

こんな異常現象をご存じですか

——ヘリウムの濡れと超流動——

上羽 牧夫

ヘリウムは気球につめたり、冷却用に使われる他はあまり人々の暮しに役立つ“材料”ではないが、物理屋の特に好む物質の1つである。そのわけは、単純で理論的に扱いやすいということのほかに、極低温で量子的世界をのぞかせてくれるところにある。巨視的な量子現象である超流動性を示し、それに関連してさまざまな不思議な振舞いをする、ここでは濡れと関連した2、3の現象を紹介しよう。

容器から這い出すヘリウム

グラスの中の琥珀色の葡萄酒が食卓の上にこぼれて広がっていたら、それは誰かがグラスを倒したからに違いない。しかし、中にはいっているのが液体ヘリウムだったら、そうとは限らない¹⁾。2 K以下の極低温ではグラスを倒さなくても液体ヘリウムは容器の壁を這い上ってこぼれ出してしまふ。これは驚嘆すべき現象だが、理由は簡単である。2 K以下のヘリウムは超流動液体と呼ばれ、粘性をまったく持たない流れを起こす。さらに液体ヘリウムは容器の壁を完璧に濡らすので、グラスの表面に薄い液体の膜を作ってそれを伝って外へ逃げてしまうのである。

もう少し詳しく説明しよう。平衡状態の液体の自由表面が等ポテンシャル面になることは誰でも

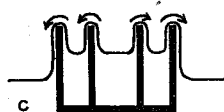
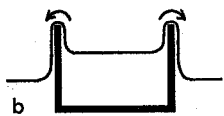
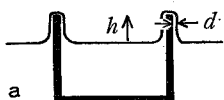


図1 a)濡れが完全な場合の等ポテンシャル液面。b)容器を持ち上げればサイフンのように流れ出す。c)超流動ヘリウムでは液面の高さの差がない場合でも流れ出す。

知っている。ヘリウム原子と容器の壁との間には液体原子同士よりもずっと強い引力が働いているので、等ポテンシャル面は図1 aのように容器の表面を薄い膜のように包む。相互作用が van der Waals 力ならばポテンシャルエネルギーは $U(d) = -\alpha/d^3$ となつて

$$mgh - \frac{\alpha}{d^3} = 0 \quad (1)$$

から、膜厚 d が液面からの高さ h の関数として求まる； $d = (\alpha/mgh)^{1/3}$ 。 α は $10^{-37} \text{ erg} \cdot \text{cm}^3$ 程度の量で $h=1 \text{ cm}$ の時 d は数百オングストロームになる。

図1 bのように容器を持ち上げたら、サイフンのようにして液体ヘリウムが流出することは納得がいく。

流出速度は次のように決まる。超流動ヘリウムは重力でどんどん加速されながら流れるが、臨界速度というもの

があって、これより速いと超流動がこわれてしまう。この速さ v_c は超流体の中に渦糸（超流動流はポテンシャル流なので渦度は糸状の特異点に集中する）ができて、散逸がはじまる条件で決まっています。これは膜厚に依存し（薄ければ渦はできにくい）

$$v_c d \sim \frac{\hbar}{m} \sim 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec} \quad (2)$$

である。この式からわかるように膜厚が増すと臨界速度が減少し流出量は膜厚によらない。したがって流出量は壁の高さ h によらないことになる。

はじめの説明で、完全な濡れさえ起これば葡萄

酒がグラスを這い出してもよいではないかと思われた方もおられよう。その通りである。ただし気長に待たなくては行けない。超流動ヘリウム以外の流れは粘性流なので、流体に力が加わっていないければ流れない。流体力学の教科書に書いてあるように、圧力勾配のある厚さ d の膜での平均流速は、

$$\bar{v} = -\frac{d^2}{3\eta} \nabla P \quad (3)$$

で与えられる。ここで η は粘性率で、水で 0.01, 超流動転移よりわずかに高温の常流動ヘリウムで $2 \times 10^{-5} (\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \text{sec}^{-1})$ である。圧力勾配は最高部からの落下距離が h より充分に長ければ $\nabla P \approx \rho_l g$ (ρ_l は液体の密度 $= 0.15 \text{g/cm}^3$, g は重力加速度 $= 980 \text{cm/sec}^2$) である。この式は係数 1/3 を別にすれば次元解析でも簡単に得られる。これは超流動の場合の式(2)とは大分違う——通常の流体では粘性に逆らって液体を押さねばならない。(3)と(1)とから単位長さの幅を持った膜での流量は、

$$J = \rho_l \bar{v} d = \frac{\rho_l^2 g}{3\eta} d^3 = \frac{\rho_l^2 \alpha}{3\eta m} \frac{1}{h} \quad (4)$$

となる。常流動ヘリウムの数値を入れて実験に費すべき年月が見当がつく。葡萄酒がグラスを這い上がることも乾いてなくなることを心配すべきである。

ところが最近こうした予断を破る実験が行なわれた²⁾。メタノール、水などでも 1 時間に 1 滴くらいの割合で壁を這い上がって雫がたれるというのである。この実験では、X 線フィルム表面を液体を這わせるようにして実験系全体を恒温水槽に入れて観察している。膜面での光の干渉縞が見られることから、液体と壁との相互作用がヘリウムの場合よりはるかに強く膜厚がずっと厚いということがわかる。流量 J は膜厚 d の 3 乗に比例するから、膜厚が何十倍かになればこういうことも可能なわけだが、普通の液体では這い出しは見られないという“常識”を打ち破るおもしろい実験である。それでも超流動ヘリウムが特別であることを納得していただけるよう図 1 c のような場

合に内側と外側の容器の液面が同じ高さなのに液体は流れていけるという事実を指摘しておく。

固体ヘリウムによる“濡れ”

ヘリウムは常圧では絶対零度まで液体だが、25 気圧の圧力下では固体になる。この固体が壁を“濡らす”かが問題である。“濡”という字にはさんずいがついているから、本当は液体を押しつけて壁を乾かすと言った方がよいような気もするが一応“濡れ (wetting)”と呼ばれている。

実は、壁の上のヘリウム膜の最初の 1~2 原子層は液体ではなしに固体になっている。壁からの van der Waals 引力が強いので一番下の原子層は上の液体の重みで数百気圧の圧力を受けたと同じ状態になって固化してしまう。この意味で本当に壁を濡らすのは液体ヘリウムではなくて固体ヘリウムなのだが、普通はこの薄い固体層を除外して議論する。

さて圧力をかけてゆくと固体ができるが、小さな容器のなかにできた固体を見るとあたかも液体のようである(図 2)。固体ヘリウムは液体より密度が高いので ($\rho_s = 0.19 \text{g/cm}^3$, $\rho_l = 0.17 \text{g/cm}^3$) 下側にでき、またメニスカスもできる。これが $T \geq 1.3 \text{K}$ での平衡状態での形である。通常の物質では結晶の平衡形ができるには天文学的時間がかかるが、超流動ヘリウムからの固体の結晶成長は異常に速く³⁾、こんな現象が簡単に見られる。

結晶が壁となす角 θ は 130~160 度で、ヘリウム結晶は壁を不完全にしか濡らさない ($\theta = 0^\circ$ が完全な濡れ, $\theta = 180^\circ$ がまったく濡れない状態)。もう少し正確に言うと、バルクの結晶は壁の表面にできた薄膜結晶を不完全にしか濡らさない。薄膜の結晶成長の用語では Stranski-Krastanov 型に属する。ただ、グラファイト壁は例外なようで、薄膜結晶がだんだんと厚くなって完全な濡れを示すと思われる。

接触角 θ が有限であるために“常識”に反して壁が結晶の核生成を妨げることがある。超流動へ

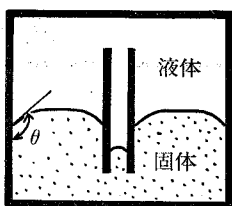


図2 25気圧のかかった容器のなかの単結晶固体ヘリウム。毛管現象が見られる。

リウムは粘性のない流れによって、スーパーリークと呼ばれる微粒子粉末、有孔ガラスなどのきわめて小さな穴 ($\leq 100\text{\AA}$) の中をすすり抜けてゆく。これに圧力をかけると固化が起こるのだが、そのために必要な圧力はバルクの固体よりも何と10気圧以上も大きい。これは固体が壁をちゃんと濡らせないために、結晶の臨界核がスーパーリークの穴よりも小さくなくてはならず、小さな臨界核ですむには非常に大きな過圧が必要になるというわけである。不純物や壁があると固体の臨界核が得意いことはよく知られているが、ここで起こっているのはその正反対の現象と言える。

常温超流動は可能か？

ヘリウムでの濡れと関連した劇的な現象を2, 3紹介したが、いずれもヘリウムの濡れが異常だと言うよりは、普通の濡れが超流動と結びついて異常現象を起こしたものである。

最近、高温超伝導物質が発見され広範な実用化の可能性とからんで話題となっている。超流動も室温で実現できれば用途もいろいろ開けてきそうだが、いったい高温超流動は可能だろうか？ 超

流動（超伝導とは電子の超流動である）は本質的にボーズ粒子系の巨視的量子現象なので量子効果が重要となる縮退温度が問題である。電子系ではこれは 10^4K のオーダーなのだが、電子はフェルミ粒子だからフォノンの力を借りてこれを2つ結合させてボーズ粒子にするのに10K程度の低温が必要だった。今回の高温超伝導体は、まだその機構は未解明ながら、この温度を1桁上げたもので電子の縮退温度に比べれば、まだまだずっと低温の現象である。超流動は電子よりずっと重い原子の起こす現象だから、2番目に軽い元素のヘリウムでもこの縮退温度は1Kのオーダーになってしまい 10^2K での超流動はできそうにない。縮退温度を上げるには密度を上げる他はない。中性子星内部のように密度を $3 \times 10^{14}\text{g/cm}^3$ くらいにすれば室温でも十分に超流動が実現する（実は 10^8K 以上で！）と考えられる⁴⁾。ただしこの時は、原子ではなく重力で圧縮された核子の超流動で容器はないから、濡れはあまり問題になりそうもないが……

這い出しの実験について、プレプリントを送っていただきまた議論をしていただいた佐々木祥介氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) F. ロンドン：超流体ヘリウム（講談社、1975）。
- 2) S. Sasaki: J. Phys. C. (to be published).
佐々木祥介：物性研究 48 (1987) no. 3.
- 3) 上羽牧夫：固体物理 20 (1985) 431.
- 4) 高塚龍之：日本物理学会誌 41 (1986) 163.

濡れ測定の実際！ 高温におけるスラグ及びメタルの物性測定<コンパス社>

加藤 誠 著 A4判 369頁 1987年4月24日発行 定価 15000円 送料500円

「ちょっと測定してみよう」「こんなデータがほしい」といった時、自分で装置を組み、測定方法を確立してデータをとるまでに一体どれ位の時間や労力がかかるものでしょうか。最新の全自動計測機器にしても、それを使いこなして信頼性の高いデータを出すまでには、やはり種々の検討事項をクリアしなければなりません。

本書は、著者の永年にわたるこれらの分野における物性測定について、みずから出したデータと附随する経験や検討事項、さらに内外の文献を調査、整

理しまとめたものです。データは読み取って利用しやすいように作図されています。

主要目次：溶融スラグの物性測定／物性測定法の検討／溶融スラグの粘性係数、密度、比電導度及び電導イオンの移動停止温度の測定／溶融スラグにおける物性値相互の関係と物性値の推定／溶融ガラス及びスラグの表面張力と耐火物への濡れ性／歯科用金属材料の密度測定／〔付録〕 Bashforth&Adamsの方法による静的解析の実際