細管の中の液体ヘリウムで起こると考えられる上記の機構 (伝導) で伝搬するだけではない。液体や気体中では、熱はいわゆる対流によって伝搬する。例えば、空気の大気対流は、熱いラジエーターの上に手をかざしたことのある人なら誰でもよく知っていることである。ラジエーターの熱が直接感じられない距離に手をかざしても、加熱された空気は上に向かって対流し、熱を上方へ運ぶのである。液体ヘリウム中の強い熱伝搬が、通常の熱伝導の機構で説明できないとすると、まさに熱の大気対流による伝搬がここでは起こっているに違いない、と私には思われた。そのためには、液体ヘリウム II には極めて容易に液体の流れが生じ、それがヘリウム II の極めて大きな熱輸送をもたらす、と仮定する必要があった。計算によれば、液体ヘリウム中に熱伝搬を生ずるためには、そこに異常に軽い対流がなければならないことになった。そこで、超伝導との類比で、私は極低温におけるヘリウム II が異常な流動性をもつ液体である、つまり粘性をもたない液体であると仮定した。このことを実験的に確かめることが必要だった。小さな粘性を、それも低温で研究することは、やさしい実験課題ではない。その測定に特別の方法を考案する必要があった。必要な方法を見出し、装置を作った後は、実験自体は多くの時間を必要としなかった。その結果液体ヘリウムの粘性は実際に消えているほど小さいことがわかった。液体ヘリウムは水の十億倍も流動性に富んだ液体である。それほど流動的な媒質を説明することは困難で、上に挙げた数値も粘性の大きさではなく、われわれの測定の限度を表わしている。それゆえ私は次のように提案した：すべての証拠を考慮すると、液体ヘリウムは粘性をもたない。私はそ

4) W. H. Keesom (1876-1956)、オランダの物理学者。液体ヘリウム II をウォルフケとともに発見した (1927年)、固体ヘリウムの製造にも成功している (1926年)。

れを超流動と名付けた。最初、この考えは多くの反対を受けた。私の実験は、方法、測定などなどに実験的欠陥があるのではないかと詮索された。液体ヘリウムにおける超流動の発見は、そのようにして世界的に研究され、今ではヘリウムIIに超流動状態が存在することは公認された、と私は思っている。

はじめてこの現象を明確にしたとき、液体ヘリウムで観測された大きな熱伝導度はヘリウムIIの超流動によって問題なく説明できると思った。というのは上に述べたように、対流によって熱伝搬を説明できる筈だからである。しかし、事態はわれわれが最初に考えたよりずっと興味深く、かつ複雑であった。

この問題に関するわれわれの説明を、これ以上同じ調子で続けることはできない。以下では、どのような矛盾に突き当たったのか、われわれの解釈をどのように変更したのか、どのように新しい考え方が形成されてきたのかを説明しよう。その考え方は、現実の実験とは何も関連のないもので、筋の通ったお話に過ぎないと見えるかもしれないが。

普通の条件下における普通の物質の振る舞いを記述することのできる、通常の力学的描像の見地に立てば、超流動ヘリウムが測定結果が示すほどの多量の熱を対流によって運ぶことはできない。われわれは、対流によって必要な速さのヘリウム流を引き起こす、新しい機構を発見しなければならない、という難題に打ち当たる。通常対流による熱輸送の機構では、媒質の運動を考え、その運動は、加熱された液体あるいは気体は希薄になるにしたがって上へ、より高密度の媒質の中を浮き上がり、冷たい部分はより高密度で下へ〈沈む〉。混合が起こる原因は、あきらかに重力である。しかし計算によれば、ヘリウムIIにおけるこの力は、実験的に得られたような大きな熱伝導を説明するには充分でない。それゆえ、この現象はふたたび理解不可能になってしまった。それを説明する何か他の、新しい機構を探し出すことが必要だった。一連の実験が、ついにヘリウムIIの運動の全く新しい機構を示すことに成功した。

温度差があるとき、液体ヘリウムIIには非常に強い流れが生ずるように見えた。温度差があ

れば液体は動き出すのが当然だが、この運動はまったく特別な種類のもので、液体ヘリウムIIに特有のものであり、他のどのような液体でも、どのような条件下でも見られないものであった。

その運動を説明する前に、それがどのように特別なのかを知っておこう。実験的にはどのように見えるのかを考えることにする。ただし、その技術的な詳細は省略する。実験の基本的な特徴を図1に示した。

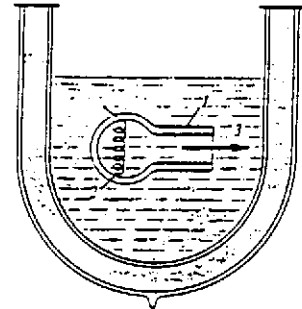


図1

超流動ヘリウムIIの中にフラスコ1が吊るされている。その太い部分には加熱用のコイル2があり、他端3は細い首になって、開いている。コイル2に電流を流すと、首3の付近でフラスコからヘリウムが連続的に流れ出すのが分る。たとえば、軽い小翼を首の部分に吊るすことによってこの流れを観測することができる。流れが小翼を押して、それをなびかせるのである。

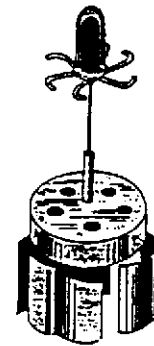


図2

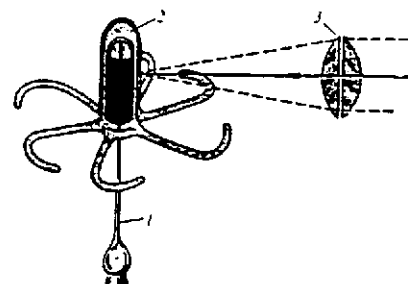


図3

この効果のデモンストレーションのために、より有効で教育的な装置が考案され、映画フィルムに撮られた。(その一コマを図2に示した。この装置が図1のフラスコの代りをする。) 動作を示すための拡大図を図3に示す。ガラスの〈蜘蛛〉(図3の上部の構造)は〈小バルブ〉2からなり、そこには何本かの、一方向に曲げられた中空パイプが付けられている。このような〈蜘蛛〉の構造は、よくしられた〈セグナー車輪〉の形をしている(外形だけであり、〈蜘蛛〉には液体が環流する流路はない)。小バルブはとがった先端をもつ軸1の上に乗っている。〈蜘蛛〉の全体には液体ヘリウムが満たしてある。小バルブの中のヘリウムはレンズ3を通した光で加熱できる。この光線は小バルブの内側の黒くぬった部分にあたり、前の実験(図1)のヒーターの役割をする。小バルブを加熱すると、曲がったパイプ—〈蜘蛛〉の脚—からは、前の実験のフラスコの首からと同様に、ヘリウムが連続的に流れ出し、噴出する流れの圧力で〈蜘蛛〉全体が回転する。

この実験の撮影は困難であった。液体ヘリウムは完全に透明であり、その光線にたいする屈折率の大きさは、ガラスを通して観察するのが非常に困難なものであった。また、撮影に必要な明るさの下でこの実験をするのも容易ではなかった。したがって、モスクワのニュース映画撮影技師は、この撮影のために特別の工夫をしなければならなかった。

もう一度、図1を見よう。今度は、この実験の最も大きな矛盾にあなたがたの注意を向けていただきたい。フラスコから液体が流れ出しているのにフラスコがいつまでも空にならないことを観察していると、液体がフラスコの中に絶えず流れ込んでいるに違いない、と思うだろう。液体はどのようにフラスコの中に入るのだろうか? 液体は対向流と衝突せずに流れ出すことができるのだろうか。フラスコの壁は2重になっており、その隙間は真空であって、明らかにそこを液体が通過することはできない。首の位置にある小翼は逆流が存在することを示していない。そこで私はまず第一に、壁際の非常に薄い層に沿って流れがあるに違いないと結論した(なぜならば、小翼では観察できないのだから)。

しかし更に実験を続けると、この仮定は正しくないことが分かった。実験条件を変えてみた: 首の広いフラスコと同時に非常に狭いスリットをつかった。この実験の目的は、スリットの隙間全体に逆向きの、壁に沿った流れが生じることによって、観察している現象を変化させることであった。この実験に使ったスリットは、念入りに(光学的に)研磨を施した表面をもち、幅は $0.14\mu\text{m}$ までの、つまり1万分の1ミリ程度のものであった。しかしながら、この現象の変化は観測されなかった。

このようにして、この現象はいっそう不可解なものになった。

この現象が現在どのように理解されているかを述べる前に、さらにいくつかの実験について説明しておきたい。

まず、熱現象の可逆性の概念を説明しよう。この概念は100年以上前にカルノー⁵⁾によって最初に確立された: それは仕事を熱に変換する可能性と、逆に熱を仕事に変換する可能性との間の非常に重要な関係を与える。熱力学において可逆現象というのは、熱が仕事に変換され、また逆に仕事が熱に変換されるような、すなわち熱の散逸が起こらないような理論的過程を意味する。完全に可逆的な過程は、一般に自然界には存在しないが、それに非常に近い過程は存在しうる。ヘリウムで熱が運動に転換すること、例えばわれわれが〈蜘蛛〉で観察したような現象は、まずこの観点から研究する必要がある。もしフラスコの中と外での温度差がヘリウムの運動を引き起こし、さらにもしそれが可逆的ならば、理論的には逆の現象が存在するはずである: ヘリウムを強制的に運動させれば、温度差が生ずるだろう。もしこの現象が可逆的ならば、これらの現象の間には一定の定量的な関係が存在するだろう。

スリットを使った実験で、次のことが明らかになった: スリットを通して液体ヘリウムを流すように圧力をかけると、実際に温度差が生ずる。すべての必要な量を定量的に測定することによって、液体ヘリウムIIに起こるすべてのこ

5) N. L. S. Carnot (1796-1832). フランスの物理学者。熱量の保存と永久機関の不可能なことを二つの原理として、カルノー・サイクルの理論を展開した(1824年)。

これらの現象は熱力学的な可逆性をもつことが示された。液体ヘリウムIIが超流動性をもつので、その流れが摩擦で失われないことを考えると、ヘリウムの温度差による流れ（温度流）の機構は高い効率で動作することが容易に分かる。したがって例えば、図2と3に示した、われわれの回転する〈蜘蛛〉は高い効率で熱を運動に変える装置である。このような機構を実際に応用することは考えられないし、将来それができると期待するのも望み薄である。

しかし、ヘリウムIIのこの目覚ましい熱力学的性質は、熱を力学的仕事に可逆的に直接変換する、まったく新しい方法を示しており、これまでわれわれが知っている自然現象とはまったく違ったものである。

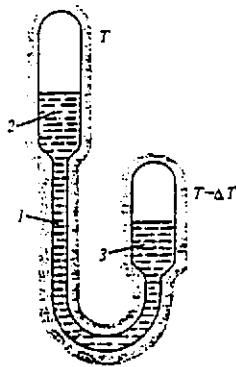


図4

液体ヘリウムにおける熱機械的な、より正確には熱力学的な現象の可逆性は、低温における現象をさらに研究するためにも、非常に重要な要因である。次のような状況を考えてみよう：図4に示すように、違う高さに置かれた二つの容器2と3が毛細管1でつながれている。毛細管の両端に圧力差をつける。圧力差は毛細管の一端の容器2を他端の容器3より高くすることによって得られる。するとヘリウムの特性と現象の可逆性によって、毛細管の両端の容器2と3に温度差 ΔT が生ずる。低い容器3のヘリウムIIはより低温になる。

こうしてヘリウムIIの温度を下げる方法が見つかった。それはヘリウムIIに圧力をかけて流せばよい。たしかに図4はこの原理の概念図に過ぎないもので、実験はもっと複雑である。

この現象が極低温まで可逆的であるので、非常に興味のある実用的な結論が導かれる。ヘリ

ウムをポンプかなにか他の方法で、細い毛細間隙を通して一つの領域に押し込むとしよう。するとあきらかにその領域の温度は下がる。この動作を数回繰り返すことによって、温度をいくらでも下げる方法が得られ、したがって絶対零度にいくらでも近づくことができる。今のところ絶対零度に限りなく近づく他の方法は理論的にも存在しないので、この方法は実験家にとって重要な意味をもっている。

開戦（独ソ戦）の前日に、われわれはこの方法を実用化する研究を始め、この面でいくらかの実験を成功させた。私はこの方法をつかって0.4Kに到達した。確かに、この新しい方法で絶対零度に極く近い温度を得るのは、技術的に容易でない問題で、すぐに成功することは難しいと思われていた。技術的な困難が沢山あり、成功は実験家の技術と独創力に大きく依存した。しかし、それらの考えうるすべての課題も、絶対零度に近づくことに原理的な困難があることを意味するわけではなかった。

ここで、フラスコを暖めたときに液体ヘリウムがそこから流れ出す現象の機構の理論的説明に移ろう（図1）。上に述べたように、最初私はヘリウムがフラスコを満たし続ける現象を、薄層状のヘリウムの逆方向の流れで説明した。また私はこの薄層内のヘリウムIIのエネルギー状態が自由なヘリウムIIのエネルギー状態とは違っていると、ヘリウムの熱伝導度が見掛け上に大きくなることを説明した。また、そこを流れるヘリウムの流速が不自然に大きくないとして、その薄層のおおよその厚さを計算することができた。さらに、自分の実験でその厚さを実験的に決定することを試みた。そのために、ヘリウムを狭いスリットに流し込んだ。最終的に、ヘリウム層の厚さは0.00014mmにまで達したが、全ての現象の特性は変わらないことが分った。したがって、説明は見直しを迫られ、ヘリウムIIの流体力学的性質について、まったく新しい考え方に到達した。その概念の最初の着想はティサ（L. Tisza）によって与えられたが、それを体系化し、その理論的基礎を研究し、現象の流体力学的理論を作り上げたのはロシアの物理学者ランダウ⁹⁾だった。

この理論の最も一般的な概観を以下に記そう。

この理論によれば、私が仮定した、小バルブの内部にあるヘリウムとは違ったエネルギー状態にある、壁にそって流れるヘリウムの逆流は、ヘリウム自身の中にあるヘリウムの逆流と考えられる。

ランダウが与えたこの現象の説明は、次のように要約される。

液体ヘリウムは2種類の流体の混合状態である。液体ヘリウムのこの2種類の成分は、二つの異なる量子状態にある。そのために、同じ流体の中に対向する流れが同時に存在することができ、その一方が図1のフラスコの首のところで観測されるのである。

この理論的な主張が実験的な証拠で完全に基礎付けられていなかったならば、それは理性的に受入れるのが非常に困難な考えであったろう。

ランダウの理論は、二つの状態の物理的本質と λ 点以下の温度でヘリウムが同時に二つの状態に存在し得ることを見事に説明していた。すでに上に述べたように、液化したヘリウムをさらに冷却すると、2.19Kすなわち λ 点までは常流動状態にとどまる。ランダウの理論によれば、そこで液体の中に新しい状態にあるヘリウムが混合物として現れる。この新しい状態のヘリウムは粘性がないという特徴をもっている。このヘリウムは液体ヘリウムIIと呼ばれ、絶対零度では全てのヘリウムがこの状態にある。しかし他の有限の温度では、この状態は常流動状態との混合状態として存在する。温度が下がると、ヘリウムIIの割合は増加する。理論によれば、絶対零度においてだけヘリウム全体が超流動状態に転移する。この描像はわれわれの観察した現象をすべて説明することができた。例えば、図1に示したフラスコからヘリウムが流出する実験で観察された現象は、次のように説明される：超流動状態にあるヘリウムは壁にたいしても、常流動状態にあるヘリウムにたいしても粘性を持たないから、毛細管を流れる流体は摩擦を生ずることがなく、気付かれずにフラスコを満たす⁶⁾。逆に、常流動状態のヘリウムはフラ

スコから粘性をもって流れ出し、それは流体力学で昔から研究されてきた流体の普通の流れである。この常流動流は図1のフラスコの首に付けられた小翼で感知されるが、それに対向して流れる超流動状態にあるヘリウムの流れは普通の方法では観察できないのである。

この描像に基づいて、ヘリウムIIの大きな熱伝導度も説明できる。明らかに、パイプの中には超流動状態のヘリウムが入り込み、そこで常流動状態のヘリウムに転移する。ヘリウムが一つの状態から他の状態に転移するためには、一定の熱を費やすことが必要である。この過程は一種の対流であり、ヘリウムIIの大きな熱伝導度という現象を示す。

これら全ての現象は物理学的な思考の習慣的な枠内で理解するのは困難で、その説明には同じ体積内にある同じ流体の二つの異なる状態の間の複雑な相互作用を仮定しなければならなかった。ヘリウムIIの熱伝導度の機構のこの複雑な描像の理解を、表面的にでも少し容易にするために、次のようなアナロジーに頼ることを考えた：劇場のクロークに出入りするオーバーを着た人と着ていない人の対向する流れを取上げる。オーバーを着ていない人はヘリウムの超流動原子を表わす。オーバーを着た人はヘリウムの常流動原子を表わし、ヒーター（<クローク>）の近くで必要なエネルギー（<オーバー>）を受け取ったのである。残念ながらこのアナロジーは不完全で、超流動状態のヘリウム原子は常流動状態にある仲間の原子と全く相互作用なしに行き交うことができるのに、それに対応するオーバーを着ていない人は、オーバーを着た群衆の中を強い摩擦を受けずに移動することはできない。

この描像に基づいて、狭いスリットや穴を通してヘリウムIIを流したとき温度差が生ずる現象を説明することができる。超流動状態にあるヘリウムは粘性をもたず、常流動状態のヘリウムよりも容易に狭いスリットを通過するから、独特のフィルターが働くことになる。流れた後

(p. 79へつづく)

6) L. D. Landau (1908-1968). 物性論、素粒子論、場の量子論で優れた業績をあげたロシアの理論物理学者。1938年以来、超流動の研究を行い、量子流体力学による第2音波の予言をした。1962年にノーベル物理学賞を受賞した。

7) 超流動流体の流れは、その中に置かれた物体を理想的に迂回し、物体の前と後ろの圧力は同じである。そのために、図1に示した実験で超流動ヘリウムIIの流れは小翼をなびかせず、感知されないのである。