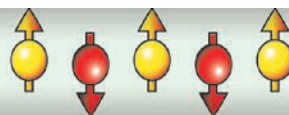


Up the magnetic pressure

磁気圧を上げる

Shaun Fisher and George Pickett



超流動ヘリウムの磁気噴水効果を観察することは、実験として美しいだけでなく、ほかの多くの不思議な磁気現象を研究するための手段にもなる。

Nature Vol.444(832-833)/14 December 2006

ヘリウムの軽い同位体である ^3He は、絶対零度からわずか数ミリ K という温度で液体の状態にあり、超流動体として奇妙な性質を示し始める¹。興味深いことに、こうした超流動状態では、質量だけでなく磁気も摩擦なく移動することができる。Nature 12月14日号 909 ページ²で、山口らは超流動 ^3He のこの2つの性質の間の相互作用を利用して、圧力をかけることで磁気を誘導し、磁気をかけることで圧力を誘導する装置を開発したと報告している。

液体が摩擦なしに流れる超流動は、巨視的な数の粒子が系の最低のエネルギー状態（基底状態）を占めるときに起こる。ひとたびこうした「凝縮」が起こると、粒子は1つの量子力学的実体として集合的に振る舞うようになり、自由に流れ始める。凝縮のしかたは、厳密には、粒子の量子力学的な種類によって決まってくる。粒子は、そのスピン角運動量（単に「スピン」という）に応じて、ボース粒子とフェルミ粒子の2つに分類することができる。ボース粒子は作用量子（プランク定数 h をある数で割ったものであり、 \hbar と表記する）の整数倍のスピンをもち、フェルミ粒子は作用量子の半奇数倍のスピンをもつ。原子を構成する電子や陽子や中性子は、いずれもフェルミ粒子である。

最も単純な超流動は、ボース粒子がボース-アインシュタイン凝縮という過程を経ることにより形成される。一般的な例は、 ^4He が約 2K 以下の温度で示す超流動である³。 ^4He 原子は、半奇数スピンをもつ4個の核子（2個の陽子と2個の中性子）と、その周りをまわる半奇数スピンをもつ2個の電子からできている。これらのスピンをたし合わせると原子全体ではスピンのゼロになるため、 ^4He 原子はボース粒子ということになる。超低温希薄気体では、より理想的なボース-アインシュタイン凝縮が起こる⁴。

^4He とは対照的に、奇数個の核子（2個の陽子と1個の中性子）からなる ^3He は、原子全体ではスピンの半奇数になるため、フェルミ粒子ということになる。ボース粒子とは異なり、フェルミ粒子はパウリの排他律という法則に従っており、複数の粒子が同一の量子状態をとることができない。だとすると、フェルミ粒子が凝縮して超流動を起こすことはないように思われる。けれどもフェルミ粒子は、低温で対になって整数スピンのボース粒子を形成し、それが凝縮を起こす可能性がある。このような対凝縮が固体中の伝導電子で起きたものが超伝導である。最近になって、ある種の超低温原子気体でも同様の凝縮が起こることが実証された⁵。

液体 ^3He 中では、数ミリ K 以下の温度で起こる凝縮が、超流動体に奇妙な振舞いをさせている。凝縮対のスピンはゼロではなく、特定の方向を向く軌道角運動量もゼロではない。この第2の性質が、液体に方向性を与える。つまり、角運動量の向きに対して水平な方向への擾乱と垂直な方向への擾乱に対して、液体が異なる応答をするのである。こうした向きは液体中の領域ごとに異なっていることがあり、運動量の「織目」を生じさせる。凝縮対は質量だけでなくスピンと軌道角運動量ももっているため、ある条件においては、 ^3He の超流動性とは、この3つの物性のすべてについて摩擦なく流れることであるといつてよい⁶。スピンは粒子の磁気的応答と密接に関係しているため、超流動 ^3He では磁化も摩擦なしに移動することになる。

山口ら²は、 ^3He のこうした性質を利用して、ほかの超流動体でみられる奇妙な熱-機械現象を、磁気について初めて実証することに成功した。この現象は一般には噴水効果として知られており、絶対零度よりも高い温度で一部の原子が熱的に励起して高いエネルギー準位に移る

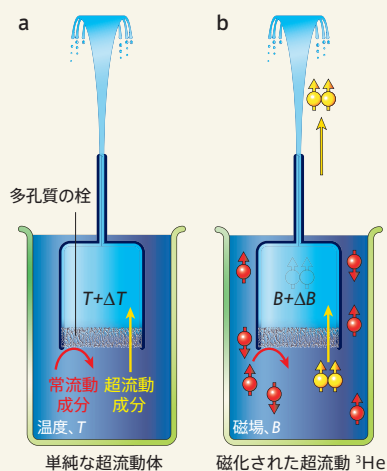


図1 磁気噴水効果

a. 単純なボース粒子の超流動体 (^4He など) では、凝縮した超流動成分と常流動成分が混ざり合っている。液体の流れを制限する多孔質の栓 (スーパーリーク) を挟んで温度勾配 ΔT をかけると、超流動成分は温度差をなくすために栓を通過して移動していくが、粘度がある常流動成分はここでせき止められてしまう。その結果、超流動成分の「噴水」ができる。

b. ^3He では、超流動成分は原子対 (黄色) を形成している。これは、 ^3He 原子がフェルミ粒子であるため、単独で凝縮して超流動状態になることができないからである。山口ら² が調べた ^3He の A_1 相では、超流動対が強く磁化され、そのスピンの対が強磁場に沿って整列しているのに対して、対をなしていない原子 (赤) は磁化されていない。このとき、磁化されたスピンの対が移動して、磁場勾配 ΔB が作り出す磁化の差をなくそうとすることで、磁気噴水効果を生じさせる。

ときに起こる。これらの原子は凝縮体の一部ではないため、粘度がゼロではない、古典的な常流動成分となる (基本的に、粘度は液体が生み出す摩擦抵抗力の尺度になる)。

常流動成分と超流動成分が混ざり合ったこのような液体に圧力勾配をかけて、細い管や多孔質の栓から押し出すことを考えてみよう。粘度がゼロの超流動成分はこの部分も自由に通過できるのに対して、常流動成分は粘度があるため通過することができない。この栓はスーパーリークとよばれ、常流動成分を除去するフィルターの役割を果たしている。凝縮した超流動成分は熱エネルギーをもたないため、栓を通過してきた部分の液体の温度は低くなる。これに対して、栓を通過していない部分の液体では、熱的に励起した常流動成分の比率が高くなるため、温度も高くなる。圧力勾配をかけることで栓をはさんだ液体に温度勾配を生じさせるこのような機械-熱効果は、超流動 ^4He ではよく知られている。噴水効果はこれとは逆の現象であり、スーパーリークを挟んで温度勾配をかけたときに起こる。この温度差をなくすために超流動成分が移動して流れが生じ、この圧力差を上に向けるときに噴水ができるのである³ (図 1a)。

山口らが今回観察した磁気噴水効果には、強磁場のもとでのみ存在する超流動 ^3He の A_1 相とよばれる状態が関係している。 A_1 相では、超流動成分の凝縮原子対のすべてが磁場に沿ってスピンを整列させるが、対をなしていない原子ではそのようなことは起こらない。スーパーリークは強く磁化された超流動成分だけを通過させることにより、スピンフィルターとして機能する。スーパーリークをはさんだ圧力差によって生じる機械的な流れは、ここを通過した液体をさらに強く磁化させる。逆に、磁場勾配により生じた磁化の差は、スーパーリークを挟んだ圧力差を生じさせることになる。これは、磁化の差をなくそうとして超流動体が移動するからである (図 1b)。

こうした実験²は、非常に強い磁場と非常に低い温度の中での高感度の測定を必要とする。磁気噴水効果を観察した著者らはさらに、同じ装置を利用して磁化が緩和する過程について調べた。磁化の緩和は、噴水の圧力の低下として反映され、半透膜の変形を通じて測定することができる。興味深いことに、著者らが得た知見は、事前の予想に反していた。すなわち、液体ヘリウムの超流動 A_1 相は完全には磁化されておらず、凝縮対の一部は磁場の向きとは逆の方向を向いているようなのである。だとすると、 A_1 相の性質について広く受け入れられている単純化された概念は、改めなければならないかもしれない。

磁気噴水効果は、機械的スピンフィルターの美しい実演になるだけでなく、強磁場における磁化の緩和などの広範な磁気現象を調べるための便利な道具にもなりうるだろう。将来的には、この系や類似の電気系に基づく応用技術にも大いに期待することができる。一部の風変わりな超伝導体は超流動 ^3He に似た構造をもっているため、これらも磁気噴水効果を示す可能性がある。このような材料を組み込んだ素子を作製することができれば、外部から与えられる磁場などの大きさに応じて摩擦なしにスピンを操作する素子なども考えることができる。このような性質は、急速に拡大しつつあるスピン電子工学の分野に、各種の新しい素子や微小機械をもたらすだろう。 ■

Shaun Fisher and George Pickett, ランカスター大学 (英)

1. Volovik, G. E. *Exotic Properties of Superfluid ^3He* (World Scientific, Singapore, 1992).
2. Yamaguchi, A., Kobayashi, S., Ishimoto, H. & Kojima, H. *Nature* **444**, 909-912 (2006).
3. Guénault, A. M. *Basic Superfluids* (Taylor & Francis, London, 2003).
4. Anderson, M. H., Ensher, J. R., Matthews, M. R., Wieman, C. E. & Cornell, E. A. *Science* **269**, 198-201 (1995).
5. Zwierlein, M. W., Schunck, C. H., Schirotzek, A. & Ketterle, W. *Nature* **442**, 54-58 (2006).
6. Fisher, S. N. & Suramlishvili, N. J. *Low Temp. Phys.* **141**, 111-141 (2005).