



低温物理を開拓した人々

大阪大学極限量子科学研究センター招聘教授 佐々木 祥介

「雪は天から送られた手紙である」という中谷宇吉郎先生の言葉をはじめとして、低温の世界の虜になった人々がいます。彼らは、何に魅せられたのでしょうか。原子・分子は、熱運動で乱雑に動きまわっています。冷えるとその動きがゆっくりしてきます。それなら、もっと低温にすると、原子・分子の動きがなくなり、止まってしまうだけなのでしょうか。そうではないことが、百年ほどかけて、分かってきました。そのひとつ、超流動ヘリウムの発見と神秘ともいえる性質について、話をします。

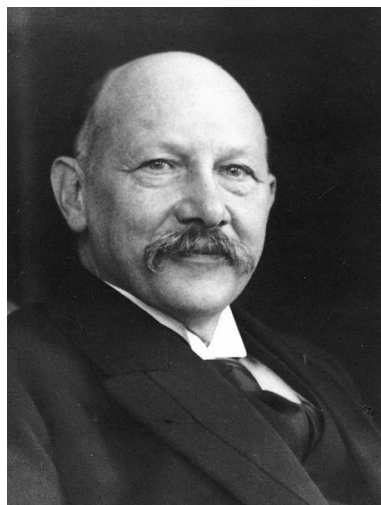


写真1:カメルリング・オンネス

1877年にフランスのカユテと、独立にスイスのピクテによって、液滴状の液体酸素が作られました。フラスコ一杯の液体酸素を作ったのは、ポーランドのロブレフスキーとオルゼフスキーで、1883年のことでした。その後、水素液化の実験中に、ロブレフスキーは焼死しています。水素火災や爆発の危険と背中合わせの中で、いくつものグループが、水素の液化に挑戦していきました。その中に、オランダのオンネス(写真1)とイギリスのデュアーがいました。最初に成功したのは、イギリスのデュアーです。1895年に、 -252.9°C で微量の水素を液化することに成功し、1899年には -259.1°C で水素の固化にも成功しました。

ヘリウムガスの液化

残された気体は、不活性気体と呼ばれるヘリウムガスだけです。ヘリウム原子は、化学的に他の原子と結合しない特殊な原子です。原子同士に働く力が最小なことが知られています。オンネスは、1908年7月10日朝5時半から、液体空気を作り、それを蒸発させて、低温を作りました。その低温を利用して、液体水素(-252.9°C)を作り、それをまた利用して、ヘリウムガスを冷やし、液化させることに専念していました。水素液化の競争では、デュアーに敗れ、55歳の老いからくる目の衰えを感じながら、ガラス容器の中を見詰めていました。13時間も働き詰めで、液化を待ち続けた、その時でした。「ほとんど物質とは思えぬような液体が初めて姿を現した時、それはまことに素晴らしい光景でありました。容器に流れ込む

液体は見えませんでした。容器に満ちた後になって初めて、そこに液体があるとわかったのです。その表面は、容器の壁面に向かって、まるでナイフの刃のように鋭く直角を成していました。」とオンネスは語っています。一般の液体、水やアルコールでは、液面が容器の壁と接する部分で、液体のせり上がりが見えます。液体ヘリウムでは、そのせり上がりが見えないほど小さく、オンネスの目には直角に触れているように見えたのです。ヘリウム原子と壁面との引力が小さいからです。

こうして、発見された液体ヘリウムが作りだす世界には、驚くような神秘的な現象が隠されていました。まず、オンネスの見つけたのは、これから話す超伝導現象です。1900年代初頭には、低温では電子の運動も凍りつき、電気が流れないだろうとの憶測がありました。当時、不純物含有量が最も少ない金属は水銀でした。そこで、オンネスは水銀を冷やして固体にし、線を作り、その電気抵抗を測定しました。すると、図1のように、4.2K以下で、電気抵抗がゼロになることが分かりました。Kは絶対温度の単位ケルビンを表します。ゼロKは、 -273.15°C です。鉛でも、超伝導が確認されました。

電気抵抗が完全にゼロかどうかを確かめるために、オンネスは、超伝導線で図2のようなコイルを作りました。AB間を超伝導線で閉じ、超伝導線のループを作りました。このコイルを液体ヘリウムの中に入れて、電気抵抗をゼロにします。その後、AB間をヒーターで暖め、この部分の温度を上げると、図1のグラフのように電気抵抗が発生します。AB間だけが常伝導状態になるのです。次に、CD間に電源をつなぎ電流を流します。コイルの方は、電気抵抗がゼロになっているので、そちらに電流が流れます。こうしておいて、AB間を暖めるのをやめると、AB間の温度が下がり、この部分も電気抵抗がゼロになります。そこで、外部からつないでいる電源を取り除くと、コイルを流れていた電流は、AB間を通して再びコイルに流れ込みます。その結果、電流がぐるぐる循環するようになります。この循環電流で、コイルは非常に強い磁石になります。

オンネスは、オランダで、超伝導コイルを液体ヘリウムにつけて、循環電流の流

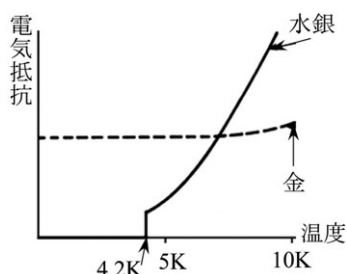


図1:低温での水銀と金の電気抵抗

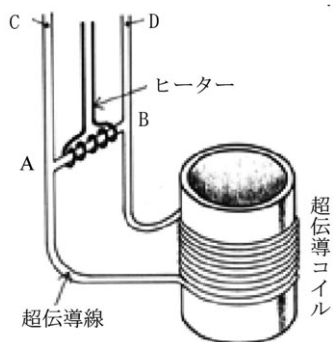


図2:超伝導コイルに永久電流を流す



れた状態にしました。それを鉄道にのせて、ドーバー海峡を船で渡り、イギリスまで運びました。イギリスに着いても、まだ、電流が流れ続けていることを、みんなの前で示しました。これは驚くべきことです。電源なしに、永久に流れ続ける電流を目の当たりにし、多くの人々は、未来を実感しました。これは夢の実現です。電流が減衰することなく、いつまでも回り続けるのです。その後、多くの研究者・技術者による冷却機の改良や、新しい超伝導物質の発見により、超伝導磁石は、極めて強力で比較的安価なものになり、技術の基礎を支えています。電気抵抗ゼロの送電線、超伝導磁気浮上新幹線、超伝導を使った電力貯蔵など、夢の技術が開花しています。

超流動ヘリウムの神秘

液体ヘリウムが作られてから、この世の物質とは思えないような不思議なことが次々見つかりました。通常の液体は、圧力を下げると、泡が出て沸騰します¹⁾。ところが、液体ヘリウムでは、2.17K以下の温度になると、蒸気を引いて減圧しても、表面から蒸発するだけで、泡がでません。泡の出る理由は、表面から深いところの液体の温度が、沸点より高いため、泡を発生し、その中へ蒸発するからです。結局、泡が出るには液体の表面温度より液体内部が高温であることが必要です。そこで、ケーソムは娘と共同で、液体ヘリウムの液面から下の深いところと液面直下との間の温度差を調べました。その結果、2.17K以下では、ほとんど温度差が



写真2: ポール・エーレンフェスト

ないのに熱が伝わるのが分かりました。その熱伝導係数(単位時間に伝わる熱量/温度差)は、2.17K以上の場合と比較して、3百万倍以上になりました。この境目の温度のことを転移温度と呼びます。2.17K以下での超熱伝導現象を見つけたのです。沸騰による対流の増加がなくても、液体ヘリウム中を大量の熱が伝わり、液体表面からのみ蒸発します。熱伝導係数が3百万倍以上なので、同じ熱量の伝達では、温度差は3百万分の1以下になり、泡が発生できないのです(動画1をご覧ください)。

また、液体ヘリウムの熱容量は、2.17K近くで極めて大きくなることも分かりました。エーレンフェスト(写真2)は、この比熱の異常をラムダ転移と名付けました。ラムダ転

1) 80℃のお湯でも、真空ポンプで、約0.5気圧にすると、泡が出て沸騰します。

移は、通常の相転移²⁾と異なり、潜熱³⁾も2相共存状態⁴⁾もない新しいタイプの相転移であることを明らかにしました。これを第二種の相転移と名付けました。しかし、彼は論文に「第二種の相転移が普通の相転移とどんなに特徴的に異なっているのかを、もっとよく形式化し、理解することができなかったことに、遺憾の意を表する」と書きました。彼の落胆は大きなものでした。ローレンツ⁵⁾の後継者としての重圧に耐えきれず、カピッツァ(写真3)⁶⁾やラザフォード⁷⁾の励ましにもかかわらず、1933年9月25日に、自殺してしまいます。彼の死後、液体ヘリウムの神秘的なふるまいが次々と発見されていきました。

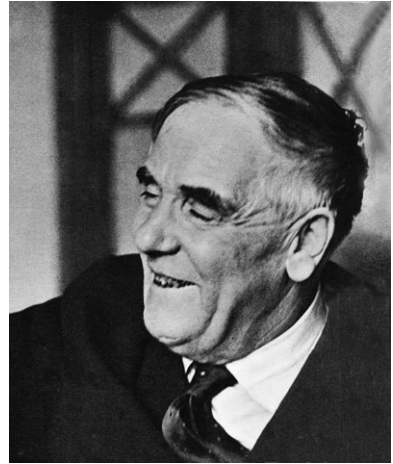


写真3:ピョートル・カピッツァ

このラムダ転移の温度は、圧力が変わると変化します。地上では、液体ヘリウムを容器に入れると、重力の影響により、深さの違う部分で圧力が変動してしまいます。その結果、ラムダ転移温度も深さの違う部分で異なり、一つの温度になりません。それを避けるため、今日では、宇宙船内で実験しています。重力の影響が消え、ラムダ転移の温度が、液体ヘリウムのどの部分でも同じになります。そこで、アメリカのリーパ、ニッセン、ストリッカー……等は、温度を約10億分の一度ずつ変えて、比熱(単位質量あたりの熱容量)を測り、比熱の温度依存性のカーブを描きました。そのカーブを分析すると、ラムダ転移温度2.17Kのところで無限に大きくなる関数形をしていることが分かりました。

話を20世紀初頭に戻します。イギリスのケンブリッジ大学のラザフォードのもとに、ロシアから留学していたカピッツァが、ヘリウムガスの液化を一挙に簡略化できる方法を発明しました。それは、蒸気エンジンの原理を利用することです。蒸気機関車を思い浮かべてみてください。ポイラーでお湯を沸騰させ、高温高压の蒸

- 2) 特定な温度・圧力の境目の前後で、性質の異なる状態が出現することです。水の沸騰状態などがそれにあたります。
- 3) 水では1気圧100℃で熱が加えられると、温度と圧力が一定のまま、液体が蒸気に変化します。この変化に要する熱を潜熱と呼びます。
- 4) 水の沸騰では、液体の水と気体の水蒸気が1気圧100℃で共存し、その比率は、加える熱の量で変化します。二つの相・水と水蒸気が共存しています。
- 5) 相対性原理でのローレンツ変換など著名な研究をし、ノーベルを受賞しました。
- 6) 超流動の発見で、ノーベル賞を受賞しました。
- 7) 原子核の発見など、著名な業績を上げ、原子物理学の父と言われています。ノーベル賞受賞者です。



気を作り、その蒸気でピストンを動かし、機関車を動かしています。この動力を生む仕事エネルギーは、蒸気エンジンが作りだしています。高温高圧の蒸気は、外部へ仕事エネルギーを生み出し、自身はエネルギーを失い温度が下がり、復水器でお湯に戻ります。それを再びボイラーで熱して、循環させます。カピッツァのアイディアは、この原理をヘリウムガスに当てはめることです。高圧にしたヘリウムガスを液体空気で冷やし、その高圧ヘリウムでピストンを動かし、仕事を取り出しながら膨張させます。するとエネルギー保存則から、ヘリウムガスは、より低温になります。この循環するヘリウムエンジンを作り、ヘリウムガスを液化する装置を考えました。カピッツァは、このヘリウムを液化させる装置を作りつつありました。ところが、急きょ、ソ連に呼び返され、研究所を創設することになりました。当時のイギリスとソ連の関係では、装置をソ連へ送ることが政治問題化する恐れがありました。ラザフォードは、自分も危ない立場になることを省みず、この液化装置をソ連へ送りました。カピッツァは、それを完成させ、次々と液体ヘリウムの神秘な世界を明らかにしていきました。二枚の平行平板を非常に狭い間隙で配置し、そのすきまに液体ヘリウムを流し、流量を測定しました。この装置のガラス細工部分をペトシュコフが作り、そのほかの機械部分や電気測定部分をフィリモノフが作り、粘性係数を測りました。粘性とは、私たちの身近では血液で測られています。粘性係数が小さいと、血液サラサラで良く流れ、粘性係数が大きいと、どろどろで流れにくいのです。液体ヘリウムの粘性係数は、 2.17K 以下で、なんと、水の一千万分の1以下でした。もっと間隙を小さくすれば、どこまでも粘性が小さくなるように見えました。まさに粘性のない超流動の性質が発見されたのです。すなわち圧力差がほとんどなくても、流れることができ、管などの壁面から力を受けないのです。

数々の超流動現象

カピッツァは所長として、優秀な研究者を集め、その中にランダウ⁸⁾ (写真4)がいました。ランダウは、このような現象を説明するために、次のような考えを提案しました。液体ヘリウムの中に、 2.17K 以下で超流動成分と常流動成分と呼ばれる2つの成分が出現すると考えまし

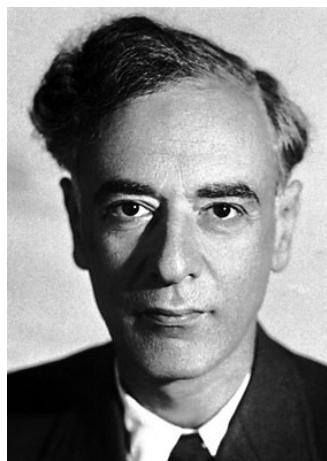


写真4:レフ・ランダウ

8) ノーベル賞受賞者。スパイ容疑で逮捕され、カピッツァによる命がけの直訴で救済された。ランダウ学派を作り、弟子たちと共に輝かしい業績を上げた。お茶目な反面「学ぶことをやめると尻尾が生える」と言って厳格に接した。

た。超流動成分は粘性のない部分で、常流動成分は粘性のある部分です。2.17K以上では常流動成分だけしか存在しません。この考えは、二流体理論と呼ばれ、ティツァも独立に発表していました。ランダウとその弟子達は、この考えをさらに発展させて、以下に紹介する種々の現象を解明していきました。

イギリス・オックスフォード大学のダントとメンデルスゾーンは、図3のように、容器の底に直径1マイクロメートル以下の微細な粉を入れ、それに2.17K以下の液体ヘリウムを入れて実験しました。底から流出する流体の温度と容器内にとどまる液体の温度を測りました。

すると、流れ出る液体ヘリウムの温度が下がり、容器内の液体ヘリウムの温度が上がることが分かりました。微細な粉末の間を粘性のない超流動成分だけが流れ落ちます。常流動成分は粘性がありネバネバなので、この狭い間隙を通れません。これは、素焼きの陶器(細かな穴がたくさんあいている)で、お茶が染み出

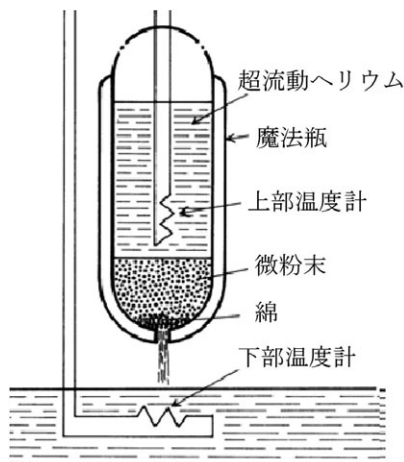


図3:流れ落ちる超流動成分

さないことを皆さんも体験されておられるでしょう。もし、超流動のお茶があれば、素焼きの陶器の茶碗から漏れ出します。結局、下部の温度計の周りには、超流動成分が増え、上部の温度計の周りでは、常流動成分の比率が増えます。超流動成分は、熱運動の乱雑さがなく、エントロピー⁹⁾がゼロです。常流動成分は、乱雑な熱運動を荷っています。そこで、超流動成分の比率が増えた下部は、単位質量あたりの熱運動による乱雑さが減るので、温度が低下します。上部の瓶の中は常流動成分の比率が増え、温度が上が

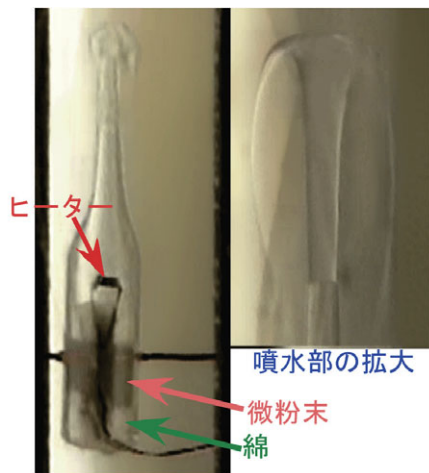


図4:噴水効果

9) エントロピーは、熱運動による乱雑さをあらわす量です。物体に絶対温度TでQの熱を加えると、その物体のエントロピーは、 (Q/T) だけ増えます。

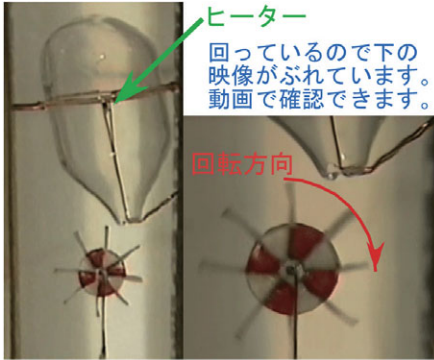


図5:小瓶から出てくる常流動成分

から超流動成分が侵入してきます。常流動成分は、微粉末の層を通過できません。ヒーターの熱でその超流動成分は励起され、乱雑な熱運動を持つ常流動成分に変化します。結局、瓶内部の液体ヘリウムの量が増えます。こうして増加した分が先端の口から吹き出します。これが噴水効果です。アレンとジョーンズはヒーターの代わりに、瓶の中の微粉末(エメリー粉)に光をあてて吸収させ、発熱させました。

もう一つの不思議な現象を説明します。細い口が一つだけある小瓶を液体ヘリウムの中に漬けます。図5のように小瓶の口からヒーターを巻いた発熱体を入れ、その導線を小瓶の口から出します。外部から、その線に電流を入れたり切ったりできるようにします。ヒーターで発熱すると、小瓶の口から超流動成分が流れ込み、ヒーターの熱で励起され、常流動成分に変わります。その増えた常流動成分が同じ口から流出します。入り込む超流動成分の流れは、粘性がないので、車に力を与えません。出ていく常流動成分だけが車に力を与えます。そのため入り込む流体方向でなく、出ていく方向に車が回り続けます(動画2やサイト1をご覧ください)。カピッツァの研究室では、このような不思議な現象が、次々と見つかりました。

この超流動成分は、ポーズ・アインシュタイン凝縮です。現在は、中性金属原子ガスなど多くの系で、観測されています。この元となるポーズ・アインシュタイン統計は、光の強度分布を研究する過程で、インドのポーズにより理論的

ります。

視覚的にもっと目立つ現象があります。それは、アレンとジョーンズによって、発見されました。噴水効果と言います。図4の写真のように、上に細い口があり底の抜けた瓶を使います。内部にヒーターを入れ、底に、サイズが1マイクロメートル以下の微小な粉末を詰めて、綿で底に蓋をします。瓶の上の口を液体ヘリウム液面から少し出します。ヒーターの電源を入れると、瓶の中へ下



写真5:サティエンドラ・ナート・ポーズ

に予測されました。しかし、論文の審査で掲載拒否され、ポーズは途方にくれていました。最後の望みを託して、アインシュタインに自分の論文をドイツ語に訳して、ドイツのしかるべき雑誌に掲載してほしいという手紙を書きました。アインシュタインは、一目で、この論文の重要性を見抜き、ドイツの雑誌「ツァイトシュリフト」にドイツ語訳を出し、ポーズの論文が公表されました。この仕事は永遠の命を吹き込まれ、今日の自然科学の基礎をなしています。

光では、このポーズ統計の性質がレーザー光を生み出しています。レーザー光は、ポーズの発見から何十年もたって、実現しました。このように、自然の仕組みや法則は、遠い未来を通して成り立つものです。ある国でわかったことが、別の国で再検討され、さらに深くわかったり、飛躍した発見がなされたりしてきました。不幸な境遇を跳ね返し、真実をつかみ取った人々もいます。それらのたゆまぬ努力で見いだされた自然の持つ奥深さは、私たちに深い感銘を与えてくれます。私たちは、最先端技術にのみ目を奪われがちですが、それが実用化される、はるか昔に、無償の努力が重ねられ、その成果が人類の進歩を支えています。

夢を実現する力は、皆さんの心の中にあります。机の上のことと言われる理論も、実行力と発想力が試される実験の世界も、車の両輪のごとく、お互いに響きあい、新たな進歩を生み出します。大阪市立科学館の展示や実演の場で遊び、心を遠くに馳せ、夢を膨らませてください。さあ、どんな科学の世界からバトンを受け取り、少しでも発展させ、誰かにバトンを渡すことができるのでしょうか。ほんの些細な進歩も貴重です。それなしには、大きな進歩も生まれません。科学の維持も重要な仕事です。また、科学を深く味わうことも、深く学ぶことも、大切です。それらすべてによって科学の世界は支えられています。それぞれの人に、それぞれの科学が輝くでしょう。

私が実験した動画を次に掲載していますので、ご覧ください。

動画1: <http://www.youtube.com/watch?v=Y0IOE4oldJI>

動画2: <http://www.youtube.com/watch?v=Mv0EViZ69O8>

サイト1: <https://sites.google.com/site/physicscomsasaki1/>

著者紹介 佐々木 祥介(ささき しょうすけ)



大阪大学物理学科卒、同大学院、教養部助手を経て、静岡理工科大学教授を定年退職後、大阪大学極限センター招聘教授。改組により、現在、同大学院理学研究科付属先端強磁場科学研究センター招聘教授。

超流動ヘリウム、分数量子ホール効果、1次元ポーズ系の厳密解などの研究を行いました。趣味:鉢植えの花を楽しんでいます。望遠鏡製作、天体観測、山登り、ジョギングなど。