

# 畑田家住宅活用保存会出版シリーズ No.14

## 宇宙で一番低い温度をつくる

元大阪市立大学学長 児玉隆夫

畑田家住宅活用保存会

# 宇宙で一番低い温度をつくる

元大阪市立大学学長 児玉隆夫

私たちが温度という言葉聞いてまず思い浮かべるのは暑い、寒い、あるいは熱い、冷たいといった感覚的なものではないでしょうか。日本には四季があるので気候の移り変わりとともに、気温の変化をいつも身近に感じています。

しかし、ここでは感覚的なものから離れて、そもそも温度とはどういうものなのかについて考え、そこから温度には下限があること、そしてその下限にどれくらい近づくことができているかについてお話します。

## 1. 温度とは何か

### ① 自然の中の温度現象

私たちが肌で感じる自然の中の温度（気温）は、当然のことながら場所と季節によって大きく変わります。日本でのこれまでの記録では、最低が北海道旭川での零下41℃、最高は埼玉県熊谷および岐阜県多治見での40.9℃で、面白いことに零度を挟んでほぼ同じくらいの値になっています。

では地球レベルではどうでしょうか。これまでの記録では、最低温度の記録は南極 Vostok で1983年に観測された零下89.2℃ですが、最高温度の方ははっきりしません。JICA（国際協力機構）の記録文書の中にアフリカのジブチで71.5℃というのがあるそうですが、Wikipedia をみると1921年にイラクのバスラで53.8℃となっています。他方、世界気象機関では、1913年7月10日にアメリカ合衆国のデスヴァレー国立公園で記録された56.7℃を世界記録としているようです。

気温以外の自然の中の温度現象としては、ハワイ島のキラウエア火山のように溶岩が常に流れ出ているところなど、活動中の活火山が世界の多くの地点にあります。

### ② 温度には上限はないが下限は存在する — 絶対零度の存在

温度には上限はありません。いくらでも高い温度を考えることができます。自然界、宇宙の中には地球では見られない高い温度が存在します。例えば、太陽の中心部の温度は約1500万度といわれており、内部では核融合が起こっています（表面の温度は6000度）。高い温度をつくることでは、人間の力は自然には及びません。人工的に核融合を起こさせる試みが続けられていますが、自然界で起こっている核融合を再現することはできていません。

他方で、温度には下限があるらしいということがいくつかの実験を通じて推測されました。どうしてそのようなことが分かったのかを考えてみましょう。

温度の変化に対して最も敏感に変化するの気体です。固体や液体に比べて大雑把に言えば百倍くらい大きく体積が変化します。熱気球にその応用例を見ることができます。炎で気球内部の空気を暖めると、膨張した空気が外に出てゆき、空気が薄くなった分だけ浮力が増すことを利用しているのです。

図1のグラフは一定圧力のもとでの気体の体積と温度との関係を示したものです。この関係の測り方として考えられる例を図の左側に示しました。おもりと細い管との間は気密が保たれており、おもりは滑らかに上下に動くことができると考えます。おもりの入っている管を細くすることで体積の変化を検知する感度を上げることができます。

図1のグラフは  $0^{\circ}\text{C}$  と  $100^{\circ}\text{C}$  の間で観測した、気体の体積  $V$  と温度  $t$  との関係を示しています。観測結果をもとに、変化の様子を低い温度の方に外挿してみますと、零下  $270^{\circ}\text{C}$  のあたりで体積  $V$  はゼロとなるように見えます。実際にはどのような気体であっても、温度が下がると液体になり、さらに下げれば固体になります。それゆえ、気体のままで、体積がゼロになるようなことはありませんが、図の気体の体積  $V$  の変化の様子は、何となく温度には下限があることを示唆しているように見えます。

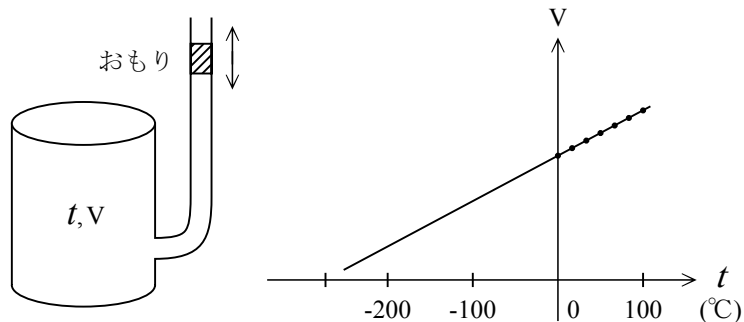


図1 一定圧力のもとでの気体の体積  $V$  と 温度  $t$  との関係

次に、図2は同様な実験ですが、今度は一定体積のもとでの気体の圧力  $P$  と温度  $t$  との関係を示したものです。この図でも先ほどの場合と同じように、圧力  $P$  はやはり零下  $270^{\circ}\text{C}$  のあたりでゼロになるように見えます。

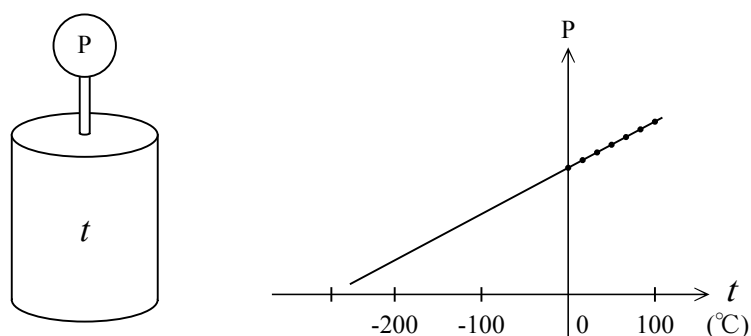


図2 一定体積のもとでの気体の圧力  $P$  と 温度  $t$  との関係

体積  $V$  や圧力  $P$  の値がマイナスになることは考えられませんので、図1および図2の観測結果は温度には下限があることを示唆しているように思われます。

このほかのさまざまな実験から温度にははっきりとした下限のあることが分かり、その値は零下  $273.16$  度と定められました。温度には底があってこれ以下の温度は存在しないのです。その意味するところについてはこのあとすぐに考えることにします。温度には底があるので、あらためてこの底から測った温度を**絶対温度**と呼んで  $K$  で表します。したがって、 $0^{\circ}\text{C} = 273.16\text{K}$  ということになります。

### ③ 温度とは何か — ミクロの観点から考える

私たちが目にするすべての物質は原子や分子からできていることはご存知の通りです。原子や分子の動きを直接目で見ることにはできませんが、気体では原子や分子は空中を飛び回っていますし、液体の場合でも激しく動き回っています。また、固体の場合にはそれぞれの居場所は変わりませんが、そこを中心に激しく振動しています。

このようにミクロの目で見たととき、温度とは原子や分子が動き回る「運動の激しさの度合い」と定義されます。

水を例にとって考えてみましょう。水は、1気圧のもとでは沸点が  $100^{\circ}\text{C}$  なので、 $100^{\circ}\text{C}$  以上では気体になっています。水の分子は空中を飛び回っているのです。そして、その平均の速さは温度が高くなるほど増します。逆に温度が下がってくると、空中を自由に飛び回ることができなくなり、 $100^{\circ}\text{C}$  のところで互いに寄り集まって液体がはじまります。分子が集まって液体になるのは互いに引き合う力が働いているためです。温度が十分に高い気体の状態ではこの引き合う力を振り切って水の分子が飛び回っていたわけです。

液体状態でも水の分子は動き回っていますが、温度が下がるにつれてその平均の動きは緩やかになり、やがて0℃のところでは動き回ることができなくなって、分子たちは規則正しく並んで、水の結晶すなわち氷になります。氷の状態では分子は動き回ることができませんが、それでもそれぞれの分子の居場所を中心にして振動をしています。そして、その振動の激しさの平均値は温度がさらに下がるにつれて緩やかになります。

このように考えると温度がさらに下がって、すべての分子が動きを止めてしまった状態、すべてが静止状態になったときが絶対零度（0K=-273.16℃）ということになります。そして、それ以下の温度というものは考えられないということがわかっていただけたらと思います。これが温度の最低の値です。実際には、「2. 低い温度の作り方」をよく読めば理解していただけたらと思うのですが、分子は完全には静止することはできないのです。それで、すべての分子が最低の運動状態になったときを絶対零度とします。話が一気に絶対零度にまで進んでしまいましたが、図3と図4にそれぞれ気体および固体の場合について、どのようなイメージで考えられるかを示しました。図3（気体）の矢印（→）の向きと長さは分子の飛び方向と速さを表していて、運動の向きはランダムで、速さにバラツキがあることを示しています。図4（固体）の両矢印（↔）は分子が定位置を中心に振動していることを表していて、向きはやはりランダムです。先ず固体から話を始めれば、温度が高くなるにつれて振動の激しさ、すなわち図4の両矢印の長さが増してゆき、ついには定位置に留まることができなくなって各分子が動き出す結果、液体となります。さらに温度が高くなると、分子間の引き合う力も振り切って飛び出してしまい、気体となります。

私たちは直接に感じることはできませんが、空気の主成分である酸素や窒素は室温では秒速500メートルもの速さで飛び回っている計算になります。

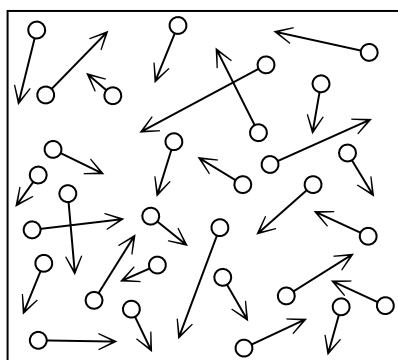


図3 気体の分子の様子

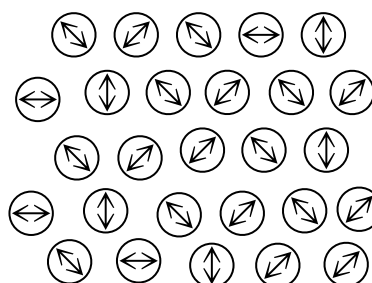


図4 固体の分子の様子

#### ④ 宇宙の温度

今回のお話のタイトルを「宇宙で一番低い温度をつくる」としましたので、宇宙の温度について述べなければなりません。

宇宙空間は真空に近く、原子や分子はほとんどありません。温度の定義として、これまでは原子や分子が動き回る「運動の激しさの度合い」としました。これはこの通りでよいのですが、原子や分子がないところでは温度をどのように決められるかを考えましょう。

温度の高い低いはエネルギーに関連しています。原子や分子にエネルギーを注入すると運動の激しさが増し、温度は上がります。このことから原子や分子はエネルギーを蓄えることができる入れ物と考えることができます。この考え方に立てば、エネルギーを蓄えることができればそこに温度を定義することができると言えます。

そこで、真空中での温度を考えましょう。図5に示したような中空の容器を考え、中は真空とします。容器の壁の温度を $t$ としたとき、壁からは温度 $t$ に対応したさまざまな波長の電磁波（図では波線矢印 $\rightsquigarrow$ で表しています）が放出されたり、吸収されたりしています。容器内の空間は容器の温度に応じた波長の電磁波で満たされています。つまり、容器内の真空中にも電磁波というエネルギーが詰まっているわけです。

物体の表面から電磁波が出ていることは、どのようなものであっても熱くなれば、そこから熱線（電磁波）が出ているのを私たちは感じるからお分かりいただけると思います。別の例では、晴れた夜は放射冷却で気温が下がることも経験していますし、地球温暖化の原因は温室効果ガス（炭酸ガス、メタンガスなど、地表から放射された赤外線の一部を吸収することにより、温室効果をもたらす気体）のためにこの放射冷却が十分にできないことによるといわれています。

図6に温度 $t$ と平衡状態にある容器内の電磁波の波長分布を示しました。二つの温度 $t$ 、すなわち $T_1$ と $T_2$ （ただし $T_1 > T_2$ ）における電磁波の強度分布と波長の関係を表しています。高い温度 $T_1$ のほうが全体に電磁波の強度が大きくなっています。この波長分布は温度によって決まっているので、

逆に電磁波の分布を測ることで電磁波を放出しているものの温度を知ることができます。太陽の表面温度が $6000^{\circ}\text{C}$ といわれるのも、太陽光の電磁波の波長分布から決められたものです。

それで、宇宙の温度は宇宙のかなたからやってくる電磁波の波長分布の測定から、その絶対温度は $2.725\text{K}$ ということになりました。波長分布の測定には世界中のいろいろな場所に設置されている光学望遠鏡、電波望遠鏡など様々なタイプの望遠鏡が使われています。

宇宙からやってくる電磁波の分布がこのように低い温度に対応したものになっているのは、宇宙の成り立ちに深く関連しています。ここでは宇宙論には立ち入りませんが、ビッグバンモデルを支持する膨張宇宙の背景放射と考えられています。以上のことから、自然界に存在する最も低い温度は $2.7\text{K}$ 程度であるということが分かりました。

## 2. 低い温度のつくり方

### ① 気体の液化

低い温度をつくるもっとも一般的な方法は気体を圧縮し、その際に発生する熱を取り去ったのち、急激に膨張させることで温度が下がることを利用するものです。これはジュール・トムソン膨張（J-T膨張）と呼ばれている現象です。この現象の内容を、図7を用いて詳しく説明します。

気体はその種類によって圧縮のみで液体になる温度が異なります。空気の成分である窒素や酸素は室温で圧縮しただけでは液体にはなりません、J-T膨張によって低温にすることができます。

図7の装置を例えば窒素の気体で満たしたとします。圧縮機で高圧になった窒素は圧縮によって温

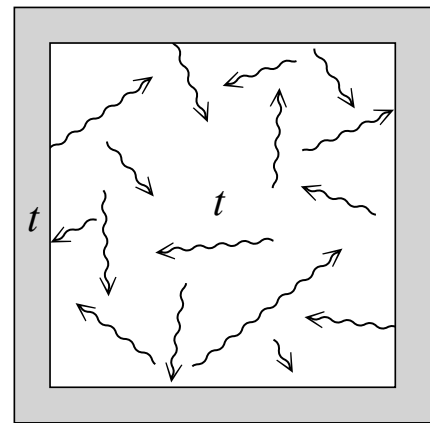


図5 温度 $t$ の壁と真空中の電磁波

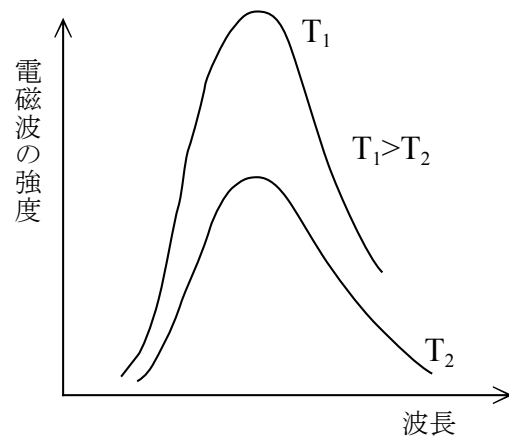


図6 温度 $t$ と電磁波の波長分布

度が上がります。次に放熱部でもとの温度にまで下げられます。その後、熱交換器を通して膨張ノズルから液化室に吹き出されます。その際の急激な膨張による圧力低下によってガスの温度が下がります。これが J-T 膨張と呼ばれている現象です。温度の下がった気体は再び圧縮機に戻されますが、このとき、温度の下がった気体を熱交換器の左側に通すことによって、圧縮機を通して熱交換器の右側を通る高圧気体を冷やします。これにより、液化室に向かう気体は J-T 膨張に向かう前にさらに冷やされることになるので、最初の時よりも低い温度で J-T 膨張が行われ、より低い温度が得られます。この過程を繰り返すことによって気体の温度は下がり、その一部は液体として液化室にたまりま

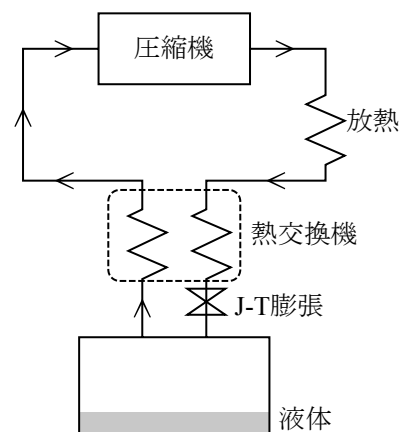


図7 J-T 膨張による気体の液化

このようにして窒素ガスを液化することで、 $-196^{\circ}\text{C}$ という室温から見れば非常に低い温度をつくることができます。液体酸素の場合は1気圧のもとで $-183^{\circ}\text{C}$ です。

多くの気体はこのようにして液化させることができ、その結果、気体のときよりも低い温度が得られますが、水素やヘリウムは、室温で膨張させても温度は下がらず、どんなに温度を下げても液体にならない気体ということで永久気体と呼ばれていました。しかし、水素の場合には、まず液体窒素をつくり、これを用いて冷却したのち、低温で J-T 膨張させることで液化させることができます。1気圧のもとでの液体水素の温度は $-253^{\circ}\text{C} = 20\text{K}$ です。ヘリウムの場合にはもっと低い温度が必要で、液体窒素で冷却したのち、さらに液体水素で冷却してから、J-T 膨張させることで液体にすることができます。

ヘリウムには2種類の同位元素があり、普通ヘリウムといえは質量数4のもの( $^4\text{He}$ )ですが、質量数が3のもの( $^3\text{He}$ )もあります。1気圧のもとでの液体 $^4\text{He}$ の温度は4.2K、液体 $^3\text{He}$ の温度は3.2Kです。かなり絶対零度に近づいてきました。

気体を液化する方法はほかにもありますが、ここでは最も一般の方に分かりやすいと思われる方法を例にとってお話ししました。

## ② 蒸発による温度降下と希釈冷凍法による低温生成

日本には昔から夏の暑い日には水を撒いて涼を得るという文化がありますが、液体が蒸発するとき周囲から熱を奪うので、温度が下がります。このことはすべての液体について当てはまります。今は低い温度のつくり方を考えていますので、液体としてはヘリウムのみを考えます。

蒸発を利用した低い温度のつくり方は簡単で、その様子を図8に示しました。液体が気化する際に周囲から熱を奪う(蒸発の潜熱といいます)ので、1気圧のときよりも低い温度をつくることができ、液体 $^4\text{He}$ の場合で約1K、液体 $^3\text{He}$ の場合で約0.3Kの温度をつくることができます。この方法で既に自然界に存在する宇宙の最低温度よりも低くなっていることに注意してください。

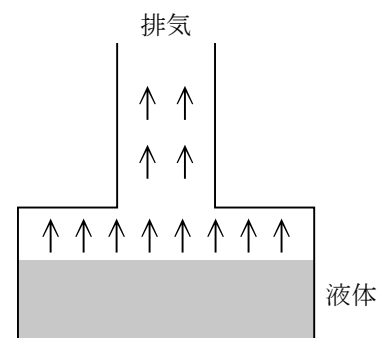


図8 液体の気化による低温生成

ヘリウムの液化に初めて成功したオランダの物理学者カメリン・オンネス先生(1853-1926)は、ヘリウムの気化を利用する、つまりその蒸気をポンプで排気することで4.2Kよりも低い温度をつくり、金属(水銀)の電気抵抗が突然ゼロになる超伝導という現象を発見しました。

気化の潜熱を利用する方法で低い温度をつくる時、その得られる低温の限界は何によって決まるのでしょうか。次にこの点について考えてみます。液体 ${}^4\text{He}$ の場合、先ほどから1気圧のもとでは4.2Kと言ってきました。その蒸気を排気すると気化が進んで温度が下がりますが、それとともに蒸気の圧力も下がっていきます。液体の温度が下がるにつれて、それと釣り合う蒸気の圧力も低くなります。水の場合では、冬の寒い日には空気が乾燥する、大阪の夏は蒸し暑いというのも同じ理屈です。ヘリウムに話を戻しますと、ヘリウム液体の温度が下がるにつれて、その蒸気の圧力は急速に低くなる、ゼロに近づく、すなわち真空に近づきます。蒸発が起こってはじめて気化熱を奪い、温度を下げることができるわけですが、その蒸気の圧力がゼロに近づくために、蒸発がほとんど起こらなくなってしまいます。それがこの方法によってつくることができる低温の限界を決めることとなります。ヘリウムの蒸気を排気することで得られる温度の限界は、先ほど示した通りです。

ところが、普通の意味の蒸発ではないのですが、 ${}^3\text{He}$ と ${}^4\text{He}$ を使って、さらに低い温度をつくることのできる非常に巧妙な方法が考案されました。それが図9に示した希釈冷凍法です。その概略を説明します。

液体 ${}^3\text{He}$ と液体 ${}^4\text{He}$ はある温度まではどのような割合でも混ざり合いますが、それより低い温度では一様な混合液にはならず分離します。すなわち、液体 ${}^3\text{He}$ と液体 ${}^4\text{He}$ に分かれるわけです。このとき、液体 ${}^3\text{He}$ の方が液体 ${}^4\text{He}$ よりも軽いので、図9の下部に示したように液体 ${}^3\text{He}$ は液体 ${}^4\text{He}$ の上に浮いた形になります。ただし、分離した段階ではそれぞれの液体は純粋な ${}^3\text{He}$ と ${}^4\text{He}$ ではありません。互いに少しずつ混ざり合っているのです。

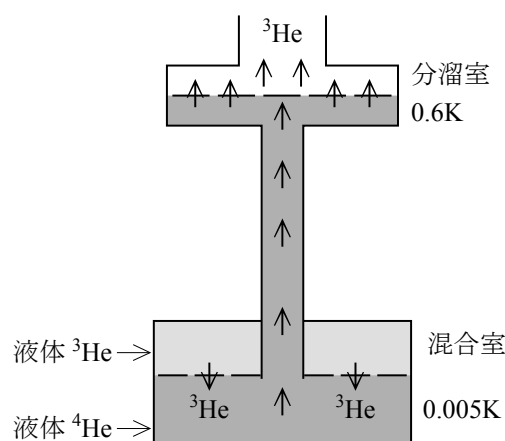


図9  ${}^3\text{He}$  -  ${}^4\text{He}$  希釈冷凍

もう一つさらに重要なことは、上の方に浮いている液体 ${}^3\text{He}$ はより温度が下がると純粋な液体 ${}^3\text{He}$ に近づくのに対して、下の方の液体 ${}^4\text{He}$ の中にはいくら温度が下がっても約6%の ${}^3\text{He}$ が溶け込むことができるという性質があることです。液体 ${}^4\text{He}$ の沸点は4.2K、液体 ${}^3\text{He}$ の沸点は3.2Kなので、 ${}^3\text{He}$ の方が蒸発しやすいこととなります。そこで、図9に示したように0.6Kくらいに保たれた分溜室でポンプで圧力を下げて ${}^3\text{He}$ を排気すると、分溜室に引き上げられた液体 ${}^4\text{He}$ の中の ${}^3\text{He}$ 濃度が下がり、その結果、混合室の液体 ${}^4\text{He}$ の中の ${}^3\text{He}$ の濃度も低くなります。そうすると、 ${}^3\text{He}$ が液体 ${}^4\text{He}$ の中に約6%になるまで溶け込んで、混合室での濃度バランスの崩れが解消されます。

混合室で ${}^3\text{He}$ が液体 ${}^4\text{He}$ の中に溶け込むのは、液体 ${}^3\text{He}$ から ${}^3\text{He}$ の原子が液体 ${}^4\text{He}$ に移動する一種の「蒸発」と見ることができます。そして、この「蒸発」に伴って周囲から熱を奪うので温度が下がります。さらに重要なことは、通常の蒸発では先に述べたように蒸気圧は急速にゼロに向かうのに対して、ここでの「蒸発」はいくら温度が下がっても約6%まで ${}^3\text{He}$ は液体 ${}^4\text{He}$ の中に溶け込むことができることです。このためいくら温度が下がっても、「蒸発」を一定の割合で起こさせることができ、その結果、非常に低い温度をつくることができます。この方法による低温生成の限度は0.002Kくらいです。

### ③ 断熱消磁法による低温生成

これまでの話は気体を液化させ、さらにその蒸気を排気することで低温をつくるというものでしたが、ここからは全く別の考え方による低温生成です。

原子や分子、あるいは原子の中心にある原子核には磁石の性質をもつものがあります。このような原子、分子、あるいは原子核でできている物質は、言わば小さな磁石の集合体と考えることができます。それらの小さな磁石間には互いに力が働きますが、その力は十分に弱く、通常の温度では乱雑な熱振動のため、それぞれの磁石の向きは定まらず自由に向きを変えているような物質が断熱消磁法の対象になります。このような物質は常磁性体と呼ばれています。

常磁性体を構成するそれぞれの小さな磁石は通常の温度ではその向きはさまざまに全く方向性はありません(図10の左)が、外部から磁界をかけると、磁石が北を指すように、小さな磁石も向きをそろえ始めます(図10の右)。その揃う度合いは磁界の強さと温度との兼ね合いで決まります。磁界は小磁石の向きを揃えるように働きますが、温度による乱雑な熱運動は向きをさまざまにしようと働くからです。

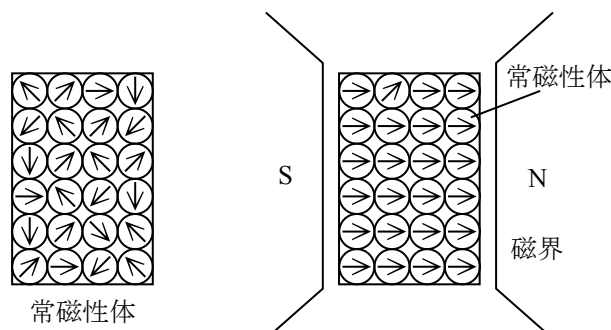


図10 常磁性体と磁界による磁石の配向

図11は常磁性体の小さな磁石の向きの乱雑さの度合い(専門用語ではエントロピーといいます)をいくつかの磁界( $H=0, H_1, H_2, H_3, H_1 < H_2 < H_3$ )のもとで、温度の関数として表したものです。温度が高いところでは、いずれの磁界のもとでも同じ一定の値になるのは乱雑さの度合いが最高に達した、すなわち、あらゆる向きに同じ割合で存在するようになった状態を表しているからです。温度が下がり熱運動が弱まってくると、磁石間で及ぼしあう力の影響が相対的に大きくなって、小さな磁石の集合体は全体として向きをそろえるようになり、それに伴って乱雑さの度合い(エントロピー)は減少してゆき、やがてゼロに向かいます。エントロピーの減少は磁界が強いほど高い温度から始まります。

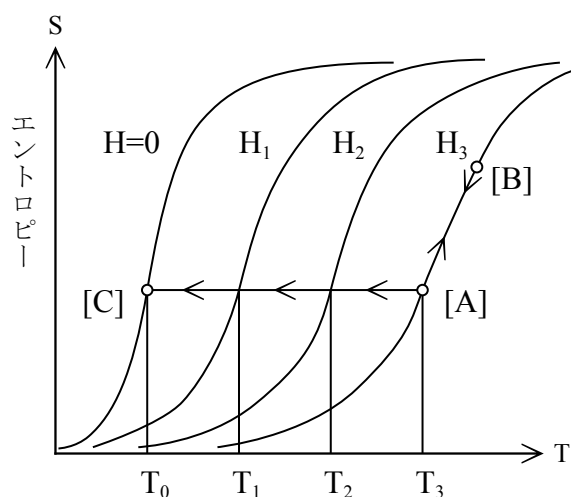


図11 磁界下でのエントロピー曲線

さて、温度  $T_3$  にある常磁性体に磁界  $H_3$  をかけて小さな磁石の向きを揃えようとする、気体を圧縮したときと同じように発熱により温度が一旦上がります(図中の[A]から[B]に移る)。この熱を、たとえば②で述べた $^3\text{He} - ^4\text{He}$ 希釈冷凍で得られる低温媒体と接触させて取り去って、もとの温度  $T_3$  に戻した([B]から[A]に戻る)後、低温媒体との接触を断って断熱状態にします。次に、断熱状態を保ったままで磁界を  $H_3$  から徐々に減らしてゆくと、[A]の状態から[C]の状態に近づきます。この過程の間、常磁性体のエントロピーは一定に保たれますので、磁界の減少につれて温度が下がってゆき、磁界ゼロ( $H=0$ )で温度  $T_0$  に到達します。これが断熱消磁法と呼ばれる低温の作り方です。

常磁性体として分子の磁性を利用した場合に到達できる最低温度は凡そ  $0.001\text{K}$ 、原子核の磁性を利用した場合の最低到達温度はおおよそ  $0.000001\text{K}$  です。

私たちはこの方法を使って $^3\text{He}$ と $^4\text{He}$ の混合液の新しい超流動現象(極低温において液体ヘリウムの流動性が高まり、容器の壁面をつたって外へ溢れ出たりする現象)の探索を行うため、この混合液を  $0.000097\text{K}$  まで冷却しました。しかし、新しい超流動現象は観測されませんでした。いろいろな状



況証拠から、この混合液は十分に冷却できれば新しい超流動現象が見られると考えられています、まだ実現はしていません。私たちの実験から既に 15 年以上経過していますが、この超流動現象の実験に用いた  $0.000097\text{K}$  という温度の記録は未だに破られていません。次の挑戦者は抜本的な方法の改善が必要とされているからでしょう。

#### ④ レーザー冷却による低温生成

最後に、現在最も低い温度をつくることのできるレーザー冷却について説明しましょう。実際に超低温を生成するにはさまざまな技術上の工夫が必要なのですが、私自身もこの冷却法に携わった経験がありませんので、ここではその原理の説明にとどめます。

レーザー冷却は次の 3 つの事を利用して、レーザー光を使って原子の運動を止めることで絶対零度を目指す冷却手法です。

- (1) 原子による光の吸収と放出
- (2) 光の粒子性
- (3) ドップラー効果

まず (1) の原子による光の吸収と放出についてですが、原子は気体の状態にあるとき、その種類（つまり元素）によって決まった波長の光を吸収したり、放出したりします。北極や南極近くで見られるオーロラ（太陽からのプラズマが大気中の酸素原子や窒素原子を励起することによって発光すると考えられている現象）はその例です。実験には原子気体として使われる元素に合った光の波長のみを持ち、しかも強い光線であるレーザー光が使われます。原子は自分に合った波長の光を吸収して一旦励起された状態になりますが、すぐに同じ波長の光を放出して元の状態に戻ります。

次に (2) の光の粒子性についてですが、光は波（電磁波）であると同時に、実はつぶつぶ（粒子）の性質もあって、その波長によって決まったエネルギーと運動量を持っていると考えることができます。運動量という語に初めて接する人がいるかもしれませんが、通常、運動量は質量  $m$  と速度  $v$  の積  $mv$  で定義されます。しかし、光の場合には質量がありませんので厄介ですが、エネルギーだけでなくその進む方向に勢いも持っていると思ってください。

以上 二つの事実を念頭に置いて、どのようなことが可能かを考えてみます。図 12 を見てください。いま、一つの原子が右側からきた波長  $\lambda$ 、運動量  $p$  の光を吸収し（図の左側）、その後、図の右側に示したような方向に光を放出したとします。光の吸収は原子が止まっている状態で起こったとしますと、光の運動量を受け止める結果、

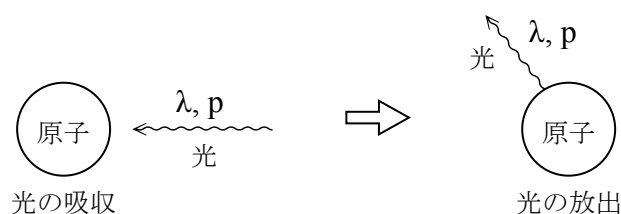


図 12 原子による光の吸収と放出

光を吸収した直後の原子は左の方に動き出します。その後、原子は同じ波長の光を放出しますので、その反動で放出した方向の逆向き、この図では右下の方に動きます。もしも、光の放出方向が図のようではなく、やってきた光と同じ左の方向であれば、原子は光を吸収した時には左の方に動き、光を放出した反動で右の方に動き出すので、結局元の位置から少し左に移動したところ止まった状態になります。また、逆方向、すなわち光が来た向きに放出した場合には、その反動で吸収した時の分と合わせて倍の速さで左の方に動くことになります。このように光の吸収や放出に伴って原子の位置や運動状態が変わります。

さて、もう一度図 12 に戻って原子に右から光を当て続けることを考えます。この状態では原子は光

の吸収と放出を繰り返し行うこととなります。このとき光の吸収は常に右からなので、そのたびに左の方に力を受けて動きます。一方、光の放出はあらゆる方向に同じ割合で起こります。したがって放出による反動の方は全部の力を加え合わせるとゼロとなります。その結果、原子が光の照射によって受ける力は光を吸収した時に受ける動きに吸収の回数を掛けた分の速さで左側に動くこととなります。

実例を数値で示しましょう。この実験によく使われる原子は質量数が 87 のルビジウム（原子番号 37、元素記号 Rb）です。この元素は波長 780nm（ナノメートル）の光を吸収し、1 回の光の吸収によって受ける速度の変化は 6 mm/s です。室温にあるルビジウム原子の熱運動による平均の速さは 170,000 mm/s です。ルビジウム原子がこの速さで右の方に動いており、右から波長 780nm の光を当て続けて原子を静止させるためには約 3 万回（ $170000\text{mm/s} \div 6\text{mm/s}=28,333$ ）の吸収と放出が必要ということとなります。

最後に (3) のドップラー効果と呼ばれる現象について説明します。これは、音や光の発信源とそれを受け取る側が相対的に動いている場合、発信する側と受け取る側で波長や振動数が異なるというものです。救急車がサイレンを鳴らしながら走っているとき、近づいて来るときと通り過ぎて遠ざかっていくときとで音の高さが変わる（低くなる）のを経験した方もおられるのではないのでしょうか。これがドップラー効果によるものです。

これまでは図 12 に示したように静止している原子について考えてきましたが、現実の原子は上記のルビジウム原子の例でも述べましたように熱運動で動いています。したがって、原子による光の吸収を考える際にはドップラー効果を考慮する必要があります。図 13 を見てください。ここ

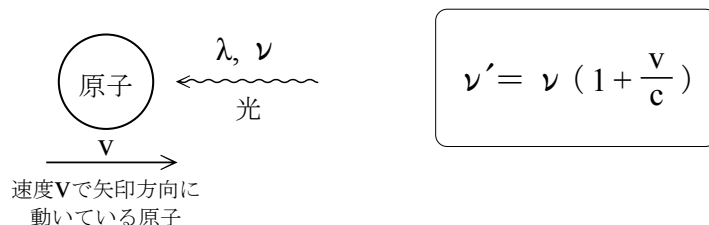


図 13 ドップラー効果による振動数の変化

に示したように、速度  $v$  で右に動いている原子から見た場合、右からやってくる波長  $\lambda$ 、振動数  $\nu$ （ニュー）の光は図の中の式で示したように  $\nu' = \nu(1 + v/c)$ （ $c$  は光速）となって振動数は高くなる、波長で言えば短くなります。また、同じ理由から原子が遠ざかっている場合には同じ波長の光でも振動数は小さく、波長は長くなります。このように原子が近づいている場合と遠ざかっている場合とでは同じ波長の光でも異なった値となります。そこで原子が光に近づく方向に運動している場合で考えると、ドップラー効果で高くなる振動数の変化分を考慮して、その原子が吸収する波長となるように光の振動数を低めに調整しておけば、原子は光の吸収と放出を繰り返して先に述べたように速度を落とします。このとき反対の向きに運動している原子は波長が合わないので影響を受けませんが、この反対向きに運動している原子に対しては反対方向に進む光を振動数を調整して照射すると、やはり光の吸収と放出が繰り返されて速度が落ちます。

このような原子からなる気体を考えた場合、熱運動によって原子はあらゆる方向に自由に運動していますが、この原子気体に前後、左右、上下の 6 方向からレーザー光を当て、その波長を光に近づく向きに運動している原子が吸収するように調整すれば、どの方向に運動する原子に対しても波長が合う光が存在することとなります。ルビジウムの場合、室温で運動している原子を静止させるには約 3 万回もの光の吸収と放出を繰り返さなければならず、しかも速度は連続的に変わるので実際にはもっと込み入った工夫が必要です。しかし、荒っぽく言えば 6 方向からレーザー光を当てることで、全ての気体原子の速度を限りなくゼロに、つまり絶対零度に近づけることができます。この方法で到達できた最低温度は  $0.000000005 \text{ K}$  で、これが今までの最低到達温度記録といえるでしょう。

### 3. 低温特有の現象

これまで低温をつくる方法について述べてきましたが、最後に何のために低温をつくるのか、という点に触れておきましょう。

工業的な目的では例えば空気を液化して酸素と窒素に分離するなど、いろいろな目的があるでしょうが、科学的な興味として最大のものは超伝導や超流動といった普通には見られない現象についての研究です。

ある種の金属や合金、導電性のセラミックなどは低温で電気抵抗がゼロになる超伝導（超電導とも書きます）状態になります。この性質は既に磁気浮上鉄道や病院でのMRI（Magnetic Resonance Imaging 磁気共鳴画像法）などに応用されています。液体ヘリウムの超流動現象は応用には結びついていませんが、自然の仕組みについて考える基礎科学では重要な役割を果たしています。

先にも述べましたように、ミクロの目で見れば原子や分子は激しく振動したり、動き回ったりしています。そしてこれらの運動は温度が下がるにつれて弱くなってゆき、絶対零度に近づくにつれて静止状態へと向かいます。このとき、ほとんどの物質は静止した固体となって科学的な興味の対象とはなりません。金属など電気を通す物質の中の電子、液体ヘリウム、そして先に例として挙げたルビジウムの気体などはいくら低い温度になっても流動性を失いません。自由に動ける状態であることが科学的にはとても重要です。

超伝導や超流動は特異な現象のように思われますが、見方を変えればこれがこういう物質の本当の姿であるともいえます。温度が高くなると熱運動が激しくなるために、本来の姿がかき消されてしまったのだと考えられます。超伝導や超流動に限らず、低温の物理は乱雑な熱運動の影響を少なくして、モノの本当の姿を調べるという意味があります。

話が低温物理の世界に入ると際限がありませんので、今回のお話はこれまでとさせていただきますが、温度という身近な物理現象もその極限を考えることが物質や宇宙をつかさどる根本原理の理解につながっていることを少しでも分かっていたいただければ幸いです。

児玉隆夫氏略歴　　中学卒業後に職業訓練所を経て、大阪大学工学部技術職員として実験装置の製作に従事。定時制高校で学び、大阪市立大学理学部に入学、低温物理学を専攻。同学理学部長を経て、1998年から2004年まで同学長。学校法人帝塚山学院学院長等を歴任。
---





ISBN978-4-903247-13-7  
C1042



発 行 2019年3月31日  
発行者 畑田耕一 (auauo608@wombat.zaq.ne.jp)  
発行所 畑田家住宅活用保存会  
大阪府羽曳野市郡戸471 (〒583-0874)