



Title	熱科学を創った人々 : 熱力学・統計力学・超流動・超伝導の世界
Author(s)	佐々木, 祥介; 堀, 秀信
Citation	
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27778
rights	©1988 Shosuke Sasaki, Hidenobu Hori
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

知識創造物語シリーズ1

熱科学を創った人々

第2部

-熱力学・統計力学・超流動・超伝導の世界- Part II



佐々木 祥介 (Shosuke SASAKI)

堀 秀信 (Hidenobu HORI)

Series of Knowledge Creation in Science

PEOPLE WHO CREATED THERMAL SCIENCE

-The Science World on Thermodynamics, Statistical Physics,
superfluidity & Superconductivity -

第2部

物性物理の創造したもの

Part II. Creatures of Physics in Materials Science

第2部へのプロローグ

二〇世紀の夜明け。オランダの一角に、熱き夢をにえたぎらせた男がいた。カマーリング・オンネス。彼は今まで誰もが到達できなかった極低温の世界を、その手で実現しようと日夜奮闘していた。その時まで、世界中の人々が到達しえた最低温度は、摂氏マイナス二五二度、この低温でさえ液化も固化もできない気体が、当時ただ一つだけ残されていた。それはヘリウムガスである。彼は巧妙な装置を作って、この最後の強敵、ヘリウムガスの液化に挑戦していた。

北緯五二度、北国・オランダの短い夏がまためぐってきた。オンネスにとって、この夏は特別な意味をもっていた。二〇年以上もの努力の末、彼の巨大な液化装置がついに完成したのだ。一九〇八年七月十日、この日は朝五時半から、オンネスと彼の協力者たちはすべての装置を動かし、ヘリウムガスの液化をめざして働いていた。まだヘリウムの液化には、世界の誰一人も成功していない。オンネスの心に一瞬、競争者たちのことが浮かんた。自分たちのこの新しい装置が、ヘリウムの液化を可能にするかどうか、もうすぐ見ることができる。もし失敗したら、競争者たちが追い上げてくるだろう。彼はそんな思いを振り払い、目の前の七重のガラスびんの中をじつと見つめた。もう朝から何度見たこ

とだろう。そのびんの中に液体ヘリウムが出現するはずなのに、彼らの期待は裏切られたままであった。とつくに昼は過ぎ、もう夕方の六時半になっていた。

北国の夏の日はいくつでもまだ夜は訪れてはいなかったが、一三時間も働きづめで、液化の瞬間を今か今かと待ち続けていた。

その時だった。容器の底に、何かが現れたような気がした。彼は、朝から幾度もそう思っては何もなかったことを思い出しながら、近づいてそれを見つめようとした。そこには確かに透明な液体が満ちていた。その瞬間、地球上に存在するすべての気体は液化することがわかったのだ。

彼は述懐する。「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、それはまことにすば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、容器の表面に向かってまるでナイフの刃のように鋭く直角をなしていました」。ついに、ヘリウムが液化されたのだ。

液体ヘリウムの誕生。これが二〇世紀全体を通して、どんなに多くの驚きと夢を人々にもたらすか、オネネスさえも予期しえなかった。この本は、液体ヘリウムが生み出す驚異の世界、超流動・超伝導の物語である。

* 内から順に、ヘリウムの入る透明な二重ガラスの魔法びん、その外に液体水素の入った透明な二重ガラスの魔法びん、その外に液体空気の入った透明な二重ガラスの魔法びん、その外に加熱アルコールの循環しているガラス容器という、七重のガラスびんやかこまれている。

I 超流動の世界

I. The world of superfluidity

第1章 極低温の世界への旅立ち

液体ヘリウム、それはこの世の中でいちばん低い沸騰温度をもつ液体である。一気圧での沸点がマイナス二六九度Cという、途方もなく低い温度の液体なのだ。これを作り出すために、低温の限界に挑戦していった人々の物語から始めよう。

ヘリウムの液化競争

「気体はすべて液化できるか」。この問題をなげかけたのは、あの電磁気学の分野で驚くような多くの発見をしたファラデー^{*}であった。彼は一八二〇年代

^{*}1791 年イギリスの貧しい鍛冶職の子として生まれた。電磁気学の建設に中心的役割を演じ、電磁誘導、ファラデー効果、反磁性、電気分解の法則の発見など、数多くの寄与をなした。

中頃に塩素を液化し、先生のデービーをうらやましがらせたのである。それ以来多くの人々が、エチレン、メタンなど、各種のガスを液化させた。一九世紀後半、液化目標は、最も身近な気体・空気になっていた。しかし、その空気の中の酸素も窒素も簡単には液化できなかった。

みなさんは、「液化するぐらい簡単だ。ポンプで圧縮すればよい」と思われるかもしれない。しかし、気体には臨界温度というものがあって、その温度以上ではいくら気体を圧縮しても、決して液化できないのである。だから、液化したい気体を臨界温度以下に冷やす必要がある。酸素、窒素の臨界温度はそれぞれマイナス一一・八・五度C、マイナス一四六・九度Cなので、空気を液化するにはこの温度以下に冷やす必要がある。

それには次のようなうまい方法がある。まず最初に室温以上の臨界温度をもつ気体、例えばクロロメチルを水道水で冷やしながら圧縮し、液化する。これを一気圧で蒸発させると蒸発熱がうばわれて冷え、クロロメチルの一気圧での沸騰温度まで冷却できる。こうして得られた低温で冷やすと、室温より臨界温度の低い気体の液化が可能になる。例えば、エチレンが液化でき、これを○・○一気圧で蒸発させるとマイナス一四五度Cの低温が得られる。この低温をも

とにして酸素の液化ができ、さらに液体酸素を使って空気の液化ができるのだ。^{*}

酸素の液化に初めて成功したのは一八七七年のことで、フランスのカイエテ、スイスのピクテである。彼らの作った液体酸素は、ガラス壁の内面についた液滴のようなものだった。フラスコいっぱい液体酸素を自由に作れるようにしたのはロブレフスキーとオルゼフスキーで、彼らは前述したような静的方法による酸素液化の技術を確立したのである。^{*}

いよいよ、今まで液化不可能とされていた水素液化の試みが開始された。当時、ヘリウムガスは太陽コロナのスペクトル線として観測されており、その存在を知られてはいたが、まだ地球上では見つかっておらず、水素が最後の気体であった。水素の液化の栄冠を得ようと、世界中の研究者が競い始めた。そのなかに、デュアーとオンネスがいた。

オンネスは二十九歳でオランダのライデン大学の教授になり、のちに極低温実験の中心となるライデン低温研究所を、一八八〇年代初めに創設した。彼は、常温から極低温に至るまで、各段階の温度が自由に使える研究所をめざしていた。水素液化の競争だけが目的ではなく、それより高い温度でも低い温度でも、自由にかつ大量に冷却剤を使えるようにするのが目的であった。彼は大型の空

* 『ノーベル賞講演・物理学 2』 p. 136。

** 1853 年生れ。世界で初めて国際的な共同利用研究所を設立した。それがライデン低温研究所である。大規模な低温装置を組織的に作り、技術者養成の学校をたて、また機関紙までも出していた。1913 年低温物理学の業績でノーベル物理学賞受賞。

気液化器を建設する。この装置は以後三〇年間にわたり、ライデン大学に大量の液体空気を供給し続けたのである。さらに、彼は技術員の養成学校を建て、低温実験装置を作る技術者を組織的に養成し、着々と低温研究所を整備していった。

一方、水素の液化のとりこになったデュアー^{*}は、多くの困難に遭遇していた。最大の困難は水素の臨界温度が異常に低いことから生じていた。空気液化のときと同じ方法で次々に適当な気体を選び、液化・蒸発をくり返して水素の臨界温度以下の低温を得ようとしても、そのような気体が存在しないのだ。結局、今までの方法では水素の液化が達成できないのだ。デュアーはこの困難に困りはてていた。

ところが、低温を得るのに、蒸発による冷却以外に、もう一つの有力な方法があった。それは、気体を圧縮して細い穴から噴出させる方法である。しかしこの場合、注意しないといけないことがある。それは、圧縮した気体がある温度以上だと、細い穴から急膨張させても、かえって温度が上がってしまうのだ。それで、気体圧縮時にその温度以下に冷やしておかないと、細い穴から急膨張させたとき、気体は冷えないのだ。この境目の温度を反転温度という。また、

^{*}1842年イギリス生れの化学者・物理学者。1877年
王立科学研究所教授に就任。

反転温度以下で気体を細い穴から急膨張させ冷やす現象をジュール・トムソン効果という。

幸いなことに、すでに得られている液体窒素の一気圧での沸点が水素の反転温度以下だったので、この方法で水素の温度を冷やしていけるのだ。そして、この低温が水素の臨界温度以下になれば、別の圧縮水素をそれで冷やし、ついに水素の液化を達成できるはずだ。

そこでデュアーは、圧縮した水素ガスを液体窒素で冷やし、細い穴から噴出させた。さらに、彼は、その膨張して冷えた水素ガスを再び圧縮して、循環させる装置を作ることに専念した。この複雑な装置のどこか一か所にも小さな穴があいていると、水素は空中に漏れ出し、もし何かの火花で引火すれば、研究室全体が水素爆発^{*}を起こしてふつとんでしまう。彼は細心の注意を払って密閉系を作った。他の気体と違って粘性が小さな水素を、外部からの熱の流入なしに、効率よく圧縮するためには、圧縮器の改良も必要であった。やっとでき上がった装置を動かすと、水素中にごくわずか存在していた空気が冷やされ、固体となって細い管につまってしまう。デュアーは微量の空気を除くために、いろいろな手を講じてみた。その結果、炭素の粉の中を通して水素を循

^{*}例えば、前述したロブレフスキーは、水素液化の実験中に焼死している。

環させることにより、微量の空気が除けることに気づいた。ついに勝利の日がやってきた。一八九八年、デュアーは世界で初めて水素の液化に成功したのである。しかし皮肉なことに、彼の水素液化達成の三年前、一八九五年に、ラムゼーが、液化不可能な新たな気体、ヘリウムガスを、地球上で初めて発見したので。それで、デュアーが水素の液化に成功した時には、すでに水素は液化不可能な最後の気体ではなかった。水素の液化に引き続いて、ヘリウムガス液化の壮絶な競争が開始された。

オネスの目的は単に液化競争に勝つことではなかった。彼は若い頃から、ライデン研究所を低温研究のメッカにすることを目標にしていた。液化はそのための手段にしかすぎない。だから、彼は水素の液化がぎりぎり可能な装置では満足できず、定常的に液体水素を取り出し、実験に使えるような装置を作ろうとした。それで、オネスが水素を液化できたのは、デュアーが成功してから数年後のことであった。

オネスとデュアーの宿命的なヘリウム液化の競争の火ぶたが切られた。オネスはデュアーの考え出したすべての工夫を動員した。炭素の粉でヘリウムガス中の微量の空気を除くこと、デュアーの作った液化気体を入れる魔法びん

*魔法びんのことで、二重のガラスびんの間を真空にし、ガラス表面を銀メッキして、熱の伝導・輻射を遮断するようにした容器。1881年に、ヴァインホルトが初めて製作した。銀メッキを施す改良は、デュアーの考案によるものである。

(デュアーびん^{*}と呼ばれている)をはじめとして、多くのデュアーの発明はオンネスを助けた。オンネスが育てた多数の低温技術者たちの組織力が、大規模な装置を作るのに力を発揮していった。また、当時のライデン大学には、物理学史上に多夫な貢献をしたH・A・ローレンツ^{*}とJ・ファン・デル・ワールス^{**}がいたことは、忘れることができない。彼らはオンネスを支え、オンネスの目を物理学全体に開かせていった。

さて、多くの困難を乗り越え、ついに運命の日が訪れた。一九〇八年七月十日の朝、五時半、この仕事を何年も続けてきた人々の待ちに待った長い一日が始まった。彼らは、液体空気、液体水素の液化器を動かし、順々に低い温度を作り出し、ヘリウムガスを冷やしていった。新しく作られたヘリウム液化器も作動し始めた。すべてが、どんどん冷えていく。オンネスは、それらの工程の最後に液体ヘリウムが生まれてくるはずのガラスびんの底を、凝視し続けた。長い一日、すでに一三時間が経過していた。彼はふと、今までの長年にわたる困難な道程に思いをはせる。一時は失敗に打ちひしがれた時もあった。何十年も夢見続けてきた人類に残された最後の気体の液化が、いま訪れようとしている。彼はまるでわが子の誕生を見守るようにガラスびんの底を見つめてい

* 1853年オランダのアレンヘム生れ。学位論文で、光の屈折・全反射を電磁気学の基礎方程式から導出した。また、相対論でもローレンツ変換を発見し、1902年ノーベル物理学賞を受賞した。

** 1837年オランダのライデン生れ。気体の状態方程式がボイル・シャルルの法則からずれるのを分析し、ファン・デル・ワールスの状態方程式を導いた。

第1章 極低温の世界への旅立ち

た。そのとき視野に何かが動いたような気がした。老眼の目には、それが何かを見きわめるのに、一瞬のおくれが生じる。そこには、透明で、ほとんどその



K. オンネス

長い年月をかけて、周到な計画を実施し、組織力を使って巨大な装置を作り上げていく。今日の巨大科学の先駆者ともいえる人。しかし、彼自身の研究テーマは小規模で個性的なものであった。しかも、その小規模な実験・電気抵抗の測定が超伝導の発見を導き、彼の名を不滅にした。

液面を見るのさえ困難な液体が、すでに満ちていた。液化の瞬間は、静かに、あっけなく訪れた。今までの苦労が嘘のようにさえ思える。そして喜びは、あとからゆつくりとやってきた。

居合わせた人々の歓声が上がった。液化成功の朗報はまたたく間に所内に伝わり、誰も彼もが世界最初の液体ヘリウムを見に駆けつけてきた。オンネスは喜びをかみしめる。

「この凝縮したヘリウムを、畏友ファン・デル・ワールスに見てもらうことができて、私はまことに幸せでありました。彼の理論こそは、気体液化の道を最後まで照らしてくれた光明であります」*。

オンネスとデュアアの競争は、オンネスの勝利に終わった。あの多くの発明を残したデュアアは、敗北に打ちひしがれて極低温の研究からしりぞいていくのである。しかし、自然の最も驚異に満ちた世界は、まだ残されていたのだ。それは液化現象そのものではなくて、液体ヘリウムを使って、その後、明らかにされた世界なのだ。結局、最も驚くべき現象は未発見で、デュアアの落胆は早すぎたのだ。

一方、オンネスはその当初からの目的どおり、ヘリウム液化で満足せず、こ

* 『ノーベル賞講演・物理学2』（中村誠太郎・小沼通二編，講談社）p. 155。

の極低温を使つて着々と実験していった。彼のこの姿勢は死ぬ直前まで変わることなく続けられた。そして自然の女神は、ねばり強いオネスに、すばらしい世界を開いて見せたのである。ヘリウム液化の三年後に、水銀の電気抵抗が完全になくなる現象を発見するのである。抵抗なしに永久に流れる電流。なんというすばらしい世界だろう。この超伝導の世界が、彼の手に輝いたのである。

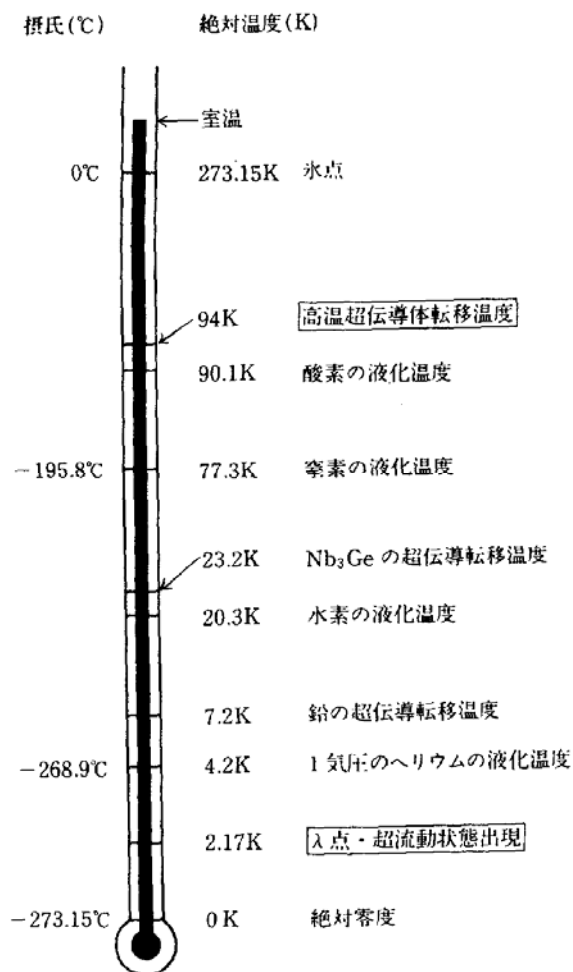
さらに、それから二年後に、彼に与えられたノーベル賞の受賞講演で「液体ヘリウムの密度は温度の下降とともに、初め急に増大しますが、ほぼ二・二 K で極大値に達し、さらに低温になると、再び減少し始めます。この極大値は量子論と関係づけられるかもしれませんが^{*}」と述べており、その後何年もあとに、彼の予想どおりのことが発見されるのである。しかも、当時はその量子力学さえ完成しておらず、その完成にはさらに一〇年以上の歳月を要する。だから、彼のこの予想はまさに天才的ひらめきと言わざるをえない。しかし、彼のこの予測の奥に隠されたもう一つの現象の発見は、彼のものとはならなかった。すなわち、二・一七 K 以下で液体ヘリウムが、まったく粘性のない性質をもつという超流動の発見は、およそ三〇年後に、カピッツアによって見つけられるまで、自然の女神のボールに隠され続けるのである。

* 『ノーベル賞講演・物理学 2』（講談社）p. 157。

極低温の世界へ

いよいよ、読者のみなさんを紙上実験にお誘いする時がきた。まず多様な低温の世界を紹介しよう。温度をどんどん冷やしていくと、それ以下の温度がないという低温限界がある。これは冷やすのが技術的に困難になるという意味ではなくて、すべての原子・分子の熱運動がなくなる状態を表している。この温度が摂氏マイナス二七三・一五度で、絶対零度と呼ばれている。摂氏の数値に、二七三・一五を足した数値がケルビン単位での温度を表し、ケルビンと呼び、 0°K と書くことにする。すると、第一図のように室温から絶対零度まで多様な低温の世界が見えてくる。地上の最低気温が約マイナス六 $^{\circ}\text{C}$ で極寒の世界だ。ドライアイスの温度がマイナス七九度 C 、液体窒素がマイナス一九六度 C 、液体ヘリウムがマイナス二六九度 C 。これからわれわれが旅する世界は、厳しい冷たさのなかで、すべてが凍りつく世界である。その世界がじつは、驚くほど美しい振舞いを見せてくれるのだ。

オンスの頃とは違って、液体窒素は、今日では一リットル五〇円ぐらいで



第 1 図 種々の現象の温度

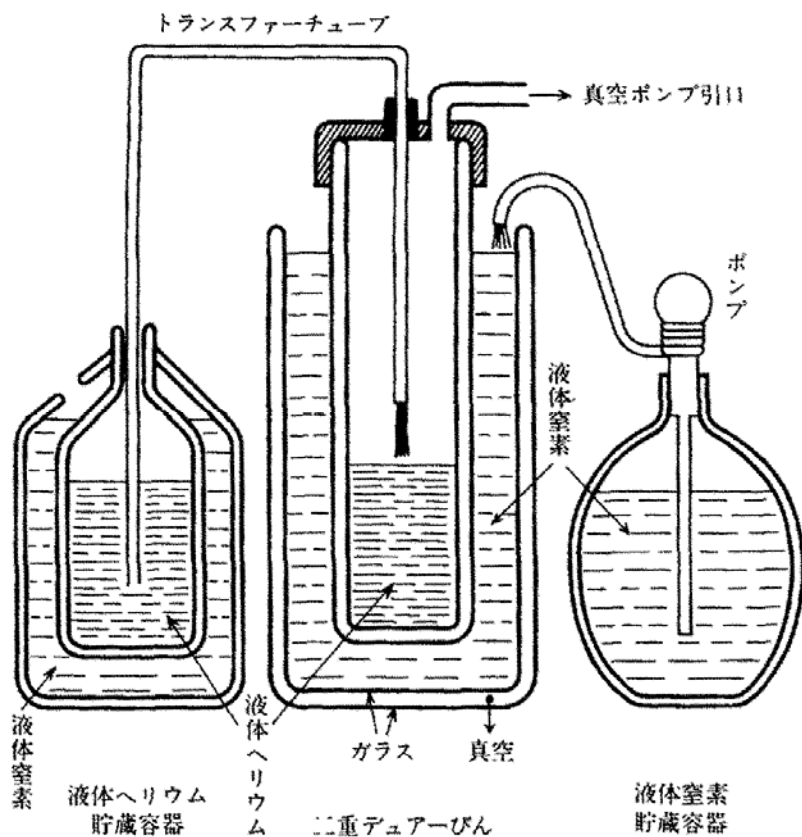
どこでも手に入るようになった。また、液体ヘリウムも比較的容易に入手可能となり、一リットル二〇〇〇円ぐらいで購入できる。これは、ヘリウムが発見されて間もない頃に、ヘリウムガスを入手するのにさんざん苦労したオネェスが、一九一九年アメリカ政府の国を挙げての援助で、三〇立方メートルのヘリウムガス^{*}を寄贈してもらい、実験にいそしんだ時代と比べて隔世の感がする。

さて第2図のように、はじめに、液体窒素の貯蔵びんから二重デュアーびんの外側へ、液体窒素を汲み入れる。このとき使うポンプは、ちょうど石油ストローに石油を汲む手押しポンプに似ており、スポスポと液体窒素を汲む仕掛けになっている。充分びんの内部が冷えるまで半日以上待つ。いよいよ液体ヘリウムを内側のデュアーびん^{**}に注ぐ時がきた。液体ヘリウムが、貯蔵容器から、トランスファークューブを通して、少しずつ注がれていく。液体ヘリウムは内側デュアーびんの内部で蒸発し、中をどんどん冷やしていく。蒸発したヘリウムガスが通って排出される管という管が冷却され、空中の水蒸気が霜となって貼りつく。その白さに目をうばわれていると、時々、霜が風に吹かれて飛び散るのが見える。その間にも、少しずつ少しずつ液体ヘリウムが溜まっていく。

この液体が、二〇世紀を通じて、極低温の驚異の世界を生み出してくれたも

* 液化するとたった43リットル足らずの液体ヘリウムしか作れない。

** 液体ヘリウムを貯蔵容器からヘリウムデュアーびんへ移す断熱チューブ。二重パイプでパイプ間が真空になっており、熱を遮断する。



第 2 図 液体ヘリウムの実験装置

のなのだ。すべての液体中で、最も表面張力が弱く、屈折率も最小で、密度も最低である。四重ガラスを通して見えるその液面は、ガラス壁面にピタリと直角に貼りつき、ほんの少しメニスカス^{*}を見せている。この液体が、今から始まる神秘とも思える世界へ、われわれを導くのだ。

屈折率が小さいため、液面は見にくく、ともすると見失いがちになる。目をこらしてじつと眺めていると、その表面の小さなさざ波が驚くほど速く波打ち、外界と隔絶されたマイナス二六九度Cの世界を、目のあたりに見せてくれる。この液体ヘリウムの比重はおよそ0・一三、水の八分の一ほどの密度のため、液面は躍り、軽々とさざ波をうねらせ、魅惑的にわれわれをいざなう。

オネスが夢見た液体が、今、われわれの前に静かに満たされている。管の上についた霜の上にさらに霜がつき、それがはがれて、はらはらと雪となって落ちる。この雪の世界はせいぜいマイナス数度C、二重デュアービンの中のマイナス二六九度Cの世界からすれば、灼熱地獄だ。

いよいよ、液体ヘリウムを真空ポンプで引く時がきた。デュアービンの上部にある管を真空ポンプにつなぎ、それ以外の穴はすべてふさぎ、ポンプのスイッチを入れる。ポンプに引かれて、ヘリウムガスがどんどん出ていく。減圧され

*液体が固体壁と接触するとき、水平面からずれて曲面を描く。この部分をメニスカスという。接触角が90°以下だと接触部が盛り上がるようになる。表面張力が弱いとこの盛り上がりが小さい。

るために、液体ヘリウムは激しく沸騰し、泡が液面を突き抜け、飛沫を吹き上げる。圧力は一気圧から徐々に下がり、液体ヘリウムは蒸発熱をうばわれ、その温度がどんどん下がっていく。初め絶対温度で四・二Kであった液体ヘリウムが、絶対零度の世界へ向かって、少しずつ下がっていくのである。

ちょうどその時だった。あの激しく泡立ち、液面を突き抜け、飛沫を上げていた液体から、すべての動きが消えたのだ。そこには、本当に透明な液体が、水平な液面を静かにたたえ、まるで死んだように横たわっていた。

いったい何が起きたのだろうか。温度は二・一七K。ポンプが止まったのではない。それが証拠に温度も圧力も少しずつ下がっていく。二K、一・八K、一・六K、……。それなのに沸騰する泡はひとつぶも見えない。この死に絶えたような静寂の世界に何が隠されているのだろうか。この世界に隠された魅惑的な性質は、オネネスによるヘリウムの液化以後、三〇年、五〇年、いや今日においてさえ、一枚また一枚と、そのベールがはがされているのである。

二・一七Kより高温の液体ヘリウムを（ヘリウムⅠ）、低温のものを（ヘリウムⅡ）と呼ぶ。このヘリウムⅡの静寂の世界こそが、あの有名な超流動の世界なのだ。

第2章 超流動ヘリウムの不思議

固化しない液体ヘリウム

オンネスはノーベル賞受賞後もこつこつと実験を続けており、六十歳を超えた年齢にもかかわらず、弟子のケーソムとともにもう一つの新たな挑戦、ヘリウムの固化に熱中していた。しかし、固体ヘリウムを作るといふ夢が実現しないうちに、一九二六年、オンネスは永遠の眠りについてしまった。

あとに残されたケーソムは、先生の遺志を継ぎ、研究に専念した。オンネスを尊敬し、崇拜し続けたケーソムは、先生の死を契機に、より自由に自分自身の考えを発展させ始めた。彼は温度をそれ以上下げることがあきらめ、圧力をかけてみることにした。その考えは見事に的中し、二五気圧以上の圧力をかけ

ると液体ヘリウムが固化することを発見した。このケースムの研究から、液体ヘリウムは二五気圧以下の圧力では、たとえ絶対零度まで冷やしたとしても、液体のままで、決して固化しないことがわかった。ヘリウム以外のあらゆる原子・分子が、絶対零度になるとその圧力のいかにかわらず固化してしまうのにひきかえ、ヘリウムだけが例外なのだ。

液体ヘリウムのこの不思議な性質は、量子効果によってもたらされたものである。原子・分子が固体状態を作るためには、原子または分子が空間の一定の領域に閉じ込められねばならない。ところが、すべての粒子は、量子効果としての波動性をもっている。そこで、ヘリウム原子を固化するために狭い領域に閉じ込めようとすると、波長の短い波動の性質をもたねばなくなる。この短い波長は大きな運動エネルギーを生み出し、ヘリウム原子のように、引力ポテンシャルが非常に小さいときは、運動エネルギーのほうが大きくなってしまふ。結局、ヘリウム原子は互いの結合ポテンシャルを乗り越えて移動してしまい、固体としての結晶状態を維持できなくなってしまう。

これにひきかえ、ヘリウム以外の原子分子は、原子間、分子間のポテンシャルがもっと深く、お互いの引力ポテンシャルを乗り越えられないので、熱運動

のない絶対零度では固体になってしまうのである。

ケーソムは、液体ヘリウムが量子液体と呼ばれるのにふさわしい量子効果を示すことを発見したのである。このようにして、ケーソムは、オネネスさえ想像だにできなかった世界へ、一步また一步と入っていった。

入転移の発見

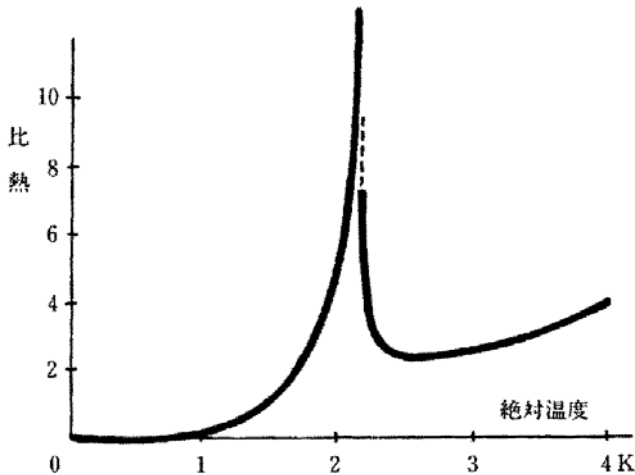
紙上実験を続けよう。真空ポンプで吸引し蒸発させた液体ヘリウムは、二・一七Kで突然沸騰をやめ、静寂の世界へと移っていった。何事が起こったのか、もっと詳しく調べるために、ポンプを止め、液体ヘリウムの比熱を測ってみよう。

液体ヘリウムの中に入れて置いたヒーターからのリード線に電池をつなぐ。流れ出した電流が、ヒーターで発熱し、液体ヘリウムの温度が上昇する。その温度を示す温度計の目盛をじっと見つめる。温度が一目盛ずつ上がるごとに、その間のヒーターの発熱量を一点また一点と、グラフに記入していく。点を書くたびに何かが見えてくるような気がして、早く全体のカーブを知りたいと思

う。はやる心を抑えて、一つずつ点を増していく。とうとうグラフが完成した。

それにしても、なんと奇妙なカーブだろう。第3図に示したように、 2.17 K で比熱は無限に大きくなっている。この比熱の異常な高まりと、沸騰する泡が突然消える現象は、まったく同じ温度 2.17 K で起きるのだ。このカーブは、きつと、とんでもない秘密を隠しているのだらう。奇妙なカーブはギリシア文字の λ という文字形に似ている。そこで、これをエーレンフェストは(λ 転移)と名づけた。まことに印象的な名前だ。

この λ 転移をめぐるエーレンフェストのドラマは、あとで詳しく述べることにしよう。さて、この比熱の異常を初めて見つけたのもケースムである。ヘリウムの固化に成功し



第3図 液体ヘリウムの比熱の温度変化

(2.17 K 近くで比熱が無限大になり相転移する)

た彼は、その後もたゆむことなく研究し続け、一九三二年この不思議なヘ型のカーブを見つけたのだ。

父娘二人三脚で見つけた超熱伝導

ケーソムの研究は、ヘ転移の発見後もやむことはなかった。彼は常に先へ先へ進もうとする。何年もかけて液体ヘリウムの一つの性質が明らかにされると、また別のペールをはがす戦いが始まる。このケーソムのひたむきな姿に打たれたのは、ほかでもない、彼の娘であった*。

当時は世界中を探しても、女性研究者は非常に少なく、とりわけ実験物理を専攻する女性はいくつもいなかった。しかし、彼女は父の物につかれたような姿を見て、それほどの興味がどこからくるのか、身をもって知りたかった。彼女もまた謎のペールに包まれた液体ヘリウムの世界に魅せられていくのである。彼女を待ち受けていたのは、はたして何であつたらうか。

この父と娘をとりこにした魔物、液体ヘリウムは、今までこの世に存在したことのないとおきの事実を、ケーソム親子に授けるのである。彼らは二・

*A.P. ケーソム。『ランダウの素顔』（ア・リワノフ著、松川秀郎訳、東京図書）p. 141 によれば、W.H. ケーソムの娘となっている。一方『極低温の世界』（M. ユーシン他著 講談社）p. 113 では妹となっているが、ライデン研究所の知人によれば、娘とのことで、本書は娘として書いた。

一七 K 以下の液体ヘリウム内にヒーターを置き、それを熱して、熱がどのように伝わるかを調べていた。

われわれも紙上実験してみよう。前の紙上実験で用いたヒーターの近くと遠くに、一つずつ温度計を置く。この二つの温度計の示す温度差から、ヒーターで発生した熱の伝導度を調べるのだ。

さあ、ヒーターに電流を流してみよう。温度計の目盛をじつと見つめる。どんな実験でも初めての観測のときは、なんと緊張することだろう。今じつと見つめているこの目盛に、何か重大な神秘が隠されていないかと期待し、胸の高まりを覚え、目をこらす。五〇年以上も前のケースム父娘もそうであったように、われわれも神秘の世界に引き込まれていく。どうも変だ。二つの温度計の目盛がまったく同じ値を示してしまう。高温から低温へ熱が伝わるのが常識だ。温度計の目盛がくるっているのかもしれない。

温度計を新しいものに換えてみる。結果はまったく同じだ。念のため、ヒーターの電流を増やし、熱をどんどん与えてみる。二つの温度計の目盛は共通な値を示したまま、少しずつ少しずつ上昇していく。一・九 K、二 K、二・一 K、二・一七 K、突然、泡がヒーターの周りから噴き出す。ゑん転移がおきて、二・

一七 K 以上に温度が上がった証拠だ。この時、温度計の目盛を見ると、奇妙なことが起こっている。今まで同一であった二つの温度計の示す目盛は、ヒーターに近いほうがより高温に、遠いほうがより低温を示している。これこそあたりまえの温度の分布だ。結局、二・一七 K 以下の液体ヘリウムは、われわれの装置では検出できないくらい小さな温度差でも、ヒーターからの多量の熱を伝えることができるのだ。まさに（超熱伝導）といってよからう。

このことから、二・一七 K 以下で沸騰が起こらない理由や、ヒーターの発熱によってもヒーターの周りに泡が発生しない理由がわかるような気がする。それはこうだ。ほとんど温度差がなくても、熱が運ばれるのだ。二・一七 K 以下の液体ヘリウムでは、局部が熱せられても、その部分の温度が測定にかかるぐらい周りより高くなるということは、起こらないのだ。すなわち、沸騰しなくても、熱は完全に液体全体に均一に運ばれていき、まったく同一の温度になり、蒸発は液表面からのみ行われるのである。（脚注 * 参照）

ケーソム父娘は、この現象を克明に観察した。彼らの測定によれば、二・一七 K 以下の液体ヘリウムⅡでは、二・一七 K 以上での液体ヘリウムⅠに比べて、三〇〇万倍以上の熱伝導係数をもつこと、すなわちヘリウムⅡのほうが三〇〇

* 水が沸騰する時を、よく考えてみる。すると、泡の発生する部分では、100 度 C より、ほんのわずか温度が高くなっており、蒸気圧が高いため、泡を発生し、内部にほんの少し高压の蒸気が入っている。その圧力差によって、泡の表面張力で泡が消えてしまわないように維持されている。

万倍以上も熱を伝えやすいことがわかった。もし水がヘリウムⅡのように超熱伝導になれば、風呂槽から風呂釜を取りはずし、一〇〇メートル以上の長さの二本のパイプでつなぎ、一〇〇キロメートル以上離れた所で風呂釜に火をつけると、風呂が沸くことになる。まさに、驚異の世界だ（脚注 * 参照）。自然は、このような素晴らしい世界を、ケーソム父娘への贈り物としたのだ。それは一九三五年のことであった。そしてこの情報は世界中に大きな衝撃を与え、極低温・液体ヘリウムの世界に研究者の目を釘づけにしていく。

エーレンフェストの悲劇

え転移の名付け親としても有名なエーレンフェストが現れるまでは、相転移というものは、水の凝固・沸騰などのように、ある定まった温度で物質の二相（水と氷、水と水蒸気など）が共存し、お互いに移り変わるものと思われてきた。さらに、特定な温度での相変化にともなって常に潜熱があると思われる。一〇〇度Cの水は、温度が一〇〇度Cのままで沸騰しながら、熱を吸収する。その際、吸収した潜熱分だけ、水が水蒸気になっていく。このような性質

* 超流動ヘリウムでは、このように超熱伝導が起こることが有名なため、超伝導でも、熱伝導が良くなるという誤解がある。超伝導の章の「熱スイッチの秘密」の節で述べるように、超伝導になると、逆に、熱伝導が悪くなる。

をもつものを、当時までは（相転移）と呼んでいた。

ところが、エーレンフェストはこれを再検討し、潜熱も二相共存状態もないのに、突然状態が変化する新しいタイプの相転移が存在することを明らかにした。λ転移はこのような（第二種の相転移）にあたるのだ。エーレンフェストは、このように液体ヘリウムのλ転移の特徴を、正しく分析していった。さらに、彼はλ転移とその転移温度以下での性質を、完全に明らかにしたいと願っていた。しかし、それを明らかにできなかったのである。彼の失望の深さが、彼の論文に刻まれている。

「第二種相転移が、普通の相転移とどんなに特徴的に異なっているのかを、もつとよく形式化し、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記している。

このようなことを論文に書いた人が、彼以外にいただろうか。その本質を解明しきれないのは、彼の責任ではないのだから。その後、多くの研究者が液体ヘリウムの本性を解明するのに、長い年月がかかったことを見れば、彼の能力が低かったからではないことは一目瞭然である。それどころか、彼による相転移の新しい分類は、彼の洞察力がどんなにすぐれていたかを示すものである。

にもかかわらず、エーレンフェストの心は満たされなかった。

電磁気学の整備、初期の相対性原理への貢献で有名なローレンツが老齢でやめたあと、オランダ・ライデン大学の後任者となったのが、エーレンフェストである。彼は大学で非常に親切な人間味あふれる人として、みんなから敬愛されていた。弟子たちの才能を認めると、親身に教育し、その足りないところを補い、個性を伸ばそうとした。彼には多くの心温まる逸話がある。

当時、物理学の世界は、量子力学が誕生して間もない時期であり、若き天才たちがその完成のためにしのぎを削っていた。今われわれは完成した量子力学を、教科書によってたった一年ほどで学んでしまふ。しかし、その一つ一つの内容が、一人一人の天才の苦難に満ちた長い長い年月の努力で作られたものだ。量子力学の建設時には、天才たちも若く、まだ認められず、自分の研究もなかなか進展せず、苦勞し続けていた。エーレンフェストは、この多くの天才たちを励まし、勇気を与えていたのだ。

エーレンフェストの弟子、カウシユミットとウーレンベックが、電子の自転、すなわちスピンを考え出し、その論文を書いたとき、「それはよい考えだ。その考えはまちがっているかもしれないが、君たち二人はまだなんの名声もない若

者だから、馬鹿なまちがいをして失うものは何もない」と言っただけの仕事の積極的な面を見抜き勇気づけたのは、エーレンフェストであった。一方、ウーレンベックはローレンツに会い、その着想を話したところ、「その考えは非常にむづかしい。なぜかという、その考えでは磁気的自己エネルギーが大きくなりすぎ、電子の質量は陽子より重くなる」と指摘された。そこで、彼は自分たちの論文を出版しないよう、エーレンフェストにことわりに行くと、「あれはもう送ってしまった」と言われた。そしてその論文は、雑誌に公表されることになる。^{*}このスピンという考えは、その当時はまだわかっていなかった相対論的電子論の完成によって、初めてその真の姿を明らかにされる。そして、ウーレンベックとカウシュミットの名は、電子の（スピン）の発案者として永遠に残ることになった。

こんなふうには、エーレンフェストに救われた研究者が多かったにもかかわらず、彼はローレンツの後継者という資格はないと、一生思い続けていた。気まじめ一本の彼は、自分の研究の行きづまりに疲れはててしまった。彼は、その当時親しくつき合っていたカピッツ^{**}に、心の中の苦悩を打ちあけた手紙を送る。「もはやこれ以上生きていてもしょうがない。自分を救う唯一の道は、ライ

*この逸話は、朝永振一郎著『スピンはめぐる』（中央公論社）に詳しく書かれている。

**1894年ソ連に生まれる。超流動の発見者。1978年ノーベル物理学賞受賞。

デンを去り、どこか友人から遠く離れた所に落ち着くことだ。カナダの小さな大学に職を見つきたい。そのために、君からラザフォード^{*}に頼んで職を見つけてほしい」という内容の手紙だった。カピツアの先生がラザフォードであったので、頼んだのだ。カピツアは驚き、なんとかしてエーレンフェストを救いたい一心で、その手紙を英訳し、ラザフォードに見せて頼んだ。ラザフォードはすべてを了解し、八方手を尽くした。エーレンフェストは、ラザフォードからの心のこもった手紙を受け取る。そこには、物理学において、エーレンフェストがいかに大きな役割を果たしたかが述べられており、ライデンのポストを去る必要がないことが書かれていた。彼は勇気づけられ、生きる希望をふり起こそうとした。しかし、彼の心の傷はいやされなかったのだろうか。一九三三年九月二十五日、自ら、命を絶つのである。

それから何年も経て、彼の悩みの一つであった液体ヘリウムの本性が、徐々に明らかにされていった。彼の悩みの多くは、当時の状況では理解不可能なことであった。物理学のあらゆる成果の裏に、このような悲劇や犠牲が隠されている。進歩とは、苦悩に満ちたドラマでもある。

*1871 年ニュージーランドのネルソン近郊に生まれる。原子核の存在を立証。1908 年、元素の崩壊・放射能に関する研究でノーベル化学賞受賞。

**カピツアの王立協会での招待講演で明らかにされた逸話。『自然』（中央公論社、1971 年 10 月号）p. 80 に全訳がある。

ラザフォードとカピッツア

ゑ転移、超熱伝導などの発見により、液体ヘリウムの神秘的な性質が浮かんできた。この不思議な現象に興味をもった研究者が、オランダ・オネス研究所だけでなく、カナダでも、イギリスでも、ソ連でも現れた。彼らはヘリウムを液化し、極低温の実験を開始した。しかし、彼らの液化装置はみな、オネス以来使われていた方式のものであった。室温から順々に、より低い液化温度をもつ気体を液化し、液体水素を作り出し、それでヘリウムガスを冷やしなから圧縮し、細いノズルから噴き出させてヘリウムを液化していた。

この膨大な装置を一举に簡略化したのがカピッツアである。彼はソ連の物理実験家で、イギリスのケンブリッジ大学のラザフォードのもとに留学していた。原子模型の生みの親、ラザフォードとのふれ合いによって、彼の才能はますます磨かれていった。彼はヘリウムの液化装置を作ることに専念した。

彼のアイデアはこうだ。蒸気エンジンの原理を使うことだ。よく知られているように、蒸気エンジンは熱エネルギーを仕事に変える機械である。仕事を生

み出したあとで、蒸気は液化して水になる。この原理を使って、高圧ヘリウムガスでエンジンのピストンを押し上げ、仕事を外へ取り出す。するとエネルギー保存則に従って、ヘリウムガスの温度はどんどん下がっていく。そして、ついに液体ヘリウムができて上がる。

いかにも簡単そうに聞こえるが、本当にこんなうまい話どおりに事は運ぶだろうか。ヘリウムガスはちよつとした小さな穴でも抜け出してしまい、それを密閉しながらピストンを動かすのが難しい。極低温なので動く部分に油はさせない。油が凍りついてしまうからだ。そのうえ、ピストンがこすれて摩擦熱を発生すると、せつかく冷やしたのが帳消しになる。このように困難な問題が山積していた。さらにヘリウムガスが生み出した仕事を、室温下にある外部に伝えて、消費させねばならない。この仕事を伝達する機構の部分が、室温の熱を逆にヘリウムに伝えてしまうと、せつかく冷やしたヘリウムを温めてしまうので、元も子もない。

彼はこの難しい装置を少しずつ少しずつ、しかし確実に作っていった。その出来ばえは見事なものであった。今までの何段にもわたる低温化の装置は、その様相を一変した。液体空気を冷却剤として、直接、彼の装置でヘリウムの液

化が行える。これは、のちにマサチューセッツ工科大学のコリンズに受け継がれ、二つのヘリウムエンジンを組み合わせて、直接冷たい水道水からヘリウムガスの液化が行えるまでに進歩していくのである。

カピッツアの発明によって、ヘリウムガスの液化は世界中どこでも行えるようになった。彼はこの装置を、イギリスのラザフォードのもとで作り上げていた。しかし、それを使った本格的な液体ヘリウムの実験には、いまだ着手していなかった。

一九三四年の夏、カピッツアはいつもの休暇を家族といっしょに過ごすため、ソ連に一時帰国していた。その時、アカデミーから大変な知らせがもたらされた。彼に研究所を創立させる仕事を与えられたのだ。研究体制を含めた大きな裁量権が与えられた。研究所はモスクワに作ることになった。降って湧いたような幸運、しかしすべてのことを早急に決めなければならない。研究所の設置場所、研究所の建物の構造、スタッフの宿舎、研究所員の選考。すべてが彼の肩にかかってきた。忙しいなかで、研究所の設置場所を見つけるために毎日歩きまわり、少しでも環境の良い発展性のある場所を探しまわった。いくつかの候補地を見つけたが、建設用地を提供してもらえなかった。探しあぐねた末に、

モスクワ川の河畔に格好の場所を見つけた。彼は川の見える場所にぜひ研究所を建てたかった。その夢はかなえられた。研究所の建物も趣向をこらして建てた。所員の宿舎も英国風の建物にした。彼のイギリス留学中のなつかしい思い出がしのばれる美しい建物ができ上がっていった。

順風満帆に見えるカピツアにも、一つの悩みがあった。それは、イギリスに残してきたヘリウム液化装置のことであった。彼が最もやりたかったことは、液体ヘリウムの実験であった。研究所設立は、ソ連の科学水準を引き上げ、研究者の良い研究環境を作るためには、どうしてもやりとげねばならないことはあった。しかし、彼個人の気持からすると、イギリスでの実験をすぐにでも続けたかった。世界中の極低温の研究者の目が液体ヘリウムに注がれていた。競争の火ぶたはすでに切り落とされていた。研究所設立のため、彼にはイギリスへの出国の自由はなかった。カピツアはいつも弟子たちに、「非常に優れた学者でも研究室で仕事をするをやめた瞬間に、その人は成長するのをやめるばかりではなく、全体的に学者であることをやめているのだ^{*}」と語っていた。彼の心はあせる。

彼の気持を最もよく知っていたのは、ラザフォードであった。ヘリウムの液

^{*} 『ランダウの素顔』（ア・リワノフ著、松川秀郎訳、東京図書）。

化装置がカピッツアの手元にないために、彼の研究が遅れ、へたをするとその才能を埋もらせてしまうことになりかねない。どうかしてその装置をソ連に送り、カピッツアが研究に没頭できる環境を作ってやりたかった。ラザフオードは、政治問題化することも恐れず、最高度の科学技術が盛り込まれた装置をソ連に売却するよう奔走した。彼の努力は実り、その装置はカピッツアのもとに届き、液体ヘリウムの新しい世界を切り開くことになる。

カピッツアを助けた技官たち

彼が創設した研究所は、モスクワ物理問題研究所と呼ばれ、一九三七年、やっと発足されることとなった。彼は、各部門の教授として、有能な研究者を連れてくるために心をくだいていた。研究所の活力はその教授選考にかかっていた。カピッツアは、「巨大科学で優れた成果を収めることができるのは、創造性に富み、自分の研究に対しても創造的に取り組んでいる人だけです。科学の道があらかじめ敷かれた場合でも、この道を前進させるのは、とくに才能のあるごく少数の人々の研究なのです。したがって研究所の中核は、非常に周到に選び出

された科学者の小集団でよいわけですが、ただこの中枢は完全に科学研究に打ち込んでくれねば困ります^{*}」と述べており、人選はとくに慎重に行われた。

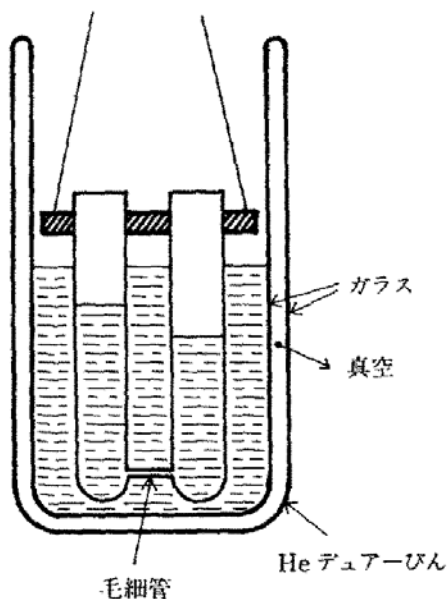
カピツァは、理論物理学部門を主宰させるために、ハリコフ大学のランダウに目をつけた。ランダウは弱冠三十歳の、傑出した研究者であった。この二人の出会い、その後の液体ヘリウムの研究にとって決定的に重要な意味をもつことになる。実験部門でのカピツァと理論部門でのランダウは、車の両輪となつて、物理問題研究所の中核となつていった。

カピツァはそのほかにもいろいろな人を連れてきた。彼の研究室にも、二人の有能な技官、フイリモノフとペトシニコフが雇われた。カピツァは「器具を工夫して新たに作り出すことは、これも創造的な研究の一環なのです」と常々口にしていた。そして、二人の技官は、器具の工夫・製作にかけては右に出るものがない才能を発揮した。イギリスから送られたヘリウムの液化装置を動かし、彼の念願の実験が開始された。それは、一九三七年のことであった。三年間の研究からの離脱を埋めようとして、カピツァと二人の技官は、物につかれたように液体ヘリウムの世界にひき込まれていった。

^{*} 『ランダウの素顔』（東京図書）p. 36。

超流動の発見

カピッツァが研究所の設立に努力している間に、ケーソム父娘の超熱伝導の発見の報告がもたらされた。人間が今まで体験したことのない目を見張る世界が展開し始めたのだ。カナダのトロントでも実験が行われ、興味あるデータが出ていた。ぐずぐずしてはおれない。三年の遅れを取り返さねばならない。彼らの研究は、日夜を問わず行われていった。ペトシュコフはガラス細工に優れていた。液体ヘリウムの中にひたされ、極低温の中で働く多くの器具を、ガラスを吹いて作った。一〇〇〇分の一ミリほどの穴でつながった複雑な形の器具、ガラスで作られた動く仕掛け、



第4図
ヘリウムIIの粘性を測る

何でも彼の手にかかるとやすやすと作られた。フィリモノフは、機械や電氣部品その他実験に必要なものは何でも作った。カピッツァが考えたことは、翌朝にはもう実験できるように各種の装置ができて上がった。

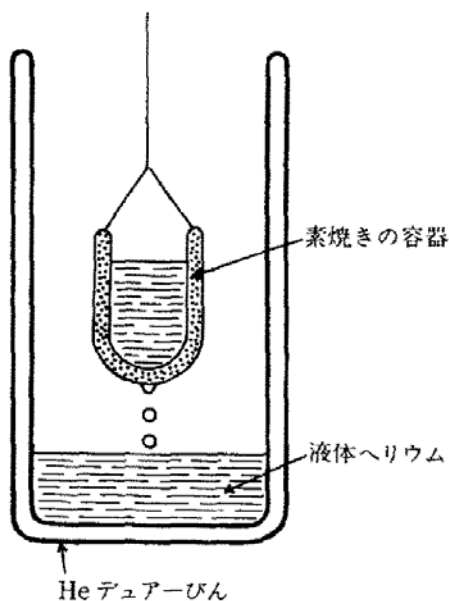
カピッツァは、ケーソムの発見した超熱伝導が、対流によつてもたらされるのではないかと考えた。液体ヘリウムⅡでは、液体が特別に流れやすいのかも。彼はヘリウムⅡの粘性を測る実験を始めた。

われわれも紙上実験してみよう。二つの容器を、第4図のごとく非常に細い毛細管でつないで、液体ヘリウムのデュアーびんの中に置く。二つの容器には液体ヘリウムが同じだけ入っている。この容器は上から細い針金でつるされ、上の針金を少しひっぱると、容器が左右に少し傾き、二つの容器の中の液体ヘリウムの液面の高さを變えることができる。右の容器の液面を少し高くセットする。ヘリウムの圧力は一気圧、温度は四・二Kだ。デュアーびんの外から、銀メッキのついていない部分を通して、中の液面の高さを測る。左右の容器の側面には液面の高さを読みとれるよう、一ミリメートル間隔の線がこまかく刻印されている。右の液面のほうが二〇ミリメートル高い。じつと液面を眺める。時計の針が時を刻む。一分たつても液面に何の變化もない。二つの容器を連結

*デュアーびんは輻射熱を遮るために、銀メッキがほどこされている。

中を見るために、このメッキの一部がはがされて、縦長のスリットがはいっており、ここから液面を観測する。

している毛細管は、とても慎重に細く細く作ったので、四・二Kでの液体ヘリウムIは、非常にゆっくりしか流れられない。われわれが観測している間には、液面の変化が少なすぎて、差が見えない。こんどは圧力を下げて、液体ヘリウムを蒸発させ温度を下げてみよう。真空ポンプのスイッチを入れる。四K、三K、二・二K、さらに転移温度以下に下がる。一・八Kで温度を一定に保つ。右の容器の液面はまだ一五ミリメートル高い。一〇秒ごとに、左右の液面の高さを測定する。液面が変化していく。一分、二分……。左右の液面はどんどん変化し同じ高さになってしまう。こんどは、もう少し違った実験を試みよう。素焼きの陶器に液体ヘリウムを入れて、第5図のようにデュアービンの中につるす。



第5図
素焼きの陶器の小穴を通り抜ける超流動ヘリウム

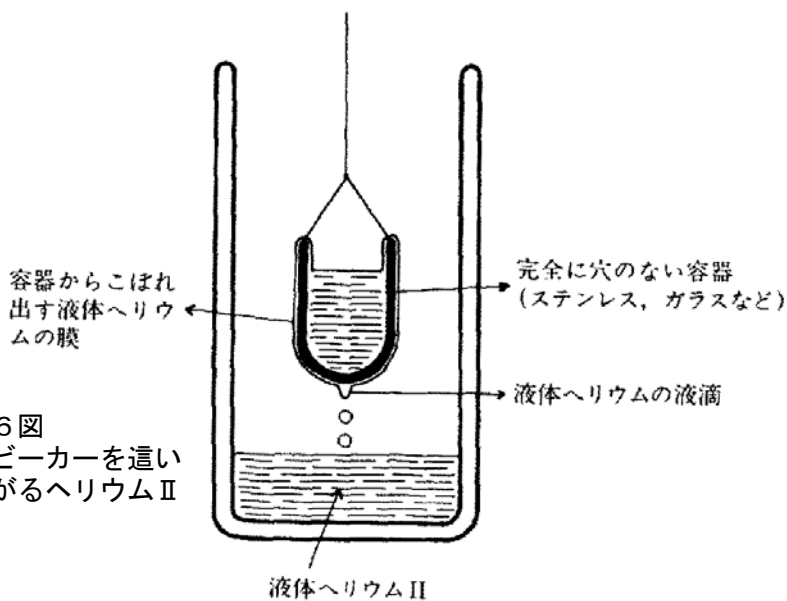
λ 転移以上の温度では何も起こらない。温度を下げていく。注意深くデュアーびんの中を凝視する。λ 転移温度以下になった。素焼きの容器の底から、液体ヘリウムⅡのしずくがぽたぽたと落ちる。これこそ、カピッツアの求めていたものだ。素焼きの目にも見えないほどの細い穴を通って、液体ヘリウムが流れ落ちていく。

カピッツアは、毛細管の代りに、よく磨いた二枚の平板の間のすき間を通る流れを観測した。測定の感度は著しく増大した。液体ヘリウムⅡの粘性は非常に小さかった。しかし、彼はそれでも満足しなかった。実験の精度を上げるため、何度も何度もやり直してみた。そのたびに、粘性は小さくなっていった。さらに、平板の間のすき間を狭くしてみた。また粘性の値は小さくなった。粘性はどこまでも小さくなるように思えた。液体ヘリウムⅡの粘性は、水の値の一〇〇〇万分の一以下になった。今まで見つかった最小の粘性をもつ水素（気体）に比べても、一万分の一以下になった。彼は液体ヘリウムの本質を発見したと思った。超熱伝導も、粘性のない液体が流れて、対流によって温度を均一にすると考えれば、納得がいく。カピッツアは、ついに粘性のない世界を見つけたのだ。（超流動）——。なんという不思議な世界だろう。彼はその後もこの

世のものとは思えぬ不思議な現象を次々と見つけていくのだ。

壁を這い上がるヘリウムⅡ

液体ヘリウムⅡを二つの容器に入れ、容器と容器の外壁がふれ合うように置いておく。おのおのの容器には、どんなに小さな穴もあいていないように吟味してある。初めは一方の液面は他方より高い。しばらく置いておくだけで、まるで手品のように液面の高さがそろってしまふのである。容器と容器の底がつながっているわけではない。カピツアの研究室では、こんな魔法のような光景が、毎日毎日作られていった。この現象は次に述べる実験と密接に関係している。



第6図
小ビーカーを這い
上がるヘリウムⅡ

それは、第6図のような簡単な実験なのだ。上からつるされた容器に、ヘリウムⅡが入れられている。この容器は穴があいていないのに、ぽたぽたと液体ヘリウムが落ちるのだ。素焼きの陶器とは違って、穴はまったくない。このしずくも、二・一七K以上では見られなくなる。

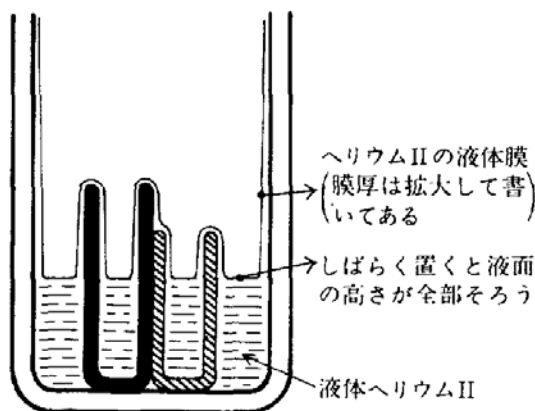
目に見えないような薄い液体ヘリウムの膜が、容器の壁を這い上がり、外壁を下り、液滴となって落下するのだ。この液体の厚さは、カピッツァの実験から何年もたつて測られ、約一〇万分の二ミリメートルという薄い膜であることがわかった。光の波長の三〇分の一、光の干渉を使っても測れない厚さだった。この薄い液体ヘリウムⅡが、容器の壁から、ファン・デル・ワールス力という引力を受けて、這い上がるのだ。膜厚が薄く、壁に近いところを流れるため、普通の液体なら粘性によって流速が非常に小さくなってしまう。そのために、何日もかけないと壁を上れないし、それを見ることは通常不可能に近い。^{*}それが、超流動性のためとても速いスピードで流れ出すのだ。この奇妙な現象も、カピッツァの見つけた超流動性で説明できるのだ。

それでは、さきに述べたもう一つの魔法のような現象を考えてみよう。説明のために、這い上がる液体ヘリウムの膜を、第7図のように厚く書いてみる。

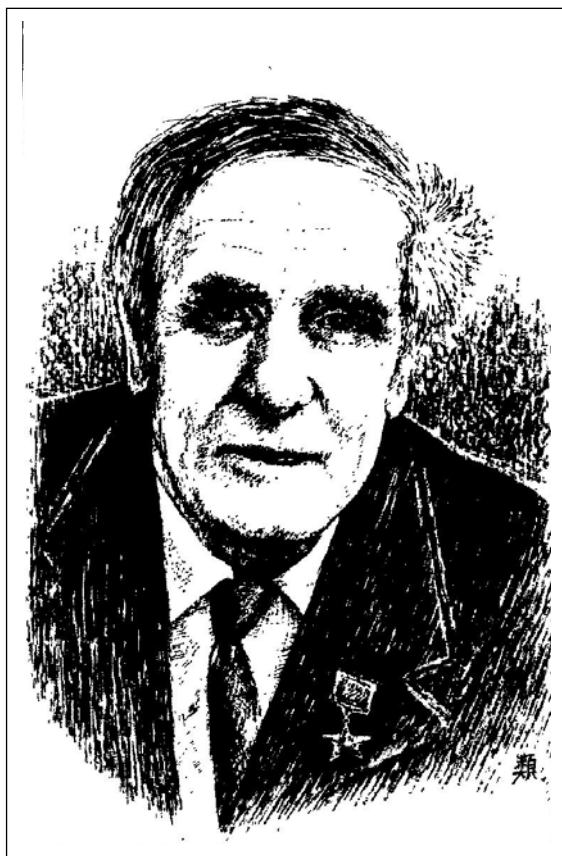
^{*} 著者は、通常の液体で室温でも、この現象が存在することを実験的に確かめ、また、その流れのメカニズムを解くことに成功した。
詳細は文献 1) を参照。

第2章 超流動ヘリウムの不思議

この図のように液体膜が這い上がり、横の容器の液面の高さと同じになるまで流れ出すのだ。さらに時間がたつと外のデュアーびんにもまで這い出し、すべての液面の高さが同一水準になるまで流れ出す。こんなことが現実起こるとは、本当に不思議なことだ。カピツアと二人の技官はこんな不思議な現象を目のあたりにして、最初は自分たちの装置の不備ではないかと疑った。注意深く点検し、まちがいないことがわかつてはじめて発見の喜びにひたり、明日はどんな新しいことが見つかるか期待に胸をふくらませるのだった。こんな日々が、毎日毎日、三年もの間続いた。見つかった現象があまりに奇妙なので、カピツアは理論屋のランダウに相談した。彼も初めて見る超流動現象にびっくりし、日夜、



第7図 液体ヘリウムIIを入れた小ビーカーをくっつけて置くと、ヘリウムIIが這い出して液面がそろう



P. L. カピッツァ

「研究室では自ら手を下して実験を行って始めて、科学では真の成功が得られるのです。他人の手をあてにしているではよい学問はできません」と言い続けた。彼自身、研究所所長でありながら、自分自身の手で実験を行い、晩年は理論家として自分で計算し、教育者としてユニークな物理学問題集を作り、終生、物理の研究を続けた。

ああではないか、こうではないかと、考えをめぐらせていった。いくつかの可能性が浮かび上がった。そのどれが真実であるかを見きわめるために、新しい実験が試みられた。こうして、ランダウとカピッツアの協力関係はますます強くなっていった。二人の友情は、ランダウが死ぬまで続いた。カピッツアは超流動の発見で一九七八年に、ランダウは液体ヘリウムの理論によって一九六二年に、それぞれノーベル賞を受賞するのだ。さて、ここでもう一つのアエタスティックな実験を紹介しよう。

噴水効果

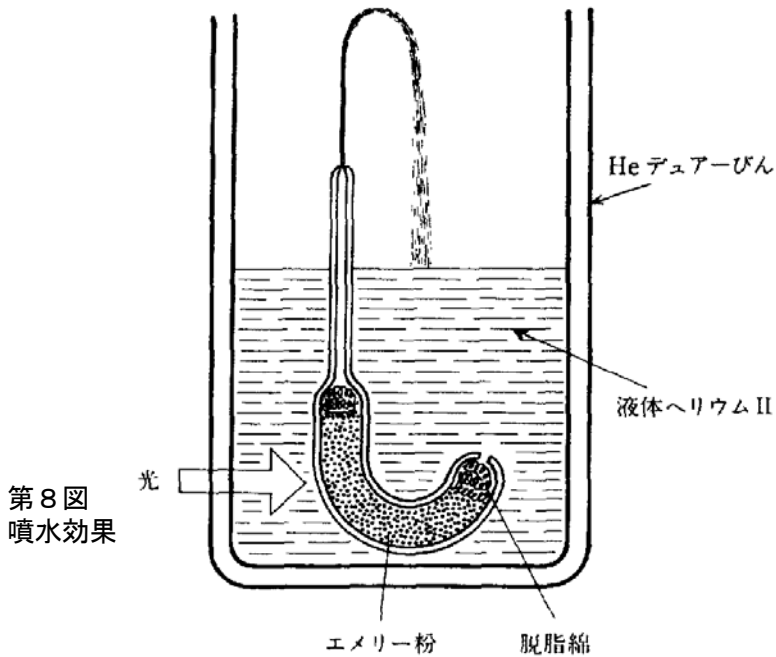
液体ヘリウムⅡ以外の物質では、物質全体の巨視的運動を扱う力学の世界とその内部の熱運動を扱う熱学の世界とは、独立に取り扱うことができた。それに対して、ヘリウムⅡでは、この二つの世界がからみ合う奇妙な現象がある。紙上実験によって、この世界に立ち入ってみよう。

装置は第8図のような簡単なものである。ヘリウムⅡの入ったデュアービンの中に、図のような小びんが置かれている。一端は小穴があいており、他端は

細い管となってその先が液面から出ている。小びんの太いところにはエメリー粉がつめられ、粉が散らばらないように底と細くくびれた部分に綿がつめてある。

エメリー粉の粒は非常に小さいので、粒と粒との間は非常に狭く、通常の液体だとほとんど流れられない。しかし、ヘリウムⅡではその超流動性のために、かなりなスピードで通り抜けることができる。

さて、この装置のエメリー粉の部分に、デュアーびんの外から光を当ててみよう。何が起こるか楽しみだ。光源のスイッチを入れる。何の反応もない。いや、一呼吸後に、細い管の先端から液体ヘリウムが吹き出した。まるで噴水のように。光を強くすると噴水は高くなり、弱めると



低くなる。噴水の高さは、最も高い場合で三〇センチメートルにも達する。しばらく見ていると、それが極低温の世界の出来事であることを忘れてしまいそうになる。その中へ入っていった、ヘリウム噴水の周りで踊りたくなる。目の前にこのようなおとぎの国が現れたのだ。

この実験は、アレンとジョーンズによって初めて行われた。この現象は（噴水効果）と呼ばれている。それにしても不思議なことだ。なぜこんなことが起こるのだろうか。

今までヘリウムⅡの超流動性について紹介してきた。しかし、ヘリウムⅡの実験が進むに従って、粘性のない（超流動性）を示す成分のほかに、粘性のある（常流動性）を示す成分も、同時に混じっていることがわかってきた。^{*}λ転移の起こる温度以下になると、この超流動成分が突然出現し、温度が低くなるほどその成分が増え、絶対零度では超流動成分が一〇〇パーセントになってしまう。すなわち温度が高いほど超流動成分が少ないのだ。

さて、第8図の装置に光を当てると、エメリー粉^{**}が熱せられる。温度が上昇するまでのほんの一瞬の間は何も起こらない。しかし一呼吸後に温度が上がってくると、小びんの中の液体ヘリウムは、超流動成分の比率が小さくなる。一

*このように、λ点 (2.17K) 以下では、液体ヘリウムは、超流動成分と常流動成分の混合物と考えることができる。そこで、これを二流体と呼ぶ。λ点以上の温度では超流動成分は現れない。

**コランダムと磁鉄鉱などの混合鉱物。結晶粒がこまかいことが特長で、超流動成分のみを通すのに最適。

方、小びんの外の液体ヘリウムではその比率が元のままなので、超流動成分はびんの中のほうが少ない。エメリー粉のすき間が狭いので、常流動成分は動けず、粘性のない超流動成分だけが移動できる。そこで、小びんの外の超流動成分が小びんの中へ入ってきて、温度上昇のため減少した超流動成分を補おうとする。すると、小びんの中の液体ヘリウムの全量は元に比べて増えるため、この増加分が、小びんの細い管の部分から噴水のように吹き出すのである。このように、二つの容器が超流動成分だけを通すことができる狭い通路で連結されているとき、一方の容器中の液体ヘリウムⅡを熱すると、超流動成分は温度の低い側から高い側へ移動する。すなわち熱と運動との相関が生じるのである。

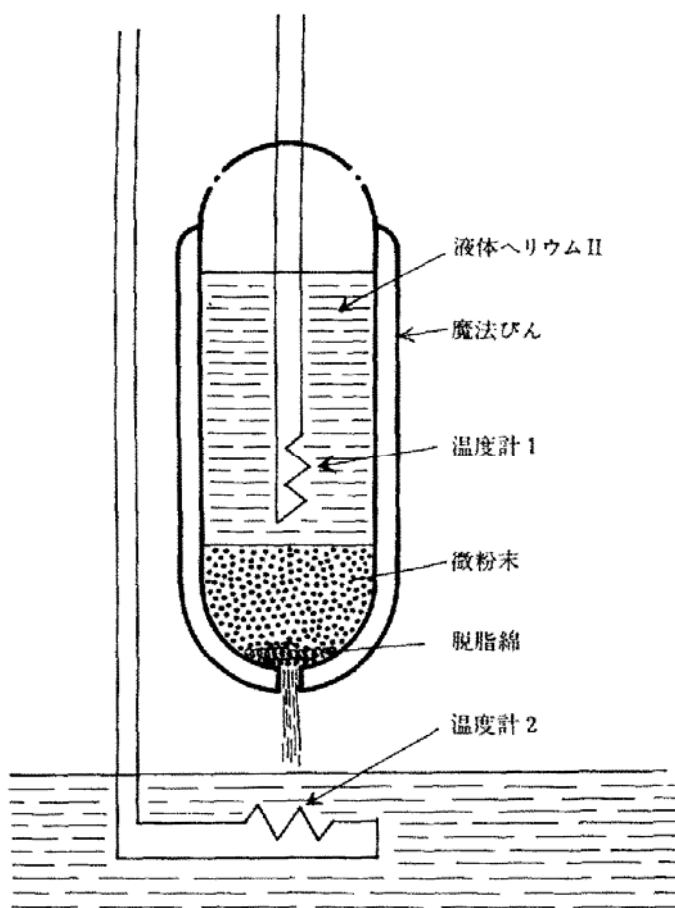
それでは、逆に温度差のないところで、無理やり超流動成分だけを移動させれば、温度差が生じるだろうか。この実験は、オックスフォード大学のダントとメンデルスゾーンによって行われた。

われわれも紙上実験で確かめてみよう。温度差を調べるために、できるだけ熱の伝達を遮断する必要がある。そこで、第9図のような底の抜けた小さな魔法びんを用意する。その底のほうに、超流動成分しか通さない粉を綿の上にしきつめる。これを液体ヘリウムⅡの入ったデュアーびんの中につるす。小さな

魔法びんの中の温度は温度計1で計り、外の温度は温度計2で計る。初めこの小さな魔法びんをデュアーびんの液体ヘリウムⅡの中に完全にしずめておく。温度計1と温度計2の温度は同じ値を示している。

そろそろと、魔法びんをつるしている針金を引っぱり上げてみる。魔法びんが液面より上にゆっくりと持ち上げられていく。びんの底から液体がしずくとなつてこぼれ落ちる。こぼれ落ちる液体は、何も変わったところがないように見える。しかし中の粉のつめものから考えて、超流動成分だけが流れ落ちているはずだ。だとしたら、魔法びんの中は、超流動成分の比率が減り、常流動成分の比率が増えているはずだ。一方、落ちたヘリウムを受けているデュアーびんの底の液体ヘリウムは、超流動成分の量が増えていることになる。これを確かめてみよう。

温度計1の目盛と温度計2の目盛を調べてみる。魔法びんの中の温度は、初めの時よりも確かに上昇している。デュアーびんの底の温度計は、初めより低くなっている。これは驚くべきことなのだ。まるで、ざるで熱をすくっているような光景である。ざるの中には高温なものだけが残り、下には低温な液体がこぼれ出す。われわれは、液体ヘリウムの世界に馴れ親しんできたので、こ



第9図 超流動成分の分離による温度変化

のような光景を目のあたりにしてもあまり驚かなくなってきたようだ。しかし、考え直してみると、このような流体の移動と熱がかかり合っている世界は、ヘリウムⅡだけでしか起こらない不思議な世界なのだ。

いくらでも液体の出てくる小びん

さて、話をカピッツアの研究室にもどそう。彼は超流動の発見に勇気づけられ、新しい現象を求めて、毎日毎日、工夫を重ねていた。ランダウはその部屋を訪れて、おとぎの国のような話を聞くのを楽しみにしていた。それからずつとあとで、ランダウが液体ヘリウムの話の講演を頼まれたとき、多くの人々に、魔法をかけられたような世界として、いつも話して聞かせた実験がある。この実験を見るために、一九三〇年代末のカピッツアの研究室へ、読者のみなさんとタイムトラベルしてみよう。

真剣な顔でカピッツアが、フィリモノフとペトシユコフに、作ってほしい装置を説明していた。「この実験の成否は君たちの腕にかかっている。ほんのわずかな流れでも羽根板が動くように作ってほしい。動きやすくするために回転

部分に油をさしたりすると、極低温なので油が凍りつき、動かなくなってしまう。それに液体ヘリウムの比重は 0.125 と小さく、力があるような装置では動かない。また、実験が始まると、外からデュアービンの中はさわれない。無理にさわろうとすると、室温の熱が入ってしまう、液体ヘリウムは沸騰し蒸発して消えてしまう。だから途中で中を調整することはできない。完全に故障のない装置を作ってほしい[†]。二人の技官は、こんどの実験が特別に大切なことを感じとっていた。

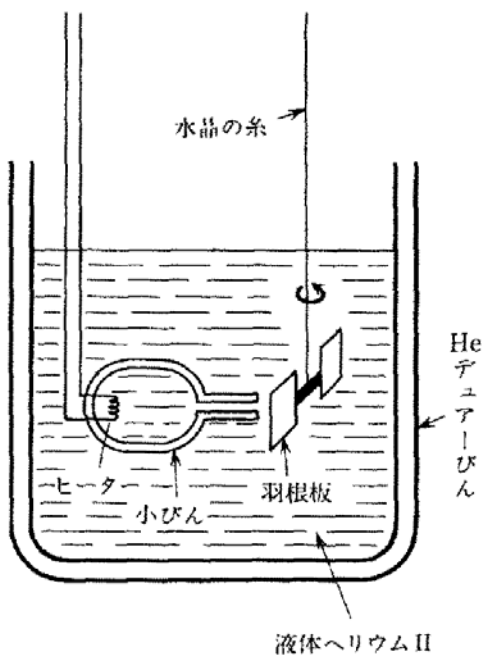
第10図のように、細くなった管が小びんの出口になっている以外には、どこにも出入口の穴はない。カピッツアは、「細い管の中は超流動成分だけでなく、常流動成分も移動できるように、適当な太さでないと[†]いけない」と言う。ペトシニコフはどんな太さが最適かわからないので、とけたガラスを吹いて、何本も太さの違うものを作る。図のように羽根板を水晶の糸でつるし、ほんのわずかな力でも糸がねじれて板が傾くようにした。小びんの底にはヒーターが入れた。外から電気を流して、中の温度を上げることができるようにした。すべての準備がととのった。あとは実験を開始するだけである。

カピッツアとフイリモノフは、実験台の前に立った。前日からすでに液化

第2章 超流動ヘリウムの不思議

器を動かしており、液体ヘリウムもできている。すべての装置は昨日から液体窒素で冷やしてある。容器を室温のままにしておいて液体ヘリウムを入れると、それがマイナス二六九度Cに冷えるまで、液体ヘリウムは沸騰し蒸発する。液体ヘリウムは蒸発潜熱が非常に小さいので、膨大な量の液体ヘリウムがガスになってしまい、むだに消費される。そこであらかじめ液体窒素温度マイナス一九六度Cまで冷やしておいたのだ。

二人は、準備状況、実験開始時刻をノートに書きつける。トランスファークチュールから液体ヘリウムを送り込まれ、デュアーびんを満たしていく。真空ポンプのスイッチが入れられ、圧力が下がり、液



第10図
超流動・常流動の
2つの流れを見る

体ヘリウムが沸騰し、蒸発熱がうばわれ、液体ヘリウム自身がどんどん冷えていく。二・一七K以下になり、ヘリウムⅡが出現する。第10図のように、びんの中にも液体ヘリウムⅡが満たされている。

カピツアの合図で、フィリモノフがヒーターのスイッチを入れる。小びんの中の液体ヘリウムが熱せられると、第10図の羽根板が図のように右へ動き、水晶の糸がねじれる。細管から出てくるヘリウムの流れで動かされたのだ。小びんから液体が噴出している証拠だ。

カピツアはそれを見ながら「今日は時間がかかるよ。これからが問題なのだ[†]」と言う。フィリモノフが聞く。「先生、それでは次はどうすればよろしいか[†]」。「何もしなくてよい。ただこれを見つと見ておればよい。小びんの中の液体ヘリウムがなくなるかどうか見たいのだ[†]」。

一分、二分、三分、時間がたつにつれて、カピツアはますますくい入るように装置を眺めている。小びんの中の液体ヘリウムは初めとまったく変わらず、減った様子がない。それなのに、あとからあとから液体が細い管から出てきて、羽根板を右へ動かしている。びんの中の液体はなくならないのだ。その小びんには細管の先以外にどこにも出入口がない。

カピッツァは一人うなずき、やつと確信したかのように、それでも驚きの表情をかくさず、興奮しながらフィリモノフに言う。「羽根板がひつかかっていることを確かめたい。ヒーターへの電流を止めてくれ[†]。フィリモノフはスイッチを切る。すぐに、羽根板は元の位置にもどる。細管からの流れがなくなったのだ。再度、ヒーターに電流を入れると、羽根板は右へ動く。何度試しても、同じことが起きるのだ。さらに、ヒーターに電流を入れ、長時間放置しても、小びんの中のヘリウムⅡは初めと同じに満たされ、なくならないのだ。

二人は数日後にもう一度同じ実験をくり返した。結果はまったく同じであった。カピッツァの喜びは頂点に達していた。ランダウを呼んでその不思議な光景を見せた。ランダウも興奮していた。二人は同じ考えに到達していた。この手品のたねあかしはこうだ。

小びんの中の温度は、ヒーターで熱せられて、外のデュアーびんのヘリウムⅡの温度より少し高くなっている。噴水効果のときと同様に、このため小びんの中の超流動成分は外に比べて少ない。そこで、外からこれを補おうとして、粘性のない超流動成分が流れ込む。このとき、粘性がないために、羽根板に当たってもそれをすり抜け、力を与えることはできない。粘性のない液体が物体

の周りを流れているとき、物体には力を及ぼさないということは、カピッツァの実験の約二〇〇年も昔、一七四四年にダランベール^{*}によって理論的に見出されていた。しかし、現実には、粘性のない液体が見つかっていなかったため、実現していなかった。それが二〇〇年も経て、いま実現しているのだ。このように、超流動成分は羽根板に力を与えることなく、小びんの中へ入り込んでいく。それで、小びんの中の液体が増え、圧力を増し、常流動成分が外へ押し出されていく。出口は細管の先にしかないのです、そこから常流動成分が流れ出し、羽根板に当たる。常流動成分は粘性があるので、羽根板に力を与え、羽根板を右へ押しのける。眼前の不思議な現象はこのようにして生み出されているのだ。細管の中は、外へ出る常流動成分の流れと中へ入る超流動成分の流れが共存し、ぶつかることなくお互いの流れを貫き合って流れている。このように、目に見えない超流動成分の流れがびんの中へ入り込むので、びんの中の液体ヘリウムがなくならないのだ。また、びんの中では、入ってきた超流動成分がヒーターで熱せられてどんどん常流動成分に変わっていくので、出ていく常流動成分が補充され、尽きることがないのだ。

カピッツァは大きな仕事をやりとげた満足感にひたりながら、フィリモーノ

^{*}1717 年パリに生まれる。独学で数学を勉強し、流体中の固体の運動に関する研究でアカデミー・デ・シアンズ会員に選ばれた。解析力学の基礎をなすダランベールの原理でも有名である。

フにこの理由を詳しく話して聞かせた。フィリモノフは、カピツァとともに、人類が初めて体験する世界に踏み込むことかできた喜びで顔を紅潮させ、興奮のさめないうちにその実験記録をノートにしたためていた。カピツァが死んでもからも、フィリモノフは、このノート（脚注 * 参照）を宝物のように大切にしまっておき、時々、あの日のことを思い出しながら、目を細めてじつと眺め続けたのである。

二つの音波

カピツァの実験ではつきりしたように、液体ヘリウムⅡでは、同一の場所に、超流動成分と常流動成分が違った向きに流れることができる。この性質のおかげで、次に述べるように、まったく新しい原理の波動がヘリウムⅡの中に発生するのだ。

今、液体ヘリウムⅡの局部を急に熱してみよう。するとその部分の超流動成分が熱せられ、常流動成分に変わっていく。このため常流動成分の比率が増し、熱せられていない周囲の超流動成分が、その局部を冷やそうとして流れ込む。

*フィリモノフのノートのことは有名である。

反対に、その局部に多く存在していた常流動成分は、その周辺へ向かって流れ出す。その結果、一瞬後には中心部が冷やされ、周辺部が熱せられ、温度が逆転してしまふ。これがくり返されると、次々と、熱い部分、冷たい部分と交互に温度の変化する球面波が作り出され、外へ向かって伝播していく。この波は（第二音波^{*}）と呼ばれている。

一方、超流動性のない通常の液体では、熱と運動の相関が生じない。すなわち、熱せられた部分が周辺へ流れ出そうとしても、周辺からの超流動成分がないため、流れ込めないため、質量保存則から、中心部の液体の密度が減る以外にない。それで中心部の圧力が下がり、液体はひきもどされ、周辺へ流れ出せない。このため、熱波となつて伝わるできない。他方、超流動ヘリウムでは、前述のようにこれが可能なのだ。

この現象は、ランダウとティツァによつて独立に予言され、その詳しい性質はランダウによつて計算された。そしてこの第二音波の波動をつかまえるために、一九四〇年、モスクワ物理問題研究所で実験が行われた。ランダウの計算によると、第二音波の速度は通常の音波の速度に比べてはるかに遅い。そこで、圧電素子でヘリウムⅡの中に振動を作り、その振動の伝播を測定し、通常

*通常の音波は（第一音波）と呼ばれる。これは、液体ヘリウムの密度の大きいところと小さいところが交互にでき、疎密波として伝わるもので、ここで述べた第二音波とは違う。第一音波と第二音波の音速は異なっており、速度の違う2つの波がヘリウムⅡの中を伝わる。

の音波のほかに、もっと遅く伝わる波動を探そうとした。しかし、そのような波は見つからず、ランダウは一時こまりはてていた。

四年後、失敗の原因が徹底的に分析され、機械的振動では第二音波を作れないことがわかり、前述のように加熱を周期的にくり返すと発生できることがわかった。熱の波動を作るためには当然なことといえるのだが、このようにほんのちよつとしたことでも初めて気づくことは、とても難しいのだ。

さて、この実験は $V \cdot P \cdot \text{ペシュコフ}$ によつて行われ、ヒーターを交流で周期的に加熱して第二音波を発生させ、離れたところに温度計を置き、周期的に温度が変化するのをとらえた。また、この波動の伝わる速さを測定すると、ランダウの計算値どおりの値を得た。こうして、ヘリウムⅡの不思議な性質がさらに一つ明らかにされていった。

永久流

読者のみなさんと、これまで液体ヘリウムの神秘の世界を旅してきた。この旅のしめくくりとして、ヘリウムⅡの止まることのない永遠の流れの話をしよ

う。

人はその心の奥深くに、永久という言葉へのあこがれをいだいている。永遠の命を望み、永久に消えることのない業績を求め、永遠の未来に夢をはせる。

自然科学にあつても、永久運動、永久機関、永久……、と多くの言葉が作られてきた。しかし、その中には科学の世界から見ても、ありうることとありえないことが混在している。本論に入る前にこのことにふれてみよう。

永久機関、これは二つのタイプのものであり、第一のタイプは、無からエネルギーを生み出す機械である。第二のタイプは、一つの温度の熱源から熱エネルギーを取り出し、いつさいの影響を他に及ぼすことなく、仕事エネルギーに変換する機械である。例えば、海の熱を利用して仕事エネルギーが作れば、エネルギー争奪の国際紛争はなくなるはずだ。しかし、このような永久機関はすべて不可能であることが、多くの失敗の結果わかった。

これに比べて、永久運動は、実在する現象だ。あなたの体の一分子を取つてこよう。その分子は原子で作られており、原子は原子核の周りを電子が回っている世界だ。この電子の運動は永久運動だ。電子の動きが止まって原子がつぶれることはない。あなたの使う磁石、紙を鉄ボードにとめたり、冷蔵庫の扉を

密閉するのに使ったりしているが、あの磁気は電子の自転運動によって生み出されている。この運動も永久運動だ。

目を宇宙に転じてみよう。小銀河の公転、太陽をめぐる惑星の運動、土星の輪の運動、地球の自転、これらは何億年、何十億年も変わることのない運動だ。

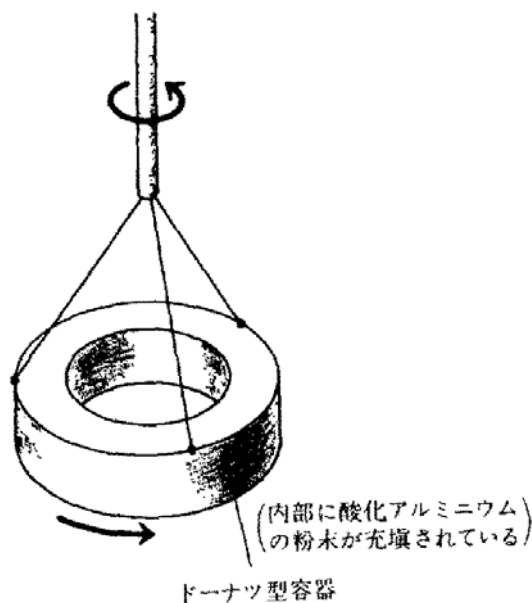
われわれの身近な世界のみが摩擦の影響を受け、動くものも時間がたつと止まってしまう。モーターを回し続けるには、電気エネルギーを供給せねばならない。われわれの身の回りのものは、絶対に摩擦の影響から逃れられないのだろうか。その例外が、超流動・超伝導^{*}の世界なのだ。

それでは、液体ヘリウムⅡを使って永久流を作ってみよう。粘性のない超流動成分を、どのようにしたら、永久流にすることができだろうか。外から力を加えられない超流動成分を回すなんて不可能だ。しかしこの不可能を可能にするうまい手がある。第11図のようなドーナツ型の容器の中に、酸化アルミニウムの非常にこまかい粉末をつめる。粉末の間のすき間は非常に狭いので、常流動成分は粉の間を動けない。このすき間に二・一七K以上の液体ヘリウムⅠをつめる。この容器を第11図のように上から下へ回転させる。ヘリウムⅠは超流動成分がないので、すべて容器といっしょに回転する。この状態を維

^{*}後に述べる「超伝導の世界」で詳しく説明するが、超伝導線の閉じたループを流れ続ける電流は永久電流になっている。今までのところ、この電流が有限な寿命で消えるという実験的証拠は見つかっていない。永久流と考えてよい。

持したままで、全体を二・一七 K 以下に冷やすと超流動成分が現れる。この超流動成分は、生成される前の常流動成分と同じ速さをもっているので、回転する超流動が得られたことになる。こうして一・三 K ぐらいまで冷やすと、ヘリウム II の大半が回転する超流動成分になる。ここでドーナツ型容器の回転を止める。すると超流動成分は、酸化アルミニウムの粉末の間を通って、元のとおり回転し続ける。一方、少し残っている常流動成分は、粉末から抵抗力を受けてすぐ止まってしまう。このようにしてから、この超流動成分の流れの速さを測定してみた。

この精密な実験は、一九七二年、カリフォルニア大学の小島、ギヨン、ルードニックによつて行われ（文献 2 参照）、毎秒六七センチ



第 11 図
液体ヘリウムの
永久流

チメートルほどの流速が十一パーセント減速するのに地球の誕生から現在までぐらいの時間がかかることがわかった。また、半分の速さになるのに10¹³年ぐらい、すなわち一兆年の一兆倍の、さらに一兆を四回掛けたぐらいの年数がかかることがわかった。まさに（永久流）といえる超流動の流れが観測されたのだ。目の前の小さなドーナツ型の容器の中を永久流が流れているのを想像するだけで楽しくなる。あんな狭い粉の間を、粘性抵抗力を受けることなく、いつまでも、いつまでも流れている。

さて、超流動ヘリウムの奇妙な現象を探す旅を終えて、その本質を探究した人々の話に移ろう。

第3章 超流動の本質

液体ヘリウムⅡの多くの現象は、超流動成分と常流動成分の二つが共存し、互いに貫き合って流れているという考えで、うまく説明できる。この描像は、ティツァとランダウによって独立に作られた。しかし、この考えに到達するまでに、多くの理論物理学者の努力が積み重ねられていた。それらのなかで、ボース、アインシュタイン、F・ロンドンらによる考えは、液体ヘリウムの理論の基礎をなしており、現在も輝き続けている。まず彼らの話から始めよう。

サイコロを振らない粒子の運命

すべての物質は、多くの粒子が集まって作られている。各粒子は複雑にぶつかり合い、次々と状態を変えていく。ミクロの世界は千変万化して姿を変えて

いくが、全体として見たとき、物質の外観は何も変わっていないように見える。液体ヘリウムの本質を知るためには、このミクロの状態がどれほど変化しうるものか、調べる必要がある。この変化は、「衝突のたびにあたかも各粒子がサイコロを振り、サイコロの目の示す状態に移り変わる」と考えたのと非常によく似ている。

そこで、われわれが粒子になったと考えてみよう。あなたと私が衝突のたびに、お互いに一回ずつサイコロを振る。そのとき出た目の数が自分の状態を表すように、その番号を書いた背番号をつけることにする。すると、あなたと私の二人だけなら $6 \times 6 = 36$ の通りの状態が出現する。三人が衝突をくり返せば、さらにその六倍の二一六通りの状態がある。人の数が増えるに従って、状態の数はネズミ算式に増えていく。

しかしそのとき、全員の何割かが「へそ曲り」の人々で、「自分はサイコロを振らないで背番号を変えず、一つの状態にいる」と言ったとしよう。すると、全体の状態の数がずっと減ってしまう。だから、こんな集団と、人数は同じだが全員がサイコロを振る集団とを比較すると、全員がサイコロを振る集団が圧倒的に多数の状態をもつ。そこで、全員が衝突をくり返し、全員がサイコロを

振っていき、いろいろな状態が出現する場合を考える。そのとき、偶然に前述の「へそ曲り」のいる集団と同じ状態になることもあるが、このようなことが起こる確率は非常に少ない。それは、「へそ曲り」の集団の総状態数が極端に少ないからである。すなわち、「へそ曲り」の状態を見ようとしても、ほとんど見られないのである。

ところが、自然の世界では驚くべきことに、この「へそ曲り」の状態が常に見える場合があるのだ。今までの話では、衝突のたびにサイコロの出た目が示すどんな状態にでも移っていける、としたが、自然界はそんなふうに無茶苦茶には変化できない。というのは、保存則があつて、衝突の前後で変わらない量があるからである。その一つが全粒子の数であり、それ以外にもエネルギーの保存則があげられる。すなわち、衝突の前後で、全粒子数や全エネルギーが同じ値になるのである。

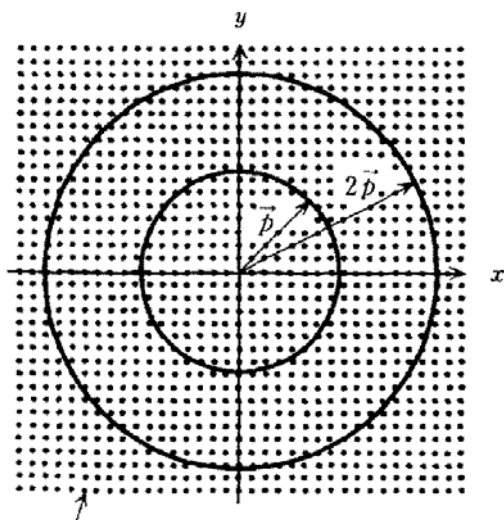
そこで、一粒子の状態を表すのに、第12図のような図を使おう。粒子の運動量を図のように点の座標で表すことにする。このとき、運動量ベクトルが $\rightarrow p$ で表される粒子があり、そのエネルギーが $\rightarrow p$ の大きさに比例しているような粒子系^{*}を考える（フォノンではそのようになっていいる）。今、一粒子当りのエネ

^{*}自由粒子系では、エネルギーは（運動量）² / （2×質量）となるが今は、エネルギー= $C|p|$ （ C は定数）という形のエネルギーをもっているとする。

第3章 超流動の本質

ルギーは、全エネルギー W を全粒子数 N で割った値 $\frac{W}{N}$ になる。いま考えている系では、エネルギーが運動量の大きさに比例しているので、運動量の平均の大きさも $\frac{W}{N}$ となる。第12図で、半径 $\frac{W}{N}$ の円周上の近くにある点が、一粒子のとりうる平均の運動量状態である。だから、今の例では、各粒子が振るサイコロは、図の半径 p の円周上のまわりの状態すべてを表すようなサイコロ、すなわちサイコロの目の数が半径 p の円周の長さに比例した数のものを使わねばならない。

ここで「へそ曲りの粒子」が全粒子の半分だけで、それらはサイコロを振らないで運動量ゼロの状態にいる場合を考える。すると、全エネルギーは同じだから、残りの半分の粒子は、一粒子当り、元の二倍のエネルギーを



第12図
運動量の状態

この一点が1つの状態に対応する

もてることになる。今、エネルギーが運動量の大きさに比例しているから、結局 $\propto \frac{1}{\lambda}$ の大きさの平均運動量をもてることになる。そこで、これらの粒子がとりうる状態は、第12図で元の半径の2倍の円周の近くの点で表される。すなわち、状態の数も元の二倍に増える。

すなわち、半分の粒子がサイコロを振らない代りに、残りの粒子の状態の数が増えるのである。このように、全状態の数は、人間のサイコロ振りゲームのように単純にはならない。そのうえ、自然の粒子は、人間のように目鼻立ちの違う人々の集りではなく、まったく同一の区別できない粒子の集りである。この非区別性は、自然の最も本質的な性質の一つであるために、状態の数の数え方も、今までのサイコロゲームの数え方ではだめなのだ。

この状態の数の数え方は長い間未知のままであったが、思いもかけないことから、インド人研究者のボース^{*}により発見される。だが、それが世界中に知られるまで、数奇な運命をたどるのである。

*1894 年インドのカルカッタに生まれる。インドの学者にとってのメッカであるイギリスへ留学しなかったため、なかなか教授になれなかったが、アインシュタインの推薦でやっと 1927～45 年ダッカ大学教授となる。

アインシュタインが救ったボース

ボースは、一定の温度の黒い物体が発生する光を研究していた。その光は、光の波長の違いによつて強度が変化する。その強度分布が、なぜプランクの公式*に従うのか、その原因を究明していた。そこで、光の状態を数えることが必要になり、いろいろな数え方をしたが、なかなか実験の強度が導出できなかった。彼は考えあぐねた結果、従来の数え方とまったく違う異常ともいえる数え方を考え出した。それを使うと、光の輻射強度をうまく説明できることがわかった。ボースは自然が内在している神秘的な状態数の数え方を発見したと思い、こおどりして物理学雑誌に投稿した。しかし、その数え方があまりにも常識を破っていたため、彼の投稿した論文は、ロイヤルサイエティで掲載を拒否され、^{*}^{*}日の目を見なかった。

その異常な数え方とは、次のようなものである。二つの粒子がサイコロを振るときの目の出方をすべて書いてみると、第13図のように三六通りがある。ここで、この二つの粒子はまったく同一であるために、第一の粒子の状態が1で

*M. プランクが、黒体輻射において、いろいろな波長の光を放射する放射エネルギーの分布を式に表したもの。振動数 ν の光に配分されるエネルギーを $h\nu$ とするとうまくいくことを示し、エネルギーが量子化されることを発見した。

**Proc. Roy. Soc. で掲載が拒絶された。この件は『波動力学形成史』(K. プルチブラム著、江沢洋訳 みすず書房) p. 149にある。

1 1	1 2	2 1
2 2	1 3	3 1
3 3	1 4	4 1
4 4	1 5	5 1
5 5	1 6	6 1
6 6	2 3	3 2
	2 4	4 2
	2 5	5 2
	2 6	6 2
	3 4	4 3
	3 5	5 3
	3 6	6 3
	4 5	5 4
	4 6	6 4
	5 6	6 5

6
通り

15
通り

第 13 図 状態の数

第二の粒子の状態が2のときも、逆に第一が2で第二が1のときも、まったく区別できず、同じ状態だと数えるのである。そうすると、第13図の三六通りの目の出方のうち三〇通りは、それぞれ同じものを二回数えていることになる。このため、ボースの数え方に従うと、全体で二二通りの状態しかないことになる。

ボースの主張することを、単なる数え方と受け取ってはいけない。粒子がぶつかり目まぐるしく変化するとき、ボースの示した状態の数に応じた確率で

各状態が出現するのだ。人間の振るサイコロでは、二回振ったとき二回とも1の目の出る確率は三十六分の一であり、これは何万回も試してみることによって実証できる。一方、自然の粒子がぶつかり合って作る状態変化は、二粒子とも1の状態にいる確率は、ボースの示したように二一分の一である。このことは、何万回もの衝突実験で確かめることができ、自然の本性に根ざしたものだ。このような性質をボースは発見したのだ。ボースの名に因んで、このような性質の粒子は（ボソン）^{*}と呼ばれている。そして、ヘリウム原子はこのボソンの一種なのだ。

さて、インドの無名の青年ボースの考えは、当時としてはあまりにも常識を逸脱していたため、イギリスでは認められず、悲嘆に暮れていた。彼は最後の望みをアインシュタインに託して、一通の手紙を書いた。そのなかで、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載せてほしいと頼んだのである。アインシュタインは一目でこの論文の重要さを見抜いた。そして、「勝手な仮定を必要としない単原子理想気体の量子論は、今日までのところまだ存在していない^{**}」と言い、この欠点がボースの新しい考えで補われると主張した。アインシュタインの努力が実を結び、ドイツの物理学雑

*このような性質をもつボソンに対して、同一状態には一粒子しか入れない粒子たちをフェルミオンと呼ぶ。

**アインシュタインの論文の冒頭に書かれている。『アインシュタイン選集 I』（共立出版）p. 127。

誌『ツァイトシュリフト』にボースの論文が公表される。そしてボースの仕事は世界中に知られ、今日の物理学の基礎を作ったのである。もしボースが手紙を書かなかつたら、また、もしアインシュタインの助力がなかったら、物理学の進歩は遅れただろうし、ボースもその煮えたぎる思いを晴らさないまま一生を終わつたであろう。

ロンドンの理論

さて、ボースの発見によつて、状態数の数え方がわかつた。この数え方を使つて液体ヘリウムを研究したのが、F・ロンドン^{*}である。彼は、ヘリウム原子どうしの間の相互作用を無視して状態数を計算していった。その結果、全エネルギーが大きいときには、すべての粒子がサイコロを振ることによつて状態数を大きくできる。しかし、全エネルギーが特定な値以下になると、一部の粒子がサイコロを振らないでゼロエネルギーを取り、その代りに他の粒子が大きなエネルギーをもち、多くの状態の中をサイコロを振つて動きまわると、状態数が圧倒的に増えることがわかつた。すなわち、一部の粒子がサイコロを振る権利

^{*}1900 年に生まれたユダヤ系の理論物理学者。1927 年化学結合論・1932 年分子理論、1935 年弟とともに超伝導のロンドン方程式を導いた。死後、フリッツ・ロンドン賞が制定されている。



F. ロンドン

彼の研究は、水素原子の共有結合をはじめとして、液体ヘリウム、超伝導、磁束の量子化など、物理学の広い分野にわたっている。その業績の偉大さに比べて、むくわれることは少なく、ユダヤ人として不運な一生を送った。オランダ王室科学協会からのローレンツ・メダルは、彼の死のわずか数か月前に与えられた。

を放棄した状態が、全状態のほとんどすべてを占めるといふ奇妙な結果が、ボースの数え方から出てきたのである。

このサイコロを振らない粒子たちが現れることを（ボース・アインシュタイン凝縮）と呼んでいる。ロンドンはこの凝縮したボソンたちが超流動の原因であると考えた。しかし、不幸なことに、ロndonは原子間の相互作用を無視したため、ボース凝縮は、最低エネルギーに当たる運動量ゼロのところにしか発生できなかった。その結果、実験でわかってきた動く超流動成分を作ることができず、ロンドンの理論は欠陥を残したままになった。そして、これを克服するためには、新しい理論の登場を待たねばならなかった。

ランダウ投獄さる

ロンドンの理論の欠陥の一部を克服したのが、（二流体理論）である。すでに述べたように、この理論はティツァとランダウにより独立に作られ、ランダウによって詳しく展開された。ランダウの液体ヘリウムとの出会いを、彼の生い立ちから始めて、追いかけてみよう。彼の伝記によると、オンネスがヘリ

* 『ランダウの生涯』（マイヤ・バサラブ著，金光不二夫訳，東京図書）。

ウムを液化した年、一九〇八年に生まれ、十四歳でバクー大学の物理・数学部に入學、十八歳で最初の論文を発表している。ランダウは二十一歳のとき海外留学を命ぜられ、ベルリン大学でアインシュタインに会い、ゲッチンゲン大学でポルンのゼミナールに参加し、コペンハーゲンではボーアのゼミナールに加わり、量子力学完成期の息づまるような討論のいぶきを呼吸したのである。留學中に（ランダウ反磁性）^{**}とのちに呼ばれる現象を理論的に解明し、ランダウの名を不滅のものにした。この時ランダウはまだ二十二歳の若さであった。

一九三一年、二十三歳でロシアに帰国、翌年、ウクライナ物理・工学研究所の理論物理学部長に任命された。この時代に初めて弟子を持ち、のちのランダウ学派の芽を育てていった。

ランダウは物理学をこよなく愛した。愛しすぎたとさえいえる。ヨーロッパへ留學中に、彼のこの感情はますます強いものとなった。相対論、量子力学など二〇世紀の物理学を創造したそうそうたる天才たちが、しのぎを削って、自然が語りかける法則を知ろうと努力していた。彼もこの天才たちの精神に感動し、自らの一生を物理にささげる決心をした。彼の真剣さが増せば増すほど、欺瞞的な物理学者への反感はつのつていった。科学の世界での出世主義者、権

***自由電子に一樣な磁場をかけると、電子は回轉運動する。このさい、量子力学的効果により、磁場と反対方向の磁化を生じることをランダウが示した。これを（ランダウ反磁性）という。古典力学では、自由電子を閉じ込めておく箱との境界での電子の振舞いを考慮すると、反磁性はでてこない。

威ぶり、その実、物理の基礎さえわかっていない馬鹿者ども、要領のいい連中（ランダウの言葉でいう害虫ども）を、彼は容赦しなかった。

レニングラード物理・工学研究所の所長ヨツフェが、厚さを薄くすると絶縁強度が増すという理論を打ち立て、多くの予算を使つてこの研究に取り組んでいた。ランダウは、こんなことは嘘で、厚さを薄くしても絶縁強度が増さないことを示した。このランダウの批判の激しさに、ヨツフェが腹を立て、彼を追いつめにかかる。さらに、ランダウは、自分の大学に、あまりにもひどい物理屋を発見し、またもや、彼の怒りが爆発する。

ハリコフ大学にNという男がおり、外国の学者の論文をまる写しして自分の論文にしていた。Nは膨大な数の論文を誇っていた。ランダウはこのNをこらしめるために、手ひどいいたずらを考へ出した。

モスクワの友人に頼んで、N宛の電報を打ってもらった。内容は、ノーベル賞選考委員会がNにノーベル賞を贈ることを決定したので、Nの論文をすべて二部ずつタイプして、ウクライナ物理・工学研究所の理論物理学部長、ランダウ教授に、四月一日までに提出するように、というものであった。

Nは大急ぎでタイプして、四月一日にその論文をランダウのところへ持ってきた。ランダウは、「あなたは、このがらくた論文に、本当のノーベル賞が与えられるかとも思っていたんですか？ エープリル・フルですよ！ 神様は悪ふざけの相手として、馬鹿ものとガチヨウをおつくりになったというのは本当だな！^{*}」Nはそれから一年もの間、ランダウに「人でなし！ 偽善者！」という電話をかけ続けたとのことである。

こんなことがあって、さらにハリコフ大学の学長とのけんかも勃発する。彼は苦境に立たされていった。彼の若さから来る未熟さが露呈していた。欺瞞的な科学者に対する怒りが暴発していた。やり場のない思いが日々募っていった。一九三七年、ついに、ハリコフ大学をくびになる。ランダウは、ハリコフにいた最愛の恋人、のちの彼の妻コーラとも別れ、一人モスクワの地へ発っていった。

彼は怒りと落胆の淵に沈んでいた。コーラへの愛と離別のさびしさから、コーラに毎日というほど手紙を書き送った。彼の心は燃え上がり、コーラとの結婚を夢見た。しかし、職もない風来坊の彼にとっては、その夢はかなえられないものであった。彼は物理に専念してこの苦しみから逃れようとした。しかし、

* 『ランダウの生涯』（東京図書）p. 51。



L. D. ランダウ

いたずら好きのちゃめっけのある人柄の半面、「学ぶことをやめると、しつぽが生え、木をよじ登るようになるぞ」と言い、弟子たちには厳格に接した。また、「人間なんて自分の幸せのためにたいしたことはしていない」と言い、逮捕・投獄という運命にもあそばれながらも、人生を愛し続けた。

ヨツフェ、N、ハリコフの学長の顔が次々と浮かび、怒りの感情を抑えることができなかった。彼はもんもんとして日々を過ごした。

そんな時、一枚の手紙が舞い込んだ。カピツァからの手紙であった。ランダウをモスクワ物理問題研究所の理論部長として雇いたいという申入れの手紙だった。彼は信じられない思いでそれを読んだ。彼に新しい人生が開けたのだ。

モスクワの研究所での生活は、一日一日がわくわくすることの連続であった。カピツァから知らされた液体ヘリウムの性質は、彼をとりこにした。液体ヘリウムがまるで彼に、「こんな不思議なことを解明できるか」と挑戦してくるように思えた。彼はカピツァの研究室を訪れ、毎日暗くなるまで液体ヘリウムの奇妙な振舞いについて語り合った。彼からは、過去の暗い思い出がすべて消え去っていった。液体ヘリウムは彼を生き返らせたのだ。そんななかで、カピツァの実験は、確実に一步一步液体ヘリウムの性質をあばき出していった。超流動の発見をはじめとして、毎日実験の工夫が積み重ねられ、新しい性質をあばき出す決定的な証拠がつかまえられていった。

ランダウは心の中で、こんな不思議な現象を理解するには、二流体を考える以外にないと思った。しかし、液体の同じ場所に、違った速度の二成分の流れ

が共存し、お互いにぶつかることなく流れることが、本当にできるのだろうか。

彼はこの疑問と格闘しながら、少しずつ理論を発展させていった。

ランダウは、月日のたつのを忘れるぐらい研究に没頭していた。物理屋ランダウにとって、それは幸福な日々であった。そんなある日、官憲が彼の研究室を訪れた。彼は何のことかわからないうちに逮捕され、尋問に応じなければならなかった。一九三八年五月末のことである。液体ヘリウムの研究も、彼のコーラへの愛も、すべてが無残に踏みにじられていった。彼はいくら追及されても身に覚えのないことであった。彼の弁明はいつさい聞き届けられなかった。彼はドイツのスパイということになり、投獄された。

彼の知らないところで運命の歯車が回っていた。彼の留学、尊敬するドイツの物理学者、すべてのことが悪用され、彼をおとしめるために使われていた。国境を越えた物理学者の尊敬の念を理解してもらうことは不可能であった。

彼は獄舎のなかで、このような事態に自分を追い込んだ人物が誰かを、考え続けた。根も葉もないざん訴、陰險な密告によってこんな目に遭わされたのだ。そんな卑劣なことをしたのは誰だ。卑劣なにせ物理屋は彼の周りにあふれていた。それが誰なのか特定することはできなかった。外部に手紙を書くことも許

されなかった。コーラへの思いはつのったが、どうすることもできなかった。彼の唯一のなぐさめは、液体ヘリウムの神秘的振舞いに心をめぐらすことであった。獄舎での生活は、彼の健康をむしばみ始めた。彼の命はこの暗い穴蔵の中で消えていくのかもしれない。

命がけの友情

ランダウの逮捕は、カピツァにとっても青天の霹靂であった。彼はランダウの物理学における卓越した能力を、誰よりもよく知っていた。ランダウがスパイでないこともわかっていた。物理学への真剣な取組みが、他人への鋭い批判となり、それをねたんだ人間のさん訴が、彼を窮地に追い込んだことはわかっていて。しかし、当時、ソ連にはスターリンが君臨していた。政治的粛正が行われ、反対派が大量に逮捕されていた。カピツァといえども、手出しがでる時代ではなかった。彼は悩んだ。彼自身のことを考えると、すべてが順調であった。彼の実験は、次々と新しい発見を生んでいた。所長としての地位にも満足していた。

しかし、ランダウがソ連の物理学の発展になくはない人物であることをカピッツァは知っていた。いや世界の物理学の進歩にとっても、かけがえない人物であることもわかっていた。どうかして、ランダウを救い出したかった。彼の親しい人々に頼んだが、問題がスパイ事件になっているので、どうすることもできなかった。月日がたつに従って、ランダウの有罪を取り消させることの難しさがわかってきた。

その間にも、ランダウは意気消沈し、日に日に弱っていった。ランダウはもとと体の弱い体質であった。獄舎での生活は彼にこたえた。希望のない日々がもう一年近くも続いていた。彼は病いがちになり、体力の限界に近づいていた。それからまたひと月が経過した。

カピッツァは、ランダウの獄舎での体調を知ることができた。彼の体はもうもたない限界にきていた。瀕死の状態にあった。もう一刻の猶予も許されなかった。カピッツァは意を決した。彼を釈放するには、スターリンに直訴する以外になかった。カピッツァは、自分の職も、命も、すべてを賭けた。ひよつとしたらもうこの太陽の光を見、新鮮な空気を吸うことが、二度とないかもしれない。そう思いながら、クレムリンに乗り込んでいった。

カピッツァは、スターリンに、ランダウの罪はまったくいわれのないざん訴によったものであり、ランダウはスパイではないことを訴えた。ランダウは瀕死の状態なので、すぐ釈放してほしい。もし釈放されないのなら、自分は研究所を辞めると談判した。この訴えは聞き届けられた。

ランダウは、死の淵から釈放された。ランダウはこの時のことを、カピッツァの古稀を祝う論文のなかに書いている。そして、カピッツァに、終生変わらぬ感謝の気持ちをこめて「当時、このような行動に出るには、どれほどの勇氣と深い人間愛、透徹した誠実さが必要であったかは、あらためて言う必要はないでしょう」と書いた。彼の命は、カピッツァによって再度与えられたのだ。彼はその恩返しをこめて、カピッツァの実験の分析に集中した。これが二流体理論として花開き、一九六二年にランダウが、一九七八年にカピッツァが、それぞれノーベル賞を受賞するのである。

ランダウ学派の誕生

釈放されたランダウは、この世の人とは思えない顔をしていた。すべての力

*このランダウの話は、1964年7月8日付『コムソ
モルスカヤ・ブラウダ』紙に載ったもの。

が失せ、身も心も消えいるばかりであつた。彼はハリコフのコーラに電話をかけた。コーラは職場に休暇届を出して、モスクワに飛んできた。ランダウが回復するのに、ずいぶん時間がかかった。しかし、彼は少しづつ力をとりもどし、液体ヘリウムの研究にもどつていった。彼の才能はもとの輝きをとりもどし、二流体理論をさらに発展させ始めた。

彼の才能は、研究だけにとどまらなかつた。彼は本物の物理学を教えたいと思つた。彼の最も軽蔑するにせ物理屋を作らないためには、物理学の確実な基礎教育を行わねばならないと思つた。彼が弟子をとるときは、この基準はさらに厳格なものになつた。『理論ミニマム』、弟子たちが最低限マスターしなければならぬ基準。理論ミニマムの試験に合格したものだけが、ランダウのゼミナールに出席することを許された。

彼のこの厳格さは、一つの信念からきていた。というのは、理論物理学を一生の仕事にするのは、非常に苦しいことを、身にしてみ感じていたからであつた。自然のかいま見せる性質から、その本性を知るために、苦勞して新しい考えを生み出し、できたとなんに、それを冷酷に分析し、欠点をあばき出し、欠点があれば勇氣をもつてそれを捨て去り、それでもなお落胆することなく、ひ

とすじの光明を見出すために、努力せねばならないことを知っていた。そのとき、基礎能力がもしも欠如していたら、真実を明らかにすることを放棄し、やがては出世主義に毒され、にせ物理屋になっていくことは、火を見るより明らかなことであった。このような悲劇を作るよりは、若い間に適性を正しく判断し、その人に合った幸福への道を選ばせることが、教師としての務めであるとランダウは考えていた。誰でも『理論ミナム』を勉強できるよう親切に指導したが、その試験は一人に三度しか機会を与えなかった。三度不合格になった学生は、ランダウのゼミナールには一生参加できなかった。

一九三三年から一九六一年までの間に、理論ミナムに四三人が合格した。彼らはソ連全土から集まった人々であった。この物理の基礎を完全に理解した四三人とランダウが、ランダウ学派を作ったのだ。

ランダウのゼミナールは、すさまじいものであった。学派内外の人々が異口同音に述べているように、^{*}理解力に長けた者だけの学舎であった。最も力のある者だけが生き残れたという。研究報告は徹底的に分析され、論争が起こり、中途半端には終わらなかった。誤謬は容赦なく攻撃され、たたきつぶされ、報告者は黒板のところから引きずり降ろされた。ランダウがまちがった場合も例

*日本物理学会誌第 42 巻 (p. 610) にジャロシンスキーの講演の訳があり、ゼミナールの様子がいきいきと描かれている。

外ではなかった。^{*}この残酷ともいえるゼミナールの進め方は、三〇年以上の間変わることはなかった。ゼミナールでの主人公は人間ではなくて、みんなが知りたいと願っている真理が支配者であった。結論が明解でないときは、議論は真夜中まで及び、電話で続けられることもしばしばであった。翌日ふたたび研究会が招集され、明瞭な報告が行われた。

このような徹底的な議論によつて、本当の理解に到達するという規範が、ランダウ学派を支え、学派の人々の血のかよった信頼を生み出していった。そして、学派のメンバーの人数はそれほど多数ではなかったが、彼らは血のにじむような努力を重ね、独創的な研究を生み出し、世界の物理学に多大な貢献をもたらし、ソ連の理論物理学の牽引力となった。

一九六二年一月七日、ランダウは友人といつしよにドウブナの弟子のところへ自動車で出掛けていった。友人の運転していた彼の車はバスを追い越そうとして凍った路面ですべり、対向車のトラックと衝突した。ランダウは一か月半もの間、意識がなかった。ランダウの惨事を知った世界中の多くの物理学者が、薬を集めたり、医師を送ったりして協力した。奇跡的にランダウは命びろいをした。その年の十一月にノーベル賞が彼に与えられた。彼はそのほかに数々の

^{*}ランダウ自身さえも、「くだらぬ」とヤジを飛ばされることがあった、とマイヤ・ベサラブは述べている。『ランダウの生涯』(p. 93)。

賞を受けた。事故の後遺症に悩まされながらも、親しい友人や弟子たちにかこまれ、人の温かさを充分に味わっていた。事故から六年目、一九六八年四月一日、ランダウは「私は幸せだった。すべて順調だった」との言葉を残して、帰らぬ人となった。ランダウの死後、今もおランダウ学派は生き残り、物理学へのたゆみない寄与を続けている。

着物を着たボソンの世界

ランダウが液体ヘリウムを研究し、彼独自の理論を展開したときに、彼は一つの大事な概念を作った。それは、液体ヘリウムの中に、ヘリウム原子の疎密波が生じ、一種の励起モードができるという考えだ。そして、彼はそのモードのエネルギーと運動量の関係を予言した。この関係を実験的に求める方法がファインマン^{*}によって提案され、中性子散乱の実験からランダウの予言が正しいことが見つけられた。

その後、多くの理論家が、このモードをヘリウム原子の相互作用から説明しようとした。日本でも、この方面のいい仕事がなされている。例えば、励

*文献3) 参照。

起スペクトルの詳しい計算が、砂川、山崎、癸武川氏らによってなされ、二つの素励起が束縛状態を作ること*を考慮した計算が、岩本氏によってなされている。

このような地道な努力と理論の展開がなされたにもかかわらず、液体ヘリウムⅡの基本性質である二流体がなぜ出現するのかを説明することはできなかった。

ロンドン理論ではヘリウム原子間に相互作用がないため、ボース凝縮は、粒子の運動量がゼロの所に起こり、実験的に見つかった自由な速度をもつ超流動成分を説明できない。一方、ランダウ理論では、超流動成分は背景流として仮定されており、それをヘリウム原子の相互作用から導き出すことができない。しかもランダウ理論では、液体ヘリウムⅠとⅡとの間の転移も説明できないのだ。このように、肝心なところが未解決のままだった。

これを克服するために、新しい理論が考え出された。*ここでは、（相互作用の着物を着た粒子）という概念が登場する。液体ヘリウム中では、ヘリウム原子が動く、その周りの原子もひきずられて動く。この周りの原子をひきずることを、相互作用の着物を着ると呼ぶことにする。すると、液体ヘリウム中では、

*文献4) 参照。

**文献5) 参照。

***著者が、1987年第18回低温国際会議で発表したものの。文献6)を参照。

ヘリウム原子が相互作用の着物を着て動きまわっているのである。

このような着物を着た粒子の状態を数えてみよう。この粒子はボソンの性質をもつので、その状態数はボースが数えたやり方で数えることができる。また、この粒子数も、全ヘリウム原子の総数に等しい。以前に述べた場合と違うのは、エネルギーだけである。相互作用の着物を着た粒子どうしのエネルギーが存在している点が異なっている。

このエネルギーは次のような性質をもっている。まずこの性質を見るために、一方の着物を着た粒子の運動量から、他方の着物を着た粒子の運動量を引いてみる。すると、その差の絶対値に比例したエネルギーが、新しく現れてくるのである。このエネルギーは二つの運動量が同じだとゼロになるが、運動量が違うとその差の絶対値は正值なので、相互作用の着物を着た粒子間のエネルギーは正になる。

だから、着物を着た粒子が、サイコロを振らないで、同じ運動量をもっていると、粒子間のエネルギーは最小値ゼロになる。すなわち、全エネルギーを残りの他の粒子に利用させることができるのだ。このため、残りの着物を着た粒子がサイコロを振るとき、一粒子当りに利用できるエネルギーが増え、その分

だけ状態の数が増える。結局、一部の粒子がサイコロを振らないことによって生じた状態の減少が補われ、このような状態が全状態中に占める確率がほぼ一〇〇パーセントになる。だから、サイコロを振らない粒子たちがいる出現確率が圧倒的に大きくなり、それが実験で見つかるようになるのだ。

さきに紹介したロンドンの理論と違うところは、サイコロを振らない粒子の運動量はゼロとは限らず、お互いの値が同じでありさえすればどんな値でもよいという点である。着物を着た粒子がゼロ以外の同一の運動量に凝集できるところを表している。

人間の社会なら、このサイコロを振らない人々は、たいがい踏みにじられ、稀にしか報われないかもしれない。しかし、自然はじつに情け深い扱いをしている。このサイコロを振らない着物を着た粒子たちこそ、超流動成分なのだ。彼らは同一の運動量をもち、しかもその値がゼロでないため、歩調をそろえて粘性なしに、どんな小さな穴でもぐぐり抜け、素焼きの陶器さえも通り抜けて出てくる。出てきた粒子は同じ運動量をもっているのだ、ランダムな粒子間運動がなく、それらだけを集めることができ、そして他からの熱の供給もなければ、理想極限では絶対零度になる。素焼きの入れ物にヘリウムⅡを入れて

漉すだけで、出てきた液体が冷え、中に残った液体が熱くなるのも、すべてサイコロを振らない粒子の為せるわざである。このように、同一運動量に凝集した部分が超流動成分、サイコロを振っているいろいろな運動量に分布する・着物を着た粒子たちが常流動成分なのだ。おまけにこの理論では、超流動成分の速度と常流動成分の速度は同じでなくてもよく、初期条件によって自由に選べることがわかる。しかもサイコロを振らない粒子たちの粘性がゼロなことも導出でき、まさに超流動と常流動の二流体が説明できるのだ。

次に液体ヘリウムの温度が上がって、全エネルギーが非常に大きくなった場合を考える。このときは、たとえサイコロを振らない粒子が同一の運動量を取り、他の着物を着たボソンのエネルギーを増やしたとしても、もともと全エネルギーが充分大きいので、この寄与による状態数の増加は、サイコロを振らないことによる減少を補えない。すなわち、サイコロを振らない粒子たちのいる状態が全状態中に占める確率は、ほぼゼロパーセントとなってしまう。それは、超流動現象がなくなることの意味する。結局、温度の高いときは、サイコロを振らない粒子のボース凝縮は起こらず、超流動成分はなくなってしまうのだ。このように、新理論によると、温度が高いと常流動成分だけのヘリウムIにな

り、温度が低くなると着物を着た粒子がボース凝縮し、二流体を作ることが自然に導けるのだ。

ロンドンの理論の欠陥も、ランダウの理論の仮定も、克服されている。相互作用の着物を着たボソンという概念は、ロンドンの理論を父として、ランダウの理論を母として生まれ、今、力強く育ちつつある。この新しい考えは、次のような新現象を説明するのにも、不可欠なのだ。それでは、その現象をのぞいてみよう。

三重屈折するビーム

液体ヘリウムの世界には、この世のものとは思えない現象がごろごろしている。その一つに、液体ヘリウムの中にある相互作用の着物を着たボソンが、着物を脱いで、真空中へ飛び出してくるという現象がある。これを説明する前に、まずよく知られている光の屈折を、光が粒子（光子と呼ぶ）だとして説明し直してみよう。

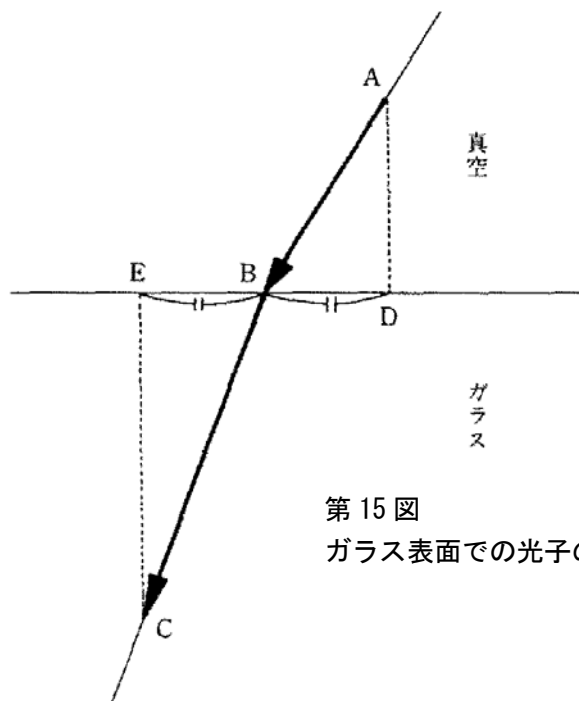
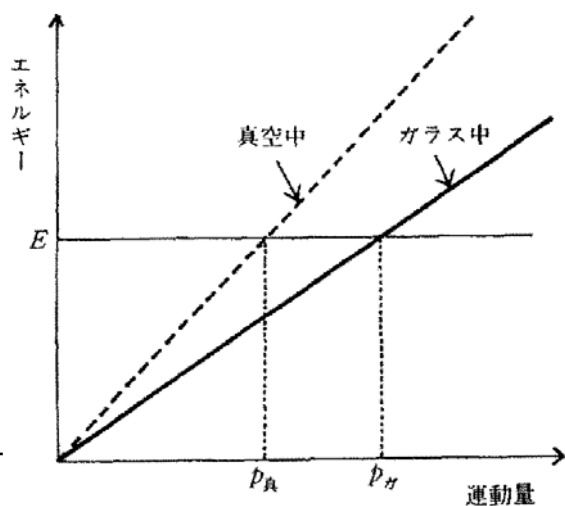
一つ一つの光子はエネルギーと運動量をもっており、そのエネルギーは運動

量に比例している。その比例係数が光の速さである。これを図で見ると、第14図のように横軸に運動量、縦軸にエネルギーをとれば、真空中の光子は点線で表される関係を持ち、その傾きが真空中の光速を表す。一方、ガラス中に光子が入ると、速度が屈折率分の一に落ちるために、第14図の実線のように、グラフの傾きが小さくなる。

次に、第15図に示すように、光子が真空中をAからBへ走ってきて、ガラス表面Bでガラスの中へ突入する場合を考えよう。この光子のエネルギーを E とすると、真空中での光子の運動量は、第14図より $P_{真}$ となる。この光子がガラス中に入るとき、エネルギーが保存するから、ガラス中での運動量は第14図からわかるように $P_{ガ}$ となる。ガラスの屈折率を一・五とすると、このガラス中の運動量 $P_{ガ}$ は、真空中の運動量 $P_{真}$ の一・五倍になる。これを第15図に図示すると、真空中の運動量ベクトルが矢印AB、ガラス中が矢印BCで表され、BCの長さはABの一・五倍となっている。

ここで、光子がガラス表面から突入するとき、表面に垂直な力しか受けないので、光子の運動量の表面に平行な成分が保存する。すなわち、AおよびCより、表面に下した垂線の足をそれぞれD、Eとすると、DBとBEの長さが同

第 14 図
光子のエネルギー



第 15 図
ガラス表面での光子の屈折

第3章 超流動の本質

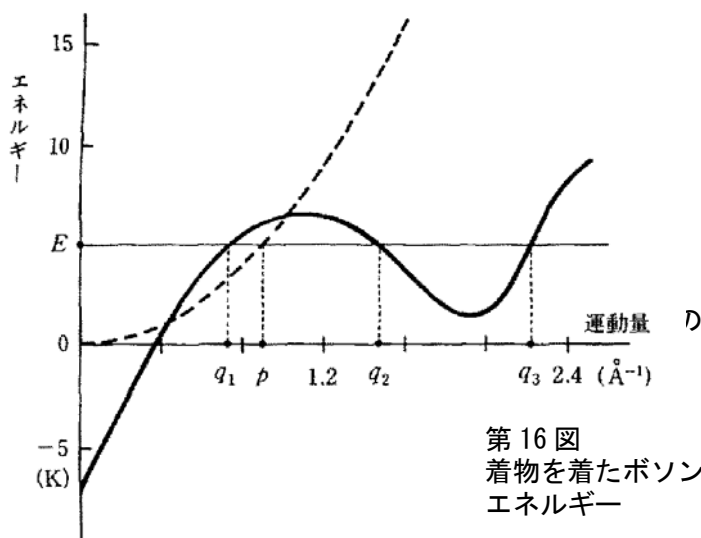
じになるのである。

前述のように、BCがABの一・五倍あるため、光子はガラス中では、表面から遠ざかる方向へ屈折する。これが粒子像で見た屈折の法則の説明である。

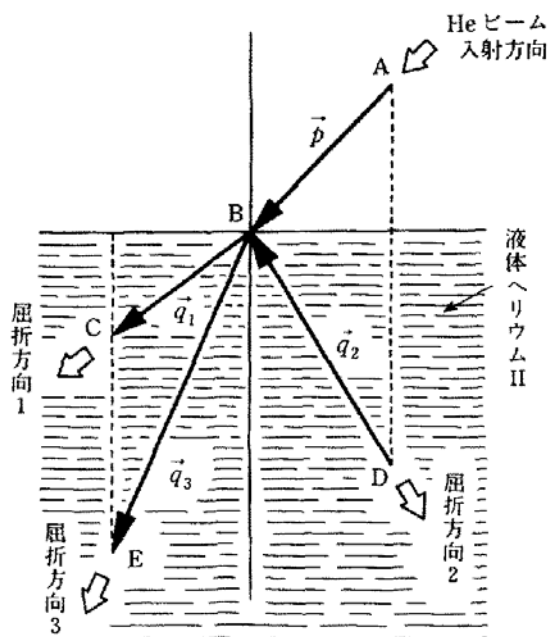
さて、ヘリウム原子が、真空中から液体ヘリウム表面にぶつかった時にはどうなるだろうか。ヘリウム原子は、液体ヘリウム中に突入すると、まわりの原子をひきずり始め、相互作用の着物を着ることになる。そして、結局、相互作用の着物を着たボソンに変身するのである。このとき、エネルギーは保存している。それを定量的に見るために第16図にヘリウム原子のエネルギーを点線で、着物を着たボソンのエネルギーを実線で示してみる。すると入射エネルギーがEのときは、これと同じエネルギーをもつボソンは、 $q_1 \cdot q_2 \cdot q_3$ の三種の運動量が考えられる(脚注 *参照)。すなわち、飛び込んできたヘリウム原子が、三種類の相互作用の着物のうちどれか一つの着物を着て、液体ヘリウム中を走っていくのだ。おのおの場合の屈折角は、光子のときと同様に、第17図のように決めることができる。AからBへ入射したヘリウム原子は、CまたはDまたはEのいずれかの方向へ飛んで行くのである。

一原子の入射では、C、D、Eのうちどれか一つの方向へ飛び去るが、次々

*第16図で、着物を着た粒子がゼロ運動量で、マイナスのエネルギーを持つ理由は、次の通りである。気体に比べて、液体の凝集エネルギーがマイナスであり、着物を着た粒子一個あたりに、そのマイナスのエネルギーが付加するためである。



第 16 図
着物を着たボソンの
エネルギー



第 17 回
液体ヘリウム表面で
三重屈折する
ヘリウムビーム

とヘリウム原子を入射させると、この入射粒子線は三種の着物を着たボソンとなって、 $BC \cdot BD \cdot BE$ の三本の粒子線に分かれる。すなわち、一本の粒子線が三本の屈折線に分かれ、三重屈折するのだ。これが見えれば、じつに楽しい光景であろう。

光では複屈折という現象があるが、それは元の光に振動面の違う二種の光があったからで、一方の振動面の光には一本の屈折線しか生じない。ところが、液体ヘリウムIIの世界はこれとは異なり、同種のヘリウム原子が、三つのタイプの違った相互作用の着物を着る場合があり、それぞれに応じて三本の粒子線となって屈折するのだ。

さてこの現象の逆過程を（量子蒸発過程）と呼んでいる。すなわち、液体ヘリウム中の相互作用の着物を着たボソンが、着物を脱いで、真空中へ、ヘリウム原子として飛び出してくる現象である。この現象は、一九八四年から一九八七年にかけて、イギリスのウィヤット^{*}により発見された。彼は、液体ヘリウム中の着物を着た粒子が、熱運動している粒子にぶつかって運動方向を変えてしまうのを避けるため、温度を $0 \cdot 1\text{K}$ 以下にした。熱運動している粒子が少ないので、着物を着た粒子が長く走れるようになり、量子蒸発過程での屈折を詳

*文献 7) 参照。

しく観測することに成功した。一方、三重屈折のほうはまだ実験されていない。この実験もいつの日にかやられるであろう。

今まで小走りに液体ヘリウムの世界を見てきたが、まだまだ神秘的な現象が隠されているにちがいない。これから、その一つ一つのベールがはがされ、その過程で研究者の悲劇・喜劇のドラマが、幾重にも展開されていくことだろう。第Ⅱ部では、極低温のもうひとつの驚異の世界、超伝導を見てみよう。

II 超伝導の世界

II Science world of superconductivity

第1章 永久電流の誕生

今日、私たちは、一〇〇年前の時代にはどうも考えられないような豊かな生活を享受している。それを支えているのは、高度な科学技術である。とりわけ電気の作り出した技術は、めざましい進歩をもたらした。相対性原理の発見を最後にして、電気磁気の基礎的性質はすべて明らかになった。その後、その基礎の上に花開いた応用技術が現代社会を支えていると言っても過言ではない。

これと同じことが、いま起ころうとしている。超伝導の世界がそれだ。高温超伝導^{*}の発見によつて、超伝導の世界は基礎研究の時代から応用研究の時代へ大転換をとげたのだ。今後おそらく五〇年もたたない間に、超伝導は生活のすみずみに影響を与え、私たちに夢と豊かさを運んでくれるだろう。

その理由は超伝導の世界が、じつに多様な現象を秘めているからである。超伝導状態では電気抵抗がなくなることは、よく知られている。それ以外に、想像もできないほど正確に磁場を測ったり、体の内部を調べたり、地球の内部の

^{*}1986年1月、ベドノルツ・ミュラーによつて発見され、1987年1月、チューらにより、同じ系列の物質で、液体窒素温度で超伝導になるものが見つかった。これらについては、第5章で説明する。

変化をとらえたりできる。また、コンピュータ素子をはじめとして、磁場でコントロールできる熱スイッチや、磁気浮上による摩擦ゼロの交通システムまで、その夢は尽きない。

第Ⅱ部では、このような種々の現象を紹介し、その本質をさぐり出した人々のドラマを語ることにしよう。

オンネスの発見

話を二〇世紀の初頭にもどそう。一九〇八年、ヘリウムの液化に成功したオンネスは、液体ヘリウムを使って種々の物質の性質を調べ始めた。極低温での実験は、彼の青年時代からの夢であった。五十五歳になった今、それが実現するのだ。液体ヘリウムで物質を極低温に冷やすと、物質中の粒子の熱運動による乱雑な動きが減り、物質はその驚異の本性をきつと見せてくれる、とオンネスは信じていた。しかし、一部の研究者は、オンネスの考え方に冷淡であった。彼らは、極低温ではすべての分子原子が動きを止めてしまい、凍りついた、何も起こらない世界が現れるだけだと考えていた。しかし、オンネスはそのよう

な批判を意に介せず、何十年も温めてきた目標どおりに、極低温での物質の性質をこつこつと調べ始めた。固体酸素や酸素・窒素の混合液の常磁性を調べ、キュリー・ワイスの法則^{*}からずれることを見つけた。そのかわり、彼は多くの研究者をライデンに招き、種々の実験をしてもらった。世界で最初の国際的な共同利用研究所が誕生したのだ。

さらに彼は、液体ヘリウムで冷やすと、金属の電気抵抗がどのように温度変化するかに興味をもった。というのは、当時、極低温ではすべての運動が止まってしまい、伝導電子の動きも止まり、電気が伝わらなくなるといふ意見があったからだ。実際に調べてみると、白金、金に対する抵抗値は、温度が冷えるとともにどんどん小さくなる。それで、伝導電子が動けなくなるといふ考えはまったく誤りであることがわかった。彼の実験で絶対零度に近づけても、ほんの少し抵抗が残るのは、不純物が原因だとオンネスは考えた。純粋な金属なら絶対零度で抵抗が0になるはずだ。彼はこの考えを確かめてみたいと思った。金より純度の良い金属は、当時は水銀だけであつた。そこで、彼は水銀の電気抵抗を測ろうとした。

彼はもう五十八歳、研究所所長でもあり、ヘリウムの液化で念願の夢も果た

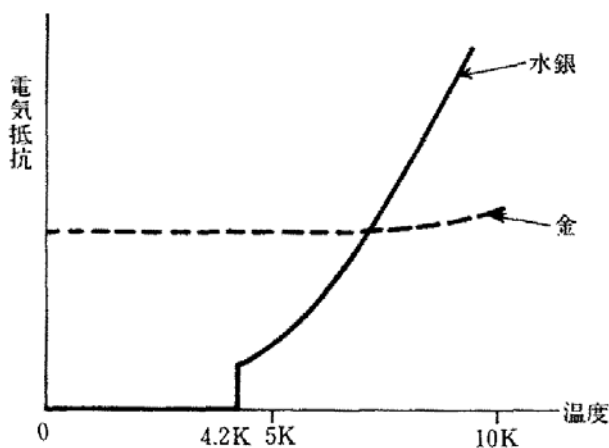
^{*} 強磁性体、反強磁性体の物質が、磁気相転移を起こすとき、転移温度以上で、磁化率 χ が $\chi = c / (T - \Theta)$ となることをいう。 c 、 Θ は定数で、 T は絶対温度を表す。

していた。だから、世間の人から見れば、引退の準備をしてもよい状況だった。しかし彼は実験をやめなかった。

実験に必要な装置は彼の育てた技術者が作ってくれたが、実験の発想と実験は自分の手で行った。水銀の抵抗を測るために、内径〇・〇五ミリの細長いガラス管を折りたたむように曲げ、液体ヘリウムの入った狭いデュアービンの中に入れられるようにした。そのガラス管の中に水銀を満たし、電気抵抗を測定するための細長い水銀線を作った。温度を冷やすと水銀が凝固し、体積が急激に収縮するため、水銀線が切れてしまう。失敗を重ねるうちに、ガラス管を鉛直方向に置きそれが上と下でそれぞれ曲げられ次々つながっているようにし、上の折曲げ部分に水銀溜めを作った。そして、ガラス管ごと下から冷やすことによって、下部の水銀が凝固し、収縮した分だけ上の水銀溜めから水銀が補給されるようにした。それでも水銀を凝固させるときに切れたり、融解させるときにガラス管が割れたりした。何度もやり直しては、やっと細長い固体の水銀線を作ることになった。

いよいよ液体ヘリウムの温度で水銀の電気抵抗が測れるのだ。彼の考えどおりに、不純物が少ないだけ電気抵抗が少ないだろうか。抵抗計をつなぎ、抵抗

値を読みとる。初め一〇Kぐらいの温度のときは、金に比べてずっと電気抵抗が大きい。彼の予想はずれたのだろうか。液体ヘリウムでどんどん冷やしていくうちに、彼は自分の眼を疑った。針が0をさしているのだ。まだ温度を絶対零度に近づけていないのに、抵抗の測定値が0になっている。何か装置に故障が起きたのだ。おそらく抵抗の両端がショートしたのだ。彼はヒーターで温度を上げてみた。すると不思議なことに抵抗計の針がふれてぐんぐん抵抗値が増えていくのだ。ヒーターを切ってまた冷やしてみる。約四・二Kで突然、水銀の電気抵抗がゼロになるのだ。彼はこれが本当なのか、何かの誤りなのか決しかねていた。五十八歳になるまでこんな奇妙なものを見たことはなかった。少年の



第1図 水銀と金の電気抵抗

日に感じたような心の高ぶりにひたりながら、落ち着け落ち着けと自分に言い聞かせていた。

彼の実験は何度も何度も行われた。その結果は、第1図のように四・二Kで突然電気抵抗が0になるのだ。所内の多くの人々にも見てもらった。とんでもないことが起こっているのだ。その原因はわからないが、自然の神秘的姿がそこにあるのだ。彼はこの現象を（超伝導）と名づけた。そして続けて種々の金属の電気抵抗を測定してみた。錫と鉛が同様な性質を示すことがわかった。彼は一生でいちばんすばらしい日々を過ごしていた。天からの贈り物を、あきることなく眺めている少年の心境で。

永久電流を作ろう

オネスは、超伝導線でコイルを作り、その両端をショートして閉じたコイルに仕上げた。一九一四年四月に、彼はこの閉じたコイルの中に電流を永久に流し続けることに成功した。二か月間電流を流し続けた後に、コイルを超伝導の転移温度以上に温めると、瞬時にその電流が消えることを確かめた。^{*} われわ

れも彼の実験にならって、紙上実験してみよう。

第2図のように、超伝導線をコイルに巻き、両端A Bを図のごとく超伝導線でショートしておく。さらに、線A Bの周りに常伝導のヒーター線を巻きつけておく。これらの装置全体を液体ヘリウムの中に入れ、超伝導状態にしておく。

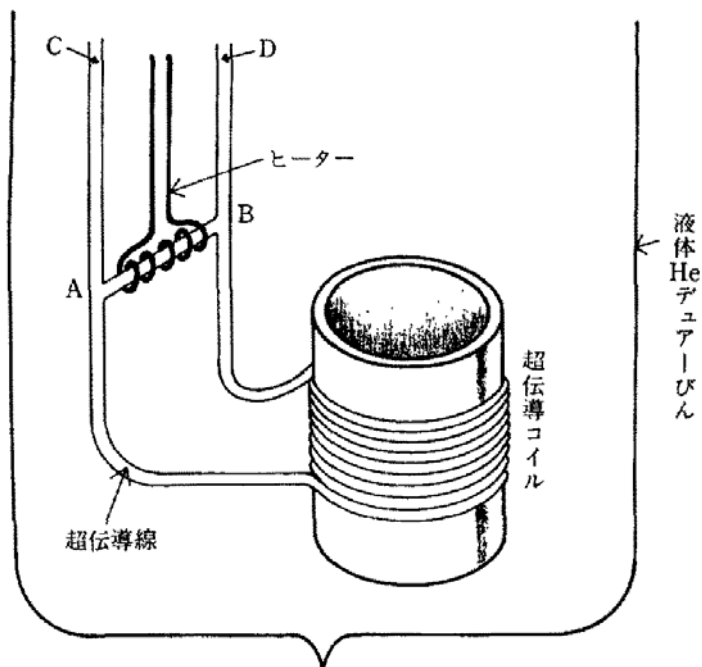
いよいよ、永久電流を作ってみよう。図のヒーターに電流を流して、A B間の超伝導線を熱し、この部分の超伝導状態をこわす。^{*}^{*}これがじつにうまい工夫なのだ。こうしておいて外部からC Dに電流を流し込む。すると、A B間に抵抗が発生しているために、電流は抵抗のない超伝導状態のコイルのほうへ迂回していく。この状態で、ヒーターの電流を切る。するとA B間の線が徐々に冷え、元の超伝導状態になる。すなわち、コイル全体が超伝導状態の閉じたループになったのだ。

さあ、外部からC Dに流していた電流を切ってみよう。見かけは何も起こっていないように見える。コイルの状態を調べるために、デュアーびんの底から磁石を近づけてみる。近づけた磁石は強い力でデュアーびんの底にある超伝導コイルのほうへひきつけられる。超伝導コイルは確かに磁石になっているのだ。

* 『ノーベル賞講演・物理学2』（中村誠太郎・小沼通二編，講談社）p. 165 に書かれている。のちに、アメリカのコリンズは2年半電流を流し続け、電流がまったく減衰しないことを確認している。

** 超伝導物質は、その固有の温度（臨界温度）以上になると、超伝導でなくなり、電気抵抗が発生する。

第1章 永久電流の誕生



第2図 永久電流の実験

コイルの中を電流が流れ続けていることがわかる。われわれの目の前に永久電流が出現しているのだ。目前に永久電流を見ているのに、なんとなく信じられないような気がする。再度、ヒーターの電源を入れ、AB部分を熱し超伝導をこわしてみる。すると、デュアーびんの底から近づけた磁石には、もう何の反応も現れない。それは永久電流が消滅したことを示している。

オンネスは、オランダで作った永久電流をデュアーびんごとドイツ、フランス、イギリスへと持ち歩き、多くの人々に本当に電流が流れ続けていることを見せたのである。電源なしに流れ続ける永久電流が、海を越えたのだ。彼は電気抵抗ゼロの世界の真価をあざやかに示したのである。

超伝導磁石誕生の秘話

オンネスは、超伝導を発見して以来、将来の科学技術がどうなるかを夢見るのがとても楽しみであった。その一つは超伝導空心コイルに永久電流を流し、強磁場を発生させることであった。強力な超伝導磁石を作ることが彼の晩年の夢となった。磁場の強さを表すのにガウスという単位がある。地磁気の強さは

*『ノーベル賞講演・物理学 11』（講談社）p. 188 にオンネスが永久電流を流した超伝導コイルを、ライテンからケンブリッジまで運んだことが書かれている。

およそ〇・三〇・五ガウス、鉄ボードに紙をとめる磁石の表面の磁場が八〇ガウスぐらいである。オンネスは一〇万ガウス以上もの強力な磁場を発生できる超伝導磁石を夢見ていた。当時、重さ数トンの鉄心のある巨大な電磁石でさえ数万ガウスも発生できなかった。もし彼の夢がかなえられれば、その磁石が手で持ち運べるほどの軽さになってしまう。彼はすぐそのような磁石を作れると思って日夜実験を継続していた。しかし、思わぬ困難が立ちはだかった。水銀も鉛も錫も、磁場が少し強くなると、超伝導がこわれてしまうのだ。超伝導のままでいられる限界の磁場の大きさを臨界磁場という。この臨界磁場が、オンネスの見つけた超伝導物質ではすべて一〇〇〇ガウス以下であった。彼は必死で臨界磁場の大きな超伝導物質を探したが、目標の物質は見つからなかった。超伝導磁石の夢は遠のいていった。

一九三〇年代の初め頃、超伝導性をもった種々の合金が発見された。鉛とビスマスの合金は、^{*}臨界磁場が二万ガウス（二・〇テスラ）であった。オンネスの夢からはほど遠かったが、重い鉄心のある電磁石よりずっと軽い超伝導磁石が実現し、実用に供せられてもよかった。オンネスのあとを継いだライデン研究所の新所長のケーソムは、この合金に弱い電流を流すと、その超伝導性がこ

*ライデン低温研究所のド・ハースらが発見した。

われてしまうことを知って、実用に耐えうる超伝導磁石はできないと結論してしまっただ。^{*} 結局、強力な超伝導磁石の実現は、一九六〇年代まで待たねばならなかった。

一九五八年、ベル研究所のクンツラーらがニオブと錫の合金が非常に高い臨界磁場をもつことを発見し、続いて一九六一年にはその物質を線状にすることも成功した。それ以来、本格的な超伝導磁石の時代が到来したのだ。今では一七万ガウス（一七テスラ）の超伝導磁石はありふれたものとなり、オンネスの夢が実現している。一七万ガウスという強力な磁場の世界は、われわれの日常扱う磁石とは桁違いの強さなのである。紙を押さえるマグネットの二〇〇倍以上の磁場なのだ。磁石どうしの反発力・吸引力も想像を絶するくらい強力である。もし室温超伝導ができ、数万ガウスの超伝導磁石が手軽に使えるようになれば、電気製品の性能は一変するだろう。

^{*}実際はこの合金は、1.5Kで1.5Tの磁場中でも、 $3000\text{A}/\text{cm}^2$ の電流を流しうることがあとでわかった。恒藤敏彦、『自然』（中央公論社）1964年1月号，p. 58。

第2章 多様な性質を示す超伝導

華々しいオんネスの発見で幕開けた超伝導の世界も、その後二〇年、四〇年、六〇年と地道な研究が続けられ、さまざまな超伝導の性質が発見されてきた。それらを眺めると、自然はなんと奥深いものかとあらためて驚かされる。このような研究は、自然を知りたいという人々の純粋な要求から生まれたものであった。しかし、その結果わかった超伝導の多様な性質は、その応用を考えるとき、とても大切なのだ。

その多様さゆえに、広大な応用の分野が開かれ、室温超伝導ができれば、思いもよらないところに使われていくだろう。このさまざまな超伝導の性質を見る旅に、みなさんといっしょに出発しよう。

はじき出される磁気

オネスの発見以来二二年も経た一九三三年に、超伝導のもう一つの特長が明らかにされた。 $W \cdot \text{マيسナー}$ と $R \cdot \text{オクセンフェルト}$ は、磁場の中で超伝導体の温度を変えて、^{*}常伝導にしたり超伝導にしたりしていた。超伝導体が、高温で常伝導になっているときは、磁場がその中を貫いている。それが低温になって超伝導状態に移行すると、磁場がはじき出されるのだ。超伝導物体の表面に超伝導電流が流れて、内部にある磁場をちょうど打ち消すように電流が分布するのだ。

この現象は、当時の人々が考えていた超伝導のイメージとは非常に異なるものであった。というのは、超伝導とは電気抵抗がゼロになるだけのことだと思われる。だから高温にして常伝導状態でその物体に磁場を通しておくと、たとえ低温にして超伝導状態に変化しても、磁場を通したままだと信じられていた。他方、磁場がない状態で超伝導になった物体に、^{**}外部から磁場をかけた場合を考える。よく知られているファラデーの電磁誘導の法則^{**}によって、磁場

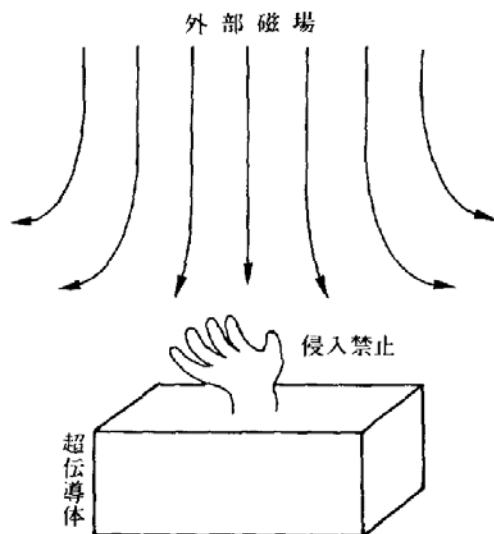
^{*}第5図のように、一定磁場のもとで温度を変えると、ある温度以上では常伝導、その温度以下では超伝導になることがわかる。

^{**}閉じた導線を貫く磁束が変化するとき、その変化を妨げる方向に起電力が生じることで、1831年、M. ファラデーによって発見された。

第2章 多様な性質を示す超伝導

変化を妨げる方向に電流が流れる。そのとき、電気抵抗がゼロであるために、磁場変化を完全に妨げるまで電流が流れることができ、物体内の磁場を元どおりに保ち、結局、外部からかけた磁場は物体内に侵入できない。これと同じ原因で最初から磁場が侵入した状態で、常伝導から超伝導に移行した場合も、磁場変化が妨げられ、磁場が超伝導体に侵入したままだと思われていた。それがマ이스ナーらの実験で否定されたのである。このことは当時としては非常に驚くべきことであつた。超伝導の本質にかかわるこの現象は、(マイスナー効果)と呼ばれている。

この性質は、実用的見地から見てもとても大切である。もし室温超伝導体ができれば、それを部屋の周囲全体に張りつけることにより、内部を完全に磁場がない状態にできるのだ。地磁気も、種々

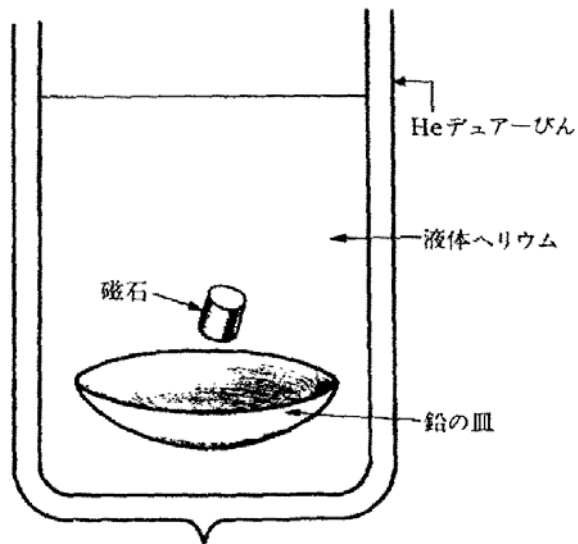


第3図
マイスナー効果

の電波の作る磁気も、内部に入ってこない。こんな部屋は、現在では何億円もかかる高価なものだ。金属を張って電場をシールドすることはやさしいが、磁場はシールドしにくい。それで磁気シールドをするのに多額の経費がかかってしまうからである。それが室温超伝導さえ実現すれば、容易に作ることができるのだ。今では、医学に、工学に、磁場のない空間での精密な測定がますます欠かせないものになりつつある。だから、マイスナー効果によって、超伝導体が磁場をはじき出すことは実用上からも都合なのだ。

浮き上がる磁石

マイスナー効果を劇的に示す実験がある。第4図のように、鉛で作った皿を液体ヘリウムの中に



第4図
浮かぶ磁石

つける。そこへ磁石を入れると磁石は回転しおどりまわるが、決して鉛の皿の上へは落ちないで浮かんでいる。浮力で浮いているのではない。磁石の密度は、液体ヘリウムに比べてはるかに大きいため浮力では浮かべない。磁石が鉛に近づくと、超伝導の鉛はマイスナー効果によって磁場をはじき出すため、磁石が反発されて鉛に近づくことができず、鉛から遠ざかると、反発力が小さくなり重力がまさって落ちてくる。このように鉛の皿の上空で、磁石がおどりまわるのだ。室温超伝導ができれば、浮かぶ磁石のおもちゃは、さぞ子供たちを楽しませるだろう。この性質は超伝導の本性にかかわるもので、その理論的説明は、マイスナー効果の発見後、数十年にわたって研究され続けたのである。

ロンドン兄弟の苦心

理論物理学者にとって、マイスナー効果は格好の研究テーマであった。このパズルを解くために多くの研究者が挑戦した。しかし、電気抵抗がゼロであるという性質だけでは、磁場をはじき出す完全反磁性^{*}は、どうしても説明できなかった。それで多くの人々は、現象論的な取扱いではマイスナー効果は出てこ

^{*}物質に磁場をかけたとき、磁場と反対に磁化する性質を反磁性という。ファラデーによって発見された。この反磁場が最大になって、物質内部に磁場を侵入させないとき、これを完全反磁性という。

ないと考え始めた。この問題に再挑戦したのがロンドン兄弟である。

兄の名はフリッツ、弟はハインツといい、ユダヤ系の理論物理学者であった。フリッツは一九〇〇年の生れで、一九二七年、ハイトラーとともに、ハイトラー・ロンドンの理論を提起し、一躍有名になった。その理論は水素原子が結合して分子になる機構を、量子力学を使って明らかにしたものであった。一九三三年、ドイツにナチ政権が成立し、ユダヤ人迫害の魔の手がロンドン兄弟をおびやかし始めた。二人はドイツを逃れ、イギリスへ、フランスへ、アメリカへと命がけの亡命生活を余儀なくされた。第二次世界大戦が近づく暗黒の日々。亡命先を転々と変える兄弟。彼ら二人の唯一のなぐさめは、自然の神秘的振舞いに思いをはせることであった。そして、超伝導の本性にせまりたいという願いだけは、いつもみずみずしく彼らの心を満たしていた。

ロンドン兄弟は、古典電磁気学と電気抵抗ゼロの性質に何か基本的な条件を加えることにより、マクスナー効果が出てこないか分析し直してみた。そうするうちに彼らは、説明不可能な奇妙な式に到達したのだ。この式は（ロンドン方程式）と呼ばれる式で、この式を仮定すると、じつにうまく、超伝導体内部に磁場が侵入できないことが説明できたのである。ただし、彼らの式の解によ

れば、超伝導体表面のごく薄い層を、外部磁場の侵入を防ぐために、超伝導電流が流れることになる。この層の厚さはおよそ 0.1 マイクロンで、この層の中へは、外部から磁場が侵入してくることが、ロンドン方程式によって導き出された。数年後ロンドン兄弟の予言どおりに、磁場の侵入する薄い層が実験によって見つけれられ、彼らの考えが当たっていることがわかった。

しかし、ロンドン方程式がどんな根拠から出てくるのかは、不明なままであった。この基礎を与えたのが、ギンツブルク・ランダウである。彼らは驚くほど大胆な考えを導入した。それは超伝導を生み出す電子の波は、お互いに波の位相がそろっていて、膨大な数の電子の波が、一つの超伝導の波として表されるという考えだ。おまけに、このマクロな波は、量子力学に従うというのだ。量子力学は、ミクロな粒子の運動を記述するものと考えられていた。だから、このマクロな波の従う運動方程式には、とても大きな飛躍が含まれているのだ。この方程式は、ギンツブルク・ランダウ方程式（GL方程式）と呼ばれている。そして驚いたことに、この式を仮定すると、超伝導電流と、電場および磁場との関係が求まり、それがロンドン方程式になっているのだ。この結果、マイスナー効果はGL方程式から出てくることがわかった。さらにその後、GL方

程式はゴリコフにより研究され、BCS理論^{*}を基礎として導出された。しかし、今日でもなお、このマクロな波の本質について、多くの見解と論争が残されている。^{**}

電波で鳴り出す超伝導測定器

超伝導状態と常伝導状態の境界にいる物質は、ほんのちよつとした温度変化や磁場変化で、大きな電気抵抗の変化を生じる。これを利用して、D・H・アンドリウスは、非常に感度のよい赤外線検出器を作り上げた。彼は窒化ニオブの超伝導線を転移温度直下の温度に保っておき、その線に一定電流を流し、その両端電圧を測定する装置を作った。外部からこの窒化ニオブの線に赤外線が当たらないときは、転移温度直下なので、超伝導状態になっており、両端電圧は0である。そこへ非常に微弱な赤外線を当てると、温度が上昇し転移温度以上になり、電気抵抗が生じる。電流が流れているので窒化ニオブの両端には電圧が発生し、これを測定していると、どんな微弱な赤外線も検出できるのである。

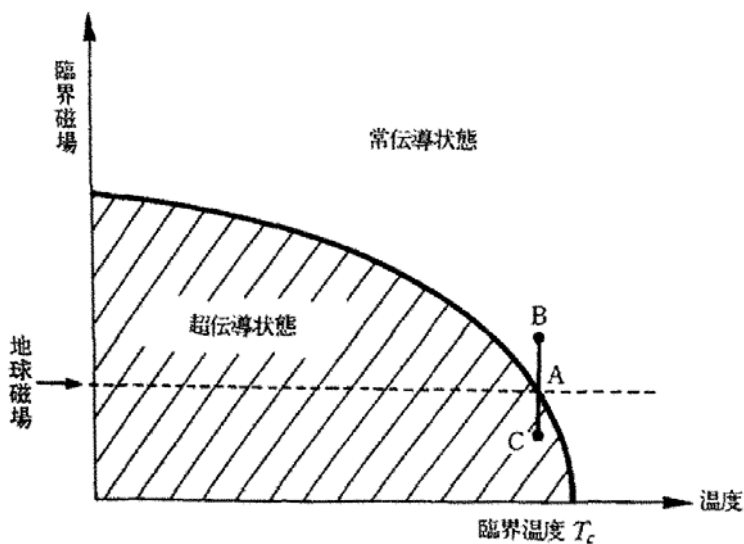
* バーディーン、クーパー、シュリーファーによって作られた理論で、次の章で紹介する。

** この波に関しては、BCS理論での電子対が凝縮したものだという解釈や、また、古典場だという考え方も出されている。後者については、文献8)を参照。

第2章 多様な性質を示す超伝導

彼はこの装置の感度を上げるために、何段にも組み合わせた装置を開発し、実験を続けていた。ある日、彼がきわめて微妙な状態に装置を調節していると、突然、測定器が音楽を奏で始めたのだ。初めは、隣の部屋でラジオが鳴っているのだと思った。あまりにかすかなものなのでそう思ったのだが、よく点検してみると、驚くなかれ、彼の測定装置から出ているのだ。近くの放送局の電波を装置がひろって、信じられないくらいに大幅に増幅し、検波整流も行い、その結果、赤外線検知用の出力端子に音楽の信号が流れ出したのだ。

この理由は、間もなくわかった。第5図に転移点近くでの臨界磁場を図示する。この図は、何百倍にも拡大したものと考えてほしい。そこで、アンドリウスの装置の調整がうまく



第5図 臨界磁場の温度変化

いったため、偶然、窒化ニオブの超伝導線が図のA点のような状態に置かれたのである。すると、放送局の電波の作る磁場が、地球磁場と同方向のときは、合わさって全磁場が臨界磁場を超えるので電気抵抗が生じ、窒化ニオブ線の両端に電圧が発生する。一方、放送局の電波の作る磁場が地球磁場と反対方向のときは、図のC点のように全磁場が小さくなる。すると、磁場の強さが臨界磁場以下になるため、窒化ニオブ線は超伝導状態になり、出力の両端電圧はゼロとなる。すなわち、電波が作る磁場変化が整流され、大幅に増幅され、音楽を奏でたのだ。偶然とはいえ、超伝導の威力をまざまざと見せつけた発見であつた。

この装置はさらに微弱なものをとらえるように改良され、 α 線が超伝導線にぶつかり、熱を発生するのさえ検知できるようになった。 α 線の検出装置がそれだ。このように、超伝導を利用した装置が、今までの測定の概念を変えようとしている。

熱スイッチの秘密

第2章 多様な性質を示す超伝導

超伝導体は種々のおもしろい熱的性質をもっている。その一つに、超伝導状態は熱を非常に伝えにくい、常伝導状態は熱を伝えやすいという性質がある。例えば、温度1 Kの鉛の超伝導状態は、常伝導状態に比べて、熱伝導度が約五〇分の一になり、 0.1 K では約五〇〇〇分の一になる。(超伝導で熱が伝わりにくくなることを多くの人が理解していない。超流動と混同して、超伝導では熱が伝わりやすくなるという誤った記事が多数存在する)。これを利用して、熱を伝えたり遮断したりする熱スイッチができるのだ。第6図のように、AとBの二物体の間に熱スイッチに当たる細い鉛の線を張る。この線の周りに制御用のニオブ・チタンで作った超伝導コイルを置く。このコイルに電流を流すと鉛の臨界磁場以上の磁場が発生し、鉛の細い線は常伝導状態になってしまう。それで鉛は熱を伝えやすくなり、熱スイッチ・オンの状態になる。制御用コイルの電流を切ると、磁場がなくなり、鉛は超伝導状態にもどり熱を伝えにくくなる。すなわち、熱スイッチ・オフの状態になるのだ。

これを使って、一ミリケルビン(0.001 K)以下の極低温を得る装置ができる。第6図をもう一度見てもらおう。まず、Bの部分は銅でできている。この銅に強力な磁場をかけるために、それを取りまくように超伝導線でコイル

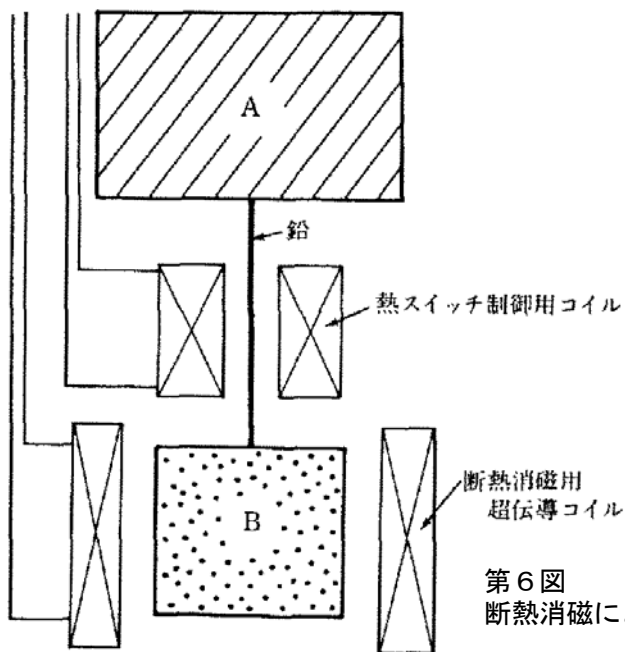
*実験物理学講座 15『低温』(共立出版) p. 84 参照

(超伝導時の熱伝導係数) / (常伝導時の熱伝導係数) $= A T^{-2}$

なる関係がある(T は絶対温度, A は定数)。この式から低温ほど超伝導による熱遮断の効果が大きいことがわかる。

*この逸話は、『
(講談社) p. 7

を作っておく。このコイルのことを断熱消磁用コイルと呼び、これに電流を流す。すると、銅Bには強力な磁場がかかり、銅の原子核のスピンをそろえるようになる。もともと、熱運動のためにこの核のスピンはランダムな方向を向いているが、これを磁場で無理やりそろえてやるため、熱が発生するのだ。そこで、第6図の熱スイッチ制御用コイルに電流を流し、熱スイッチをオンにする。銅Bの熱は鉛の細線を通じて、一定温度に保たれたAへ逃げていく。充分熱が逃げるのを待って、熱スイッチ制御用コイルの電流を切る。すると、銅Bは熱的にAから切り離される。ここでBの周りの断熱消磁用のコイルの電流を、徐々に減らしていく。それ



第6図
断熱消磁による冷却

につれて、銅にかかっていた磁場が減るため、そろえられていた銅のスピンの方
向がばらばらになり始める。スピンがばらばらになる（エントロピーが増える）
には熱エネルギーが必要なので、銅自身から熱エネルギーを食う。結局、銅
全体の温度が元より下がることになる。今、熱スイッチがオフなので、外部か
らの熱の流入がきわめて少なく、第6図のBの部分の温度が下がったままに保
たれるのである。

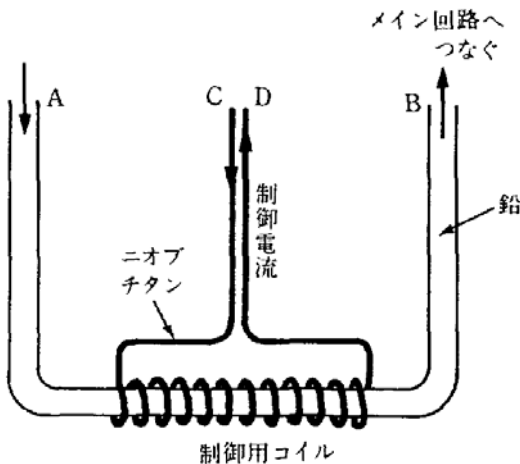
一九五五年、クルチと彼の協力者たちは、このような先覚的な実験を行い、
低温が得られることを示した。これは、熱を断つたうえで磁場を消していくの
で、（断熱消磁）と呼ばれている。この技術はどんどん改良され、一ミリケルビ
ン（ 0.001 K ）以下の極低温を得るのに使われている。

電気をロスしない無接点スイッチ

鉛の臨界磁場が小さく、ニオブ・チタンの臨界磁場が大きいという性質を利
用して、おもしろいスイッチが作れる。第7図のように、鉛の線にニオブ・チ

タンの線を巻いたものを、液体ヘリウムにつけて超伝導状態にする。こんな簡単な装置で無接点スイッチができるのだ。

鉛の線にメイン回路をつなぎ、ニオブ・チタンに制御用電流を流す。制御用電流が流れていないときは、鉛は超伝導なので、メイン回路は抵抗ゼロでつながっている。小さな制御用電流をニオブ・チタンの巻線に流すと、メイン回路をつないでいる鉛の周りに磁場が発生する。この磁場が鉛の小さな臨界磁場を超えると、鉛は常伝導状態になる。すると、鉛に電気抵抗が生じ、メイン回路の電流を抑制できるのだ。すなわちこれは一種の無接点スイッチである。このとき、ニオブ・チタンの制御線は臨界磁場が大きいので、超伝導のままなので、制御側の抵抗はゼロであり、制御に要する電力が非常に少なくてすむ。この回路のスイッチング作用は非常に高速なので、高周波発振や、大電流のコントロールにも使える。



第7図 無接点スイッチ

この素子はクライオトロンと呼ばれている。これは、スイッチだけでなく、電気信号の増幅にも使える。そのためには、あらかじめ第7図のメイン回路に一定電流を流した状態にしておき、その鉛の線の超伝導がちょうど破れるぐらいに制御電流を流す。すると、鉛の線に少し抵抗が発生し、第7図のA B間に電圧が生じる。そこで、制御用コイルに、増幅させたい微小電流を追加すると、その電流により磁場がさらに増え、鉛の線の超伝導状態の破れが増し、電気抵抗が増加する。一定電流をA B間に流しているため、A B間の電圧も増加する。この電圧変化は非常に敏感なので、微小なC D間への入力電流の変化が増幅されて、A B間に大きな電圧変化を生じる。すなわち信号の増幅ができるのだ。このようにクライオトロンはいろいろな利用法があり、クライオ・エレクトロニクスという分野が作られるぐらいに広大である。しかし、半導体の「E」のように微小素子化できないため、利用をはばまれ、あとで述べる超伝導を使ったジョセフソン素子にとって代わられている。しかし、大きな電流を扱うコントロール素子としてはまだまだ有望であり、高温超伝導の出現を機に見直されるかもしれない。

正確無比のヒューズ

超伝導体には、臨界磁場のほかに、（臨界電流）という限界が存在する。すなわち、超伝導線に電流を流すとき、抵抗0で、いくらでも流すことができるのではなく、一定の限界値が存在するのだ。これは、超伝導線を流れる電流が一定の限界値を超すと、その電流のつくる磁場が臨界磁場を超えてしまうために起こる。だから線の形状やその配置によっても発生する磁場が変わるために臨界電流の値は変化する。逆にこれを利用して遮断電流の正確なヒューズを作ることが可能だ。例えば鉛の線をコイル状に巻いただけでよい。そしてコイルの単位長さ当りの巻数を調整する。すると、電流により発生する磁場の強さはこの単位長さ当りの巻数に比例するので、特定の電流値で臨界磁場になるようにコイルを作ることができる。このコイルを超伝導状態に冷やし、ヒューズとしてつなげばよい。線の中を流れる電流が限界値になるまでは、コイルの電気抵抗は0で、それを超えると突然抵抗が発生し、電流の遮断効果が現れる。この

* 充分長いコイルで、端の影響を無視できるものをソレノイドコイルといい、その中の磁場は、電流と単位長さ当りの巻数の積で与えられる。

限界電流値はコイルの巻数を調整して自由に選ぶことができるので、電流のコントロールをきめこまかく行うことができる。われわれが使っている通常のヒューズとは比べものにならない正確なヒューズが作れるのだ。

第二種超伝導の発見

今までに発見された超伝導物質の種類は、膨大な数にのぼっている。まず、純粋な物質、すなわち各種の元素が、常伝導か超伝導かを見てみると、第8図のように、たくさんの超伝導物質が見つかっている。それは図中でスクリーンをかけた、二八もの元素である。このように超伝導は、低温ではかなり一般的な現象なのだ。そのうえ、一九三〇年頃から種々の合金が超伝導になることがわかり、超伝導物質の数は膨大な数になった。

それにもかかわらず、一九五〇年頃までは強い超伝導磁石が作れなかった。というのは、それまで発見された超伝導物質は臨界磁場がなかなか大きくならないため、強い磁場を作れなかったからである。一九五七年、ソ連の物理学者アブリコソフは、今までの超伝導と異なった性質の超伝導物質があるだろうと

*『超電導入門』（A. C. ローズ・インネス, E. H. ロディック著, 産業図書）
p. 181.

指摘^{*}し、論文に発表した。それは磁場の一部が超伝導物質の中に侵入しても、

[illegible]

第8図 超伝導になる元素 (スクリーンをかけた部分)

超伝導が破壊されないような物質である。そんなうまいことが可能なのだろうか。調べてみると確かにそのような物質があったのだ。一九五八年、ベル研究所のクンツラーらが、ニオブと錫の合金が非常に高い臨界磁場をもつことを見つけて以来、続々とこのようなタイプの超伝導が発見されていった。このタイプの超伝導を（第二種の超伝導）という。

この第二種超伝導体は、弱い磁場では第一種と同様、完全に磁場をはじき出す。^{*}この限界値を下部臨界磁場という。下部臨界磁場以上の磁場がかかると、物質内部に磁束が入り込む。ところが、第一種超伝導体とは違って、それでも超伝導状態がこわれない。それからほとんど磁場を強くしていつても超伝導のまま、上部臨界磁場の値を超える磁場がかつてはじめて、常伝導になるのだ。この上部臨界磁場は下部臨界磁場に比べて、数十～数百倍も大きい。いくつかの第二種超伝導物質に対して、その上部臨界磁場を第1表に示す。この値を見ると、第一種超伝導体の臨界磁場に比べて、桁違いに大きいことがわかる。このおかげで、非常に強力な超伝導磁石が作れるようになったのである。オランダの夢見た一〇万ガウス（一〇テスラ）以上の超伝導磁石が、現在では容易に入手できるようになった。

^{*}水銀、鉛、錫など、従来からあった超伝導物質で、純粋なものは、マイスナー効果で磁場を完全にはじき出す。第一種超伝導体でも、不純物があると、そこを通過して磁場の一部が侵入する場合もある。しかし第二種超伝導体では、不純物のない均一な材料のときも、その本性から磁場が侵入し、しかも超伝導状態を維持できる。

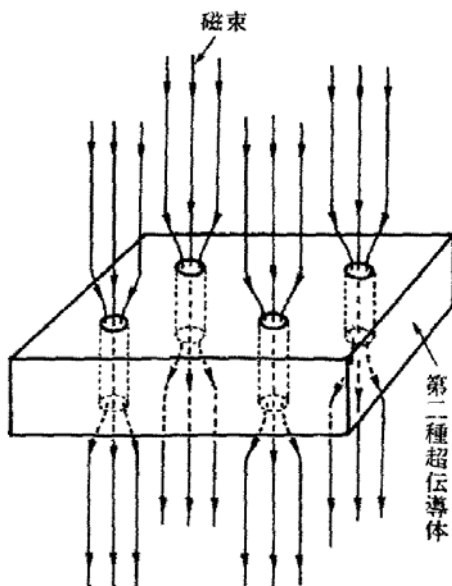
第2章 多様な性質を示す超伝導

第1表 第二種超伝導体の上部臨界磁場

(日本物理学会編『超伝導』(丸善) p. 264 より)

物質名	転移温度 [K]	上部臨界磁場 [T] 4.2K での値
Nb-Ti	10.7	17
Nb ₃ Sn	18.3	22
Nb ₃ Al	18.9	32
Nb ₃ Ge	23.2	
Nb ₃ (Al, Ge)	20.5	41
PbMo ₆ S ₈	13.7	60
第一種超伝導	転移温度	臨界磁場
Pb	7.2	0.06

第9図
第二種超伝導体への
磁束の侵入の様子



それにしても、なぜ磁束が侵入しても超伝導がこわれないのだろうか。この秘密は、第二種超伝導体の表面から侵入する磁束の様子を、電子顕微鏡で観察することによって明らかにされた。第9図のように、磁束は小さな束になって侵入し、つき抜けていく。この磁束の貫いているところは、超伝導が破れて常伝導になっているのだ。しかし、磁束の通らない部分が超伝導を維持しているので、全体的に見ると、磁場が侵入しても超伝導がこわれないように見えているのだ。この磁束の局部的侵入のおかげで、上部臨界磁場が飛躍的に大きくなり、強力な超伝導磁石が作れるようになったのである。

さらに研究が進むと、この貫いている磁束の大きさに大変おもしろいことが見つかった。すなわち磁束の大きさが 2.07×10^{-4} ユース cm² の整数倍になるのだ。なぜ大きさが連続的に変化できないのだろうか。これは量子効果がきいているために起こるのである。この量子効果は、まだ紹介していない超伝導の多くの性質を生み出すが、そのことはあとの章で詳しく述べよう。

第3章 超伝導の本質

バーディーンの執念

電子が抵抗なしに流れるという事実はわかったが、なぜそうなるのかは謎に包まれていた。これを解明することは、理論物理の課題のなかでも最も難解なものの一つであった。あの量子力学を作り上げたことで有名なボーアもハイゼンベルクも、この問題に取り組み失敗していた^{*}。

一九四〇年頃、三十二歳の若き研究者バーディーンは、この謎を解明しようと努力していた。彼は当時のことを回想して、「ロンドンの考えに強く影響された。その要となるアイデアは、微小な格子の変位によって起こるフェルミ面^{**}の小さなエネルギーギャップだった。しかし、この私の最初の試みは実を結ば

^{*} 『ノーベル賞講演・物理学 11』（講談社）p. 191。

^{**} 電子はフェルミオンなので、一つの量子状態には一つの電子しか入れない。そこで絶対零度では、金属中の自由電子の状態を運動量空間で表すと、最低エネルギー状態から順につまっていき、一定の等エネルギー面までつまる。この面のことをフェルミ面という。

なかった」と語っている。しかし、彼は、この謎を秘めた超伝導の本質を、何とかして知りたいと思った。この願望は、彼の心の奥深くに刻み込まれていた。だが、運命は、彼の願いを遠ざけてしまう。第二次世界大戦が勃発したのだ。

バーデーンは、数年にわたり、戦時研究に従事した。そして、戦後はベル電話会社の研究グループに加わった。超伝導の研究からは遠ざかってしまったが、そこで思いもよらない幸運が待ち受けていたのだ。一九四七年の終り頃、プラタンとショックレーとともに、彼はトランジスタ効果を見つけることができたのである。

当時、彼は、このすばらしい発明が世界を変える源になるとは思いもしなかった。一九五〇年初めには、トランジスタはまだ雑音が多く、真空管を置き換えられるものとは思われていなかった。それが、今日では、ほとんどすべての電子機器がトランジスタに置き換えられ、それを何十万個も組み込んだLSIが現代社会を支えているのだ。バーデーンは、トランジスタの発明に魅せられてはいたが、自分の研究をトランジスタのみにしぼらなかった。彼は青年時代の夢をもう一度追ってみたかった。

第3章 超伝導の本質

一九五〇年の春、ラトガース大学のレイノルズとセリン、そして独立に、アメリカ合衆国規格標準局のE・マクスウェルが、超伝導体のアイソトープ効果を発見した。すなわち、超伝導物質を作っている元素を同位元素^{*}で置き換えると、超伝導になる温度が変化することがわかったのだ。

この同位元素への置換えが、電子にどんな影響を及ぼすかを考えてみよう。同位元素による置換えは、原子核の電荷量を変えないので、電子に働く力は変化がないはずである。電子の個数も変わらないから、電子どうしの力も変わらない。それなのに、実験結果の示す超伝導物質の転移温度の変化は、何を意味するのであろうか。考えられることはただ一つ。同位元素に換えられると、その原子の質量が変化する。すると、格子の上にある原子が振動するとき、質量変化によりその振動状態が変わるだろう。同位元素への置換えで考えられる変化はこれだけしかない。だから、この格子振動の変化が超伝導になる温度に影響を与えていると思えない。すなわち、格子振動と電子の相互作用が、超伝導を生み出す原因となっているはずである。

セリンは、自分が超伝導の本質を解き明かすキーポイントを見つけたと思った。そのときこの本質を説明できる理論屋として、友人のバーディーンが心に

*原子核中の中性子の数の違うものを同位元素という。原子の化学的性質は、原子核をまわっている電子の性質で決まる。同位元素は陽子の数が同じなので、電子の数も電子の受ける力も同じになり、その化学的性質は変わらない。

浮かんた。セリンが電話をしたのは、五月初めのことであった。この実験結果を聞いたバーディー^{*}ンは、とても興奮した。一〇年も前に挫折したアイデアが、昨日のこのように浮かんできた。彼は、超伝導の研究を再開する決心をかためた。

彼と同様に、超伝導現象に魅せられ、その本性に最も近づいていた人がいた。それはフレイリツヒであった。彼はすでに電子が格子振動と相互作用することに気づき、その時、エネルギーがどのようにに変化するかを分析していた。彼の考えでは、当然この自己エネルギーは、原子を同位元素で置き換えると変化する。すなわち、セリンらのアイソトープ効果の発見は、彼の考えを支持しているのだ。フレイリツヒは、とても嬉しかった。自分が超伝導の秘密を解き明かすのに、最短距離にいることを感じていた。しかし、まだ超伝導電流の流れる理由はわからなかった。彼はこの研究に没頭した。世界の本当に頭の切れるすごい連中の視線が、超伝導の解明に注がれていた。息づまるような競争が開始されたのだ。

この競争は、スポーツの世界のように目に見えるものではない。新しく提案されたアイデアは徹底的に分析され、その欠陥はあばきだされ、新しい発想が

* ジョン・バーディーンは、1908年5月23日アメリカ・ウィスコンシン州に生まれた。1951年、ベル電話研究所から、イリノイ州立大学の電気工学および物理学教授に転身した。そこでは、応用研究だけでなく、超伝導理論のような基礎研究も自由に行える立場であった。

第3章 超伝導の本質

つけ加えられる。この競争の途中で各種のアイデアは、論文として世界中の人々に公表されることもあれば、公表されないこともある。とりわけ天才的研究者の多くは、他人のアイデアをちよつと見ただけで、即座にその欠陥を見通すことがよくある。そのとき、彼らは、ノートにそれを少し書きとめたり、それさえもしないことが多い。だから、世界中の最新の論文を克明に見ていても、見つけることのできない火花の散るような競争が隠されているのだ。

バーディーンは、フレイリッヒの考えを徹底的に分析するとともに、自分のエネルギーギャップの考えを加えて理論を改良しようとした。しかし、超伝導への相転移を説明することができず、一年また一年と時がたつていった。フレイリッヒも困難に直面していた。アイソトープ効果の発見からもう五年がたっていた。二人とも考えが空まわりし始めていた。何かまったく新しい考えを導入しなければならぬところへきていた。バーディーンは、超伝導理論の現状を総括し、『ハンドブック・デル・フィジク』*に載せるよう頼まれていた。彼はそれを書き上げたが、本腰を入れて考え直さねばならないと思った。

*超伝導理論のレビューは、1955年に書かれた。『ノーベル賞講演・物理学 11』（講談社）p. 239。

三人の出会い

バーディーンは、超伝導理論を作り上げるために、若い研究者の協力が必要だと感じ始めた。彼はすでに四十七歳であった。二〇世紀初頭の天才たちが活躍した年齢は、二十代の世代が多い。遅々として進展しない理論を考えているとき、ふと年齢のことが心をよぎる。彼の能力は円熟し、決してまだ衰えてはいない。超伝導理論がエネルギーギャップを含むべきだという彼の考えも、誤っていない自信がある。それなのに、超伝導という謎は、自然の仕組んだ難解きわまる問題で、難攻不落のように思えてしまう。ぜひ、新しい要素、新しい雰囲気が必要だと痛感し始めた。

彼は、優秀な若い理論物理屋を探した。白羽の矢を立てたのが、プリンストン高級研究所で、C・N・ヤン^{*}と研究していたレオン・クーパーであった。クーパーは、当時、二十五歳の有能な研究者であった。バーディーンは迅速に行動を起こした。一九五五年の秋、クーパーを呼び寄せ、バーディーンの指導していた大学院学生である二十四歳のシュリーファーを加えて、三人で超伝導解明

^{*}C. N. ヤンは、1922 年中国生れ。渡米してシカゴ大学でフェルミに学ぶ。1957 年、リーとともに、パリティの非保存の発見でノーベル物理学賞受賞。

の研究を始めた。バーディーンは、自分が一五年間追いつめてきた正しい超伝導理論が満たさねばならない条件を、若い二人に話して聞かせた。常伝導から超伝導に変化する相転移が説明できないといけない。エネルギーギャップが現れないとだめだ。．．．。彼は口ぐせのように、若い二人にその指針をくり返した。

それで、クーパー^{*}とシュリーファアは、エネルギーギャップを作るために、エネルギーができるだけ下がる機構を分析した。くる日もくる日も、エネルギーを下げる方法を考へては失敗し、それでもくじけることはなかった。若い二人の毎日は充実していた。失敗をくり返すうちに、クーパーは一つの奇妙なことに気がついた。引力の相互作用で結ばれる二個の電子が、いつも全体のエネルギーを下げるのに寄与していることを見つけたのだ。すなわち、二個もある多数の電子のうち二個ずつ組になった電子対が、全エネルギーを引き下げるのに寄与しているのだ。この考えは、一九五六年、論文として発表された。

しかし、このような電子対がなぜ超伝導状態への相転移に寄与するのかは、まったくわからなかった。シュリーファアは、先輩の考えを相転移に結びつけようと奮闘し始めた。有力なアイデアの浮かばないまま、考えられることは手

*L.N. クーパーは1930年2月28日ニューヨーク市生れ。1954年博士号をコロンビア大学で取得。1954～55年プリンストン高級研究所所員となる。

当り次第に計算を実行してみた。どれもうまくいかなかった。一九五六年も残り少なくなっていた。彼は、先生のバーディーンや先輩のクーパーのように、自分の独創性を発揮したいと願いつづけていた。しかし、いくら考えてもうまい答が見つからず、焦燥感だけが強まっていた。

はがされるボール

年があけ、シュリーファー^{*}は、一人ニューヨークに来ていた。クーパーの電子対のエネルギーを少しでも下げて安定なものにしたかった。二個の電子のおのの運動量がどんな値のときに、クーパーの示したエネルギーの下がる機構が最も有効に働くかを調べていた。二電子の運動量の和が大きな値になるような電子対の数は、限られていることに気がついた。運動量の和が0になるような電子対を考えると、電子対の数が最大になること、そのためエネルギーの下がりも最大になることがわかった。

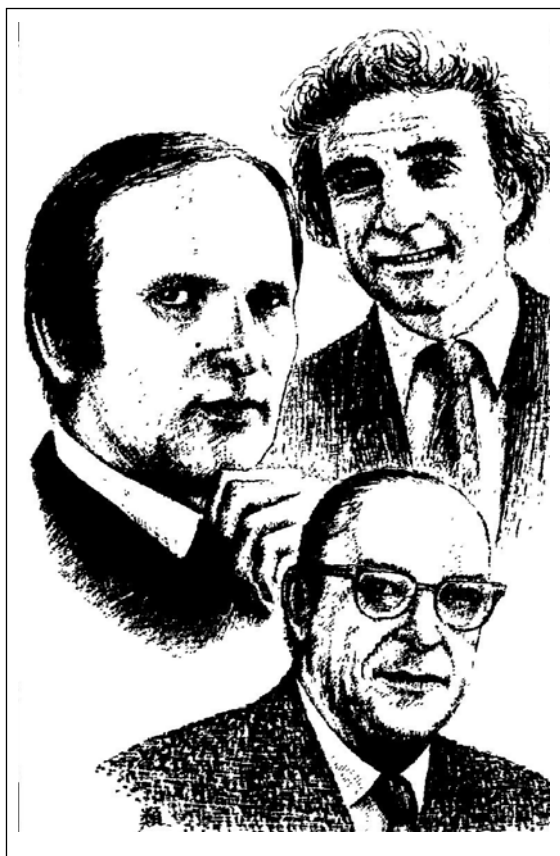
彼は全エネルギーが最小になる状態を作りたいと思った。しかし電子の数は 10^{23} 個もあるので、まともに考えると、どんなに偉い数学者でも解けない問題

^{*}J. R. シュリーファーは1931年5月31日、アメリカ・イリノイ州生まれ。1949年マサチューセッツ工科大学入学。1953年イリノイ大学の大学院課程で勉学中、バーディーンと超伝導の研究を始めた。

になってしまふ。彼は苦心の末、解けるためには、不変であるはずの電子の数が変化してしまう状態を混ぜ合わせると数学が簡単になることを見つけた*。この考えは危険な綱渡りであつたが、これを使うとあれほど困難をきわめた問題が、あつけなく解けてしまふのだ。この考えは、一九五七年一月末に、ニューヨーク滞在中に浮かんた。

電子の数が完全には保存していないという欠点、最後までひっかかりはしたが、数学的簡明さは捨てがたい魅力をもっていた。数日後にアーバナに帰つて、バーディーンにこの新しい考えを話した。彼がどう評価するか不安であつたが、それを話さないではおれなかつたのだ。バーディーンは、即座にこの考えの有効性を認めた。シュリーファーは、このあつけない承認に、むしろびつくりする。バーディーンはきつと電子数非保存の欠陥を指摘し、そんな誤つた考えを捨てるように言うのではないかと思つていた。この予期せざるバーディーンの反応と、この考えをもとにさらに理論を進展させられる可能性を指摘されたとき、シュリーファーの喜びは頂点に達していた。自分も真の理論屋の仲間入りができたのだ、そして自分の独創性がやつと花開いたのだと思つた。その後の何週間かは、興奮に満ちた日々であつた。バーディーン、クーパー、

* 電子の数が平均的に一定値をとるような取扱いをした。しかし、このような扱いでなく、根本から問題を解くような多体問題の手法が、将来確立されるかもしれない。物理学は、まだまだ根本的な点で未解決な部分が残されており、固定観念にとらわれない若者の登場が待たれているのだ。



BCS

BCS 理論は、49 歳のバーディーン（図中の下の人物）、27 歳のクーパー（上）、26 歳のシュリーファー（中）の見事な協力によって生み出された。円熟した物理屋が長年温めていた考えの上に、荒けずりな若い物理屋たちが、困難な面を大胆に切り捨て、この理論を花咲かせたのである。

シュリーファアの三人は、最低エネルギー状態からの励起エネルギーの計算、温度が上昇したときの計算、・・・と、熱に浮かされたように進んでいった。くる日もくる日も激論がくり返された。計算が始まると、途中でやめることができなかった。食事時間がとつくに過ぎていくのに、計算が続けられた。また時には一行の式も書けなくなることもあった。しかし、基本的方向は決まっていたので、そんな行きづまりも、何日かの努力で乗り越えることができた。彼らは確実に結論へ近づいていった。

苦勞の末に、エネルギーギャップの温度変化の計算にも成功した。その答は三人にとつて、とても美しいものであった。ある温度以上では、そのエネルギーギャップの値はゼロになっており、その温度以下で初めてエネルギーギャップが現れるのだ。その温度を境にしてギャップの構造がまったく変わってしまうことがわかった。ギャップの存在する状態が超伝導状態であり、ギャップのない状態が常伝導状態なのだ。すなわち彼らの理論から、低温になると、常伝導状態が超伝導状態に相転移する機構が解けたのだ。三人は、日が暮れるのも忘れて没頭していた。何度も何度も、この相転移を導く論理構造に誤りがないか、お互いに確認し合った。どこにも矛盾はなかった。このことがわかったと、彼ら

の興奮は頂点に達していった。彼らの前にはもう登らなければならない未解決の山はなかった。三人は幸せであった。あの毎日続いた緊張が急に解け、彼らは今、心地よい喜びにひたっているのだ。

彼らの作り上げた理論は、今日では三人の頭文字をとって、（BCS理論）と呼ばれている。この理論は一九五七年に完成し、その後の超伝導研究に大きな影響を与えていくのである。

第4章 量子の世界が見える

ギェーバーの悩み

B C S理論は、世界中の物理研究者に強い衝撃と興奮をもたらした。それを契機として、超伝導の研究は、まったく新しい局面を迎えていく。そんな時、一人の若者、I・ギェーバー^{*}は、自分がその世界にこれから飛び込んでいくとも知らず、薄膜の実験に励んでいた。

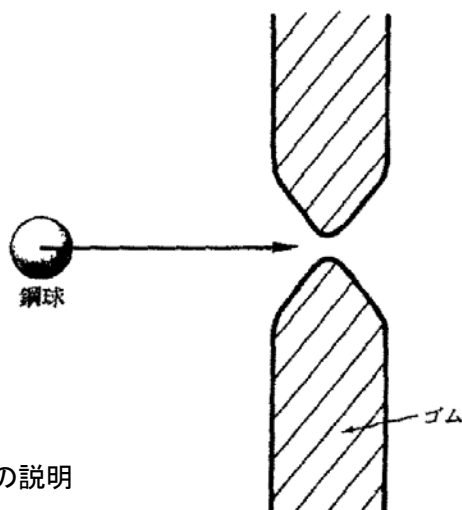
彼はノルウェーに生まれ、一九五二年にノルウェー工科大学の機械工学科を卒業する。彼は結婚後、住宅難で困っていた。そこで二人は祖国ノルウェーを離れてカナダに移住することを決意する。幸いなことに、彼はカナダ・ジエネラル・エレクトロニクス社に就職することができた。そこではあまり得意でない応用数学の方面の仕事をやっていたが、一九五八年、アメリカ・ジエネラル・エ

*ギェーバーは1929年ノルウェー生れ。1952年ノルウェー工科大学の機械工学科を卒業。1964年アメリカ市民権をとり、同国に帰化した。

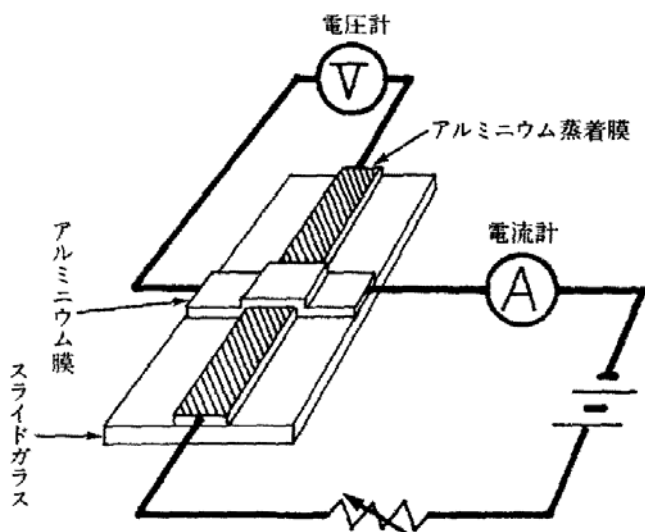
**彼がノーベル賞を受賞したとき、オスロの新聞には、〈ビリヤードとブリッジの名人、物理の落第生 — ノーベル賞を受賞〉という記事が出た。彼は「私が落第しそうだったのは（物理ではなく）数学なのです」と語っている。

レクトリック研究開発センターに移り、薄膜技術を使って実用的な電気素子を作る研究を始めた。

彼には一つ試してみたいことがあった。量子力学を学んだとき、トンネル効果という現象を教わった。それは次のような現象である。第十図のように、ゴムで作った壁の一部に穴があいている。この穴より大きな鋼球を穴に向かって投げる。鋼球の初速度が小さいときは穴に入れず、はね返される。しかし、初速度が大きくなると、ゴムの穴を抜けて鋼球がめり込んでいく。そして、ある速度以上の初速を与えると、鋼球は穴を通り抜け、右側へつき抜けていく。この「ある速度」とは、次のような場合を表している。すなわち、その速度の鋼球がもつ運動エネルギーが、鋼球の大きさにゴムの穴を抜げるのに要するエネルギーと一致した場合を表すのである。だから、古典力学ではこの速度以下の初速度では、鋼球はゴムの壁をつき抜けることができない。ところが、この鋼球や通り抜ける穴がどんどん小さくなって、原子の大きさほどになると、量子効果という効果が現れてくる。そこでは、粒子が波動性をもっており、粒子の位置と運動量を同時に確定することはできない。だから左側で、運動量が決められた粒子は、位置が確定できず、どんなに小さな初速度（左側での小さな



第10図
トンネル効果の説明



第11図トンネル電流の測定

運動量に当たる) のときでも、ある確率で右側へ通り抜けてしまう。このように、古典力学では通り抜けれられないような小さなエネルギーでも、量子力学ではその障壁をつき抜けて通ることができるとを、(トンネル効果)と呼ぶ。ミクロの世界ではこのトンネル効果は、いろいろな形で現れていた。例えば原子核の崩壊現象におけるガモフ^{*}の理論が有名である。

ギエーバーは、このトンネル効果を学んだとき、もつとマクロな世界にトンネル効果が現れないか調べてみたいと思った。そこで、薄い絶縁層をはさんだ金属の薄膜の間を、電子がトンネル効果で移動しないか試してみたかった。この頃、すでに日本では、江崎玲於奈^{**}が半導体で同様な試みを行い、トンネル効果による電流の観測に成功していた。ギエーバーと共同して新しい素子の開発研究を行っていたジョン・フィッシャーはこのことを知っていたふしがあるが、ギエーバーはそれを知らなかった。彼らは半導体でなく金属でそれを調べたのだ。第11図のように、ガラスの上にアルミニウム・リボンを蒸着し、その表面を酸化し、約一〇〇オングストローム以下の絶縁膜を作り、その上へ、それと直角にアルミを蒸着する。この素子に図のように電圧計、電流計をつないで、トンネル電流を観測した。一九五九年四月頃、酸化膜の厚さを五〇オングスト

* ガモフは1904年、ロシア・オデッサ生れ。レニングラード大学に学び博士号を得た。1928年トンネル効果により α 崩壊を説明。

** 江崎玲於奈は1925年、大阪に生まれる。1947年東大理学部を卒業し、神戸工業に入社。1957年、順方向バイアス電圧下での負抵抗特性を発見、半導体でのトンネル効果であることを示した。

ルーム^{*}以下にすると、かなり大きなトンネル電流が得られた。

ギーバーは、早速、研究所のセミナーでその実験結果を話した。それを聞いた多くの専門家から次々に質問が出た。その電流は酸化膜が破れてショートしたため流れているのではないか。この質問は、ぐさりと彼の心を突き刺した。彼は、自分たちの結果が正しいかどうか、絶えず不安に悩まされ始めたのだ。

ショートしたか、しないか、それを確認する手段はない。だとしたら、自分たちの見つけた電流は、電子が量子効果で絶縁体を飛び越えたのか、絶縁膜が破れて金属と金属がくつき、そこを電子が流れたのか区別がつかない。彼らは袋小路に入ってしまった。ギーバーは、トンネル電流にちがいないと思いつつも、それを証明できないもどかしさに悩まされ続けた。

エネルギーギャップが見える

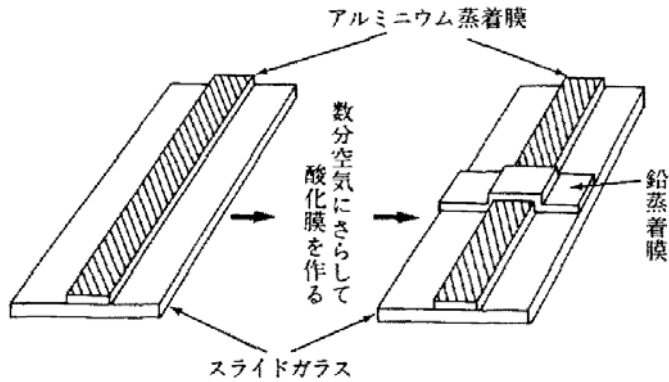
当時、ギーバーは、レンセリア工科大学の講義を聞いて、物理学の勉強をしていた。折しも、固体物理の講義で超伝導のことを教わった。とくに、BCS理論のエネルギーギャップの話聞いたとき、彼は啓示を受けたような気が

^{*}1 オングストロームは、 10^{-10} m すなわち、1 万分の1 ミクロンである。

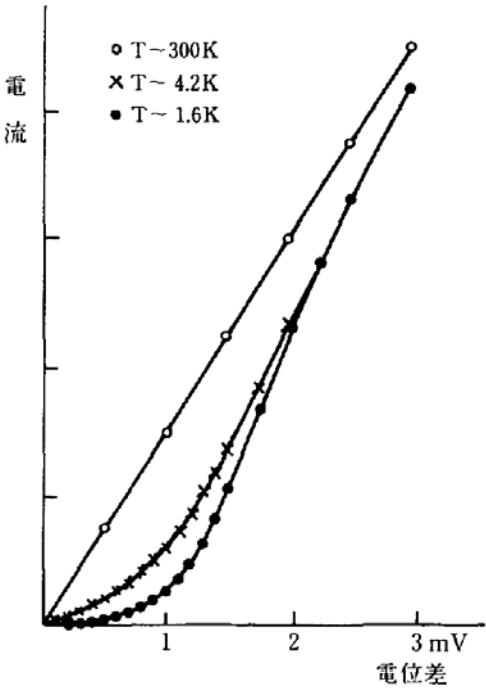
した。自分たちのトンネル効果の実験に超伝導金属を用い、超伝導状態で測定すれば、このエネルギーギャップが測れるような気がした。

彼は、これまでの実験で用いたのと同じ方法で試料を作ってみた。第12図のようにアルミのリボンを蒸着し、酸化膜を薄くするため、それをほんの数分間空気にさらしただけで、元の真空蒸着装置の中へもどす。すると、酸化膜の厚さは三〇オングストローム以下になった。次にアルミニウム・リボンと直角に鉛のリボンを蒸着し、試料を作った。そして彼は液体ヘリウムを汲んで、この試料を四・二Kに冷やした。彼が最初に用いた低温装置では、温度を四・二K以下にできなかった*ので、鉛は超伝導状態になるが、アルミニウムは常伝導のままであった。ギェーバーは、この試料に電圧をかけて、電流を測ってみた。室温では、以前の試料と同じように、電流は電圧に比例して増加する。酸化膜が破れてショートしているのかもしれない。しかし、鉛が超伝導になる低温では、違うはずだと彼は考えた。期待と不安の入りまじった気持で、電圧を変えてみる。彼にとつて、このように、ある考えが正しいかどうか分かる直前こそ、実験中で最もすばらしい瞬間であった。室温のときとは違う電流値が観測され始めた。電流は、第13図のようにある電圧まではほとんど0に等しく、

*アルミニウムの臨界温度は 1.2 K であり、ギェーバーの最初の装置は 4.2 K にしかできなかったため、アルミは常伝導のままであった。



第12図 トンネル接合の作り方



第13図
アルミ-酸化アルミ-
鉛の電圧-電流特性
(このデータはギューバー
によってとられたもの)

ある電圧を超えると急に増え始めた。こんな振舞いは、絶対にショートした金属膜の電圧・電流特性には発生しない。彼の作った試料は、ショートしていなかったのだ。彼をさいなんでいた不安が晴れただけでなく、この特性は大変なことを示していた。電流が急に増え始める電圧は、BCS理論のギャップエネルギーを表していたのだ。すなわち、この（電圧） \times （電子の電荷）は電子のエネルギーを表し、これがBCS理論のギャップエネルギーより小さいと、電子はこのギャップを越えられず、そのため電流がほとんど流れない。一方、この電圧がギャップエネルギー以上になると、急激に電流が流れ始めるのだ。BCS理論が予言したギャップエネルギーを直接検証できたのだ。M・ティンカムらが赤外線透過を使って、このギャップエネルギーを測った実験があったが、ギエーバーの測定はより精度が良く、しかも超伝導体での電子のエネルギーレベルの構造を、より明解に表していた。

この現象が超伝導特有のものであることを証明する良い方法が、もう一つ見つけた。それは、臨界磁場以上の磁場をかけることである。そうすれば超伝導がこわれて、電圧・電流特性が変わるはずだ。ギエーバーは、もう夢中であった。研究所のなかを走りまわって磁場の大きさを変えられる装置を探した。

ジャコブが磁場と温度を可変できる装置を貸してくれた。彼が思ったとおり、臨界磁場以上の磁場をかけると、電流は電圧に比例して増え、常伝導体での実験と同じになった。磁場を取り除くと、電圧が小さく、電子がエネルギーギャップを越えられないときは、電流がほとんど流れなかった。したがって、この特性は超伝導特有のものであることがわかった。彼は自分の見ているものがまちがいなく超伝導の本質を表していると思った。

彼はこれらの結果をグループ全員に話した。彼らにも興奮が感染した。とりわけ、理論屋のビーンは熱狂的になり、研究所の上から下まで、このニュースを伝えて歩いた。ビーンの明解な理論的説明は、みんなを感心させた。ギエーバーは、満足と興奮と夢の入りまじったすばらしい日々を過ごしていた。ギエーバー、ビーン、フィッシャー、ハリソンらは、この実験をありとあらゆる金属や半導体に応用して発展させようと話し合った。彼らは、毎日コーヒーを飲みながら、次々と新しいアイデアを考え出しては、悦にいつていた。しかし、彼らのアイデアは、超伝導の実験を除き、ほとんどはうまくいかなかった。ハリソンは、人生とは結局のところまったく複雑なものであると述懐している。彼らの実験は、超伝導体に対しては、いつもうまくいった。そして、ギエーバー

によるエネルギーギャップの確立によって、今までBCS理論を一つの仮説とみなしていた人々も、それを超伝導理論の本命と認めるようになった。それから約一〇年後、一九七二年に、バーディーン、クーパー、シュリーフアーに、ノーベル物理学賞が与えられ、ギエーバーもその翌年、ノーベル物理学賞を受賞するのである。

ギエーバーは、科学的発見についての示唆に富んだ言葉を語っている。「科学的発見の道がまっすぐなことはほとんどなく、たいへんな熟練を要するというものでもないというのが私の信念です。実際、私はある分野に新しく来た人が良い仕事をするのをたびたび見えています。・・・しかし、非常に大事なことは、あなたが必要とする時に、いろいろな分野の専門家たちから適切な忠告と援助を受けることができるということです」*。

彼は、引き続き超伝導と超伝導の間のトンネル効果を測定し始めた。錫・酸化物・錫や、鉛・酸化物・鉛の接合では奇妙なことが起こっていた。それは、電圧が0なのに、電流が流れるのである。アルミニウム・酸化物・鉛のときでも、アルミニウムが超伝導になる一・二K以下の極低温で、この現象が見られることがあった。しかし、彼はこれをサンプルがショートしたためだとして捨

*『ノーベル賞講演・物理学 12』（講談社）p. 54 に書かれている。

ててしまっていた。彼は一九七三年のノーベル賞講演で、「この頃の私はなんと馬鹿だったことでしょう！ のちになって、私は何度もこの効果を見逃したことが残念ではなかったかとたずねられました。答は、はつきりとノーです。なぜなら、一つの実験的発見をするためには、何かを観察するだけでは不十分で、その現象のもつ意味を知らなくてはなりません^{*}」と述べている。彼が観察してなお捨てていたこの電流は、BCS理論の根幹をなすペア電子が、トンネル効果で移動して作り出したものだ。この量子効果は、これからお話しする若者によって、超伝導のもう一つの神秘を見せてくれるのである。

大学院学生の見た夢

イギリス・ケンブリッジのキャベンディッシュ研究所。ここは、物理学の世界でまるで神聖な場所ともいえる趣を帯びている。それは、初代の所長が電磁気学を作ったマクスウェルであり、二代目所長が音波、表面波^{**}、種々の波動の運動を明らかにしたレイリー、三代目所長が陰極線（電子）の発見者のJ・J・トムソン、四代目所長が原子核を発見し元素の崩壊を明らかにしたラザフォ

* 『ノーベル賞講演・物理学12』（講談社）p. 53 に書かれている。

** 物質表面にそって伝わる表面波は、1885年レイリーによって理論的に予言された。その波が、高解像度テレビ用楕形フィルターとして応用され始めた。楕形電極のついた強誘電体表面をレイリー波が伝わり、自由な周波数特性で必要な波を取り出せる。100年後に応用の世界が開けたのだ。

ド、五代日所長がX線による結晶構造解析を確立したW・L・ブラッグ、・・・という、そうそうたる物理学者によつて維持されてきたことからもうかがえるであろう。この研究所の出身者で、ノーベル賞を受賞した人が膨大な数に及んでいることも、この研究所を特別なものになっている。自分の身近にノーベル賞受賞者の姿を見ながら研究に打ち込むことが、若者たちにどれほどの夢と希望をもたらすか想像にかたくない。

一九六〇年、この研究所に、二十歳の若者B・D・ジョセフソンが研究生としてやってきた。彼はピパードの研究室に所属した。ピパードはのちにキャベンディッシュ研究所所長となつたが、当時も超伝導の有名な研究者であつた。彼は、超伝導体の一部に変化を与えると、コヒーレンスの長さと呼ばれる一定な長さの範囲に、その強い影響が及ぶことを明らかにした。これはBCS理論の成立に大きな影響を与えた。このような業績をあげたピパードのもとで、ジョセフソンは超伝導への興味をつのらせていった。

大学院学生として二年目の一九六一〜六二年にかけて、アメリカのベル電話研究所から、P・W・アンダーソンが客員教授として招かれ、ケンブリッジで講義を行った。ジョセフソンはその講義を非常な興味をもつて聞いた。講義で

*イギリスの大学は3年で、高校以下の課程でも飛び級があるため、ジョセフソンのように、20歳で大学を卒業し、大学院へ進むこともできる。

は超伝導体に関するアンダーソンの新しい概念が展開された。それを聞いてみると、彼にはいろいろな疑問が湧き上がってきた。超伝導電流は、電子のクーパーペアが、歩調をそろえて流れているはずだ。その流れを表すのに、ギンツブルク・ランダウの理論があった。それは、膨大な数のクーパーペアが全体として歩調をそろえて、量子力学における波^{*}として運動するという理論であった。その波の位相をなんとかして観測できないかとジョセフソンは考え続けていた。

光の場合でも、位相そのものは測れないが、その差は干渉実験で観測できる。

そこでジョセフソンは、この超伝導の波の位相も干渉効果により、位相差が測れるはずだと考えた。そのためには、二つの超伝導体の中に独立に存在する二つの超伝導の波を干渉させねばならない。おそらく、それは、二つの超伝導体の間に、電子対が交換されるとき起こるだろう。こんな思いをいだきながら、イギリスの寒い冬をじっと耐え、春を待ち望んでいた。そんな折、アンダーソンの講義でギューバーの実験のことを知ったのである。それなら、絶縁膜をはさんだ超伝導体間に、クーパーペアがトンネルするのではなかろうか。

ピパード先生にその考えを話すと、彼もすぐにそれを考えていた。^{**}しかしピパード先生は、その確率がきわめて小さく、観測できないだろうと言った。そ

*この巨視的な大きさをもつ波のことを、今後、(超伝導の波)と呼ぶことにする。

**『ノーベル賞講演・物理学 12』(講談社) p. 59 に書かれている。

の理由は、絶縁膜を電子がトンネルする確率が非常に小さいためで、二個の電子がクーパーペアとして、同時にトンネルする確率は一電子のトンネル確率の二乗らしい。例えば、この確率が一万分の一なら、二乗して一億分の一になってしまう。一電子のトンネル電流さえ観測が難しいのに、ペア電子のトンネルを見つけるのは無理だ。ジョセフソンは、ピパード先生の意見を聞きながらその論理に飛躍があるように思った。超伝導体の中ではもともとクーパーペアが走っているのだから、絶縁体をクーパーペアのままトンネルする確率は、ばらばらな電子が一個ずつ通り、それがたまたまペアを組むと考えた確率よりずっと大きくなる。すなわち、一電子のトンネル確率の二乗ではなくて一乗のはずだと彼は思った。しかし研究所のなかのほとんどの人々は彼の考えに反対であつた（それから数か月あと、一九六二年の九月にロンドンで開かれた第八回低温国際会議でバーディーンと議論したが、バーディーンも絶縁体の中でクーパーペアがつぶれてしまうとして、ジョセフソンの考えには賛成しなかった）。このような反対にもめげず、若いジョセフソンは、このクーパーペアのトンネル電流を計算しようと思った。しかし、当時は、ギエーバーの観測したトンネル電流の実験値を基礎理論から導く理論もなかった。そんなある日、アンダー

ソンが、シカゴから送られてきた論文をジョセフソンに見せてくれた。^{*}それは
コーエン、ファリコ、フリップスによって書かれたもので、超伝導体・絶縁
体・常伝導体の間を流れるトンネル電流を計算し、ギエーバーの実験を説明し
ていた。彼はこどおりした。これと同じ方法で超伝導体・絶縁体・超伝導体の
間をクーパーペアがトンネルする電流も計算できる。彼はその計算に熱中した。
コーエンら三人がまったく気づいていない広大な世界が開けてきた。

超伝導・超伝導間に電圧がなくても、超伝導の波の位相差でトンネル電流が
流れるはずだと思っていた彼の考えは、数式の上でも見事に実現していた。二
つの超伝導体の間に電位差が生じると、クーパーペアは、 $(\text{電位差} \times 2 \times \text{電子}$
 $\text{の電荷})$ だけのエネルギー変化を受ける。二倍するのはペアのため電子が二個
トンネルするからだ。すると量子効果により、そのエネルギーをプランク定数
で割った値の振動数で振動するはずだ。この振動は二つの超伝導体の間を往復
するトンネル電流の振動になるだろう。結局、二つの超伝導体間に電位差を与
えると、それに比例した振動数の発振が起きるのだ。この発振が測定できれば、
超伝導体特有の量子効果を見つけたことになる。電位差なしに流れる直流のト
ンネル電流のことを直流ジョセフソン電流といい、電位差のあるときに発生す

* 『ノーベル賞講演・物理学 12』（講談社）p. 60。

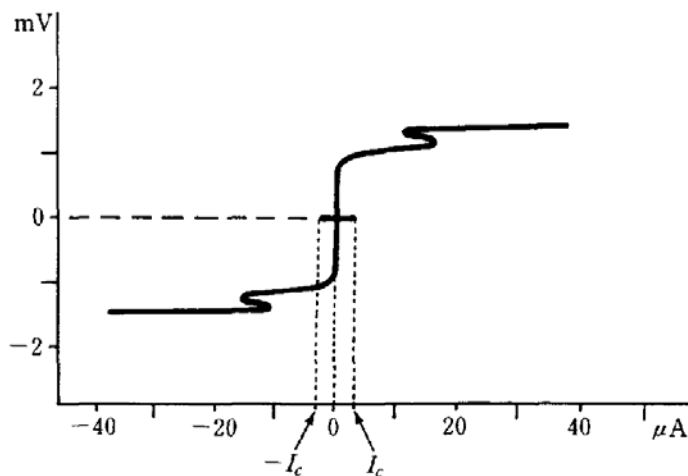


B. D. ジョセフソン

22 歳で書いたジョセフソン効果の論文が彼の名を不滅にした。英国の大学制度が若き秀才を早くから最先端の研究にたずさわれるようにしているもつとも良き例である。趣味は山歩きとアイス・スケート。その後、物理以外の研究分野に移ったとのことである。

る交流電流のことを交流ジョセフソン電流という。彼は自分の計算に酔っていた。紙の上だけの結果だが、このような新現象が導出できたことに満足だった。彼はこの新現象が数式の上だけのことでなく、実在するはずだと思うようになった。

彼はこの計算結果をアンダーソン先生に見てもらったことにした。他の人なら彼の考えを理解できないかもしれないが、アンダーソン先生ならきくとわかってもらえると思った。アンダーソンはそれを一目見て、ジョセフソンのやったことがわかった。それはコーエンらの計算の拡張であったが、導出された結論はまったく新しい世界を開いていた。それから数



第 14 図 1K におけるアルミ・酸化アルミ・鉛接合でのトンネル電流

(電位差 0 mV で I_c , または, $-I_c$ の直流ジョセフソン電流が存在している。データはニコル, シャピロ, スミスによる)

週間の間、ジョセフソン、アンダーソン、ピパードは、その他の多くの人々とともに、ジョセフソンの理論について議論し続けた。みんな彼のアイデアは良かったが、超伝導の波の位相差が本当に超伝導電流を生じるかが議論の的となった。

ジョセフソンは不安になり始めた。自分の考えは正しいと思いながらも、自分の理論から期待される効果があまりにも大きく、それが見つかっていないことが心配になりだしたのだ。彼は文献を詳しく調べてみた。すると、ニコル、シャピロ、スミスの超伝導蒸着膜間のトンネル電流の測定結果に、明らかに、電位差ゼロでも電流が流れているデータのあることを知った。これは第14図のような測定値で、確かに電位差0で電流が流れているが、ニコルらはそのことの重大性に気づいてはいなかった。

二、三日して、アンダーソンが部屋に入ってきて、超伝導電流が見つからないときの説明を話してくれた。この話を聞いているうちに、ジョセフソンは、自分の理論を早急に公表する決心を固めた*。

ピパードは、適切な指示をジョセフソンに与えていた。まず論文を投稿する雑誌を『フィジックス・レターズ』にするように忠告した。世界中で最も読ま

* 『ノーベル賞講演・物理学 12』（講談社）p. 63。

れている雑誌『フィジカル・レビュー・レターズ』は、レフェリーがいやがらせをする恐れがあった。まったく無名の学生ジョセフソンの論文がほうむられてはいけないという配慮であった。『フィジックス・レターズ』は創刊されたばかりで、レフェリーはなく、すべての論文を載せる方針が貫かれていた。ジョセフソンの論文はその第一巻に載り、不滅の論文として輝くことになる。

ピパードが次に注意したことは、クーパーペアのトンネル電流を発見するた
めに、自分で実験をしなさいという助言であった。その実験では、磁場の影響
が大きいので、地球磁場を消したところにジョセフソン接合^{*}を置いて測定する
ように注意された。ジョセフソンは早速、実験を始めた。しかし、測っても測つ
ても明解な証拠を発見することができなかった。彼は、「超伝導体間の電子のト
ンネル効果に関する二つの成功せざる実験」という題の博士論文を書かざるを
えなかった。彼はそんなはずがないと思いつつも、不安をつのらせていった。

*2 つの超伝導体の間に 50 \AA 以下の薄い絶縁膜をはさんだ接合を
ジョセフソン接合という。その後、同一機能をもつ素子がいろい
ろ工夫され、超伝導体の一部がくびれて非常に細い部分でつな
がった接合でもよいことがわかった。

おどりまわる超伝導電流

アンダーソンは、一九六一〜六二年のキャベンディッシュ研究所滞在を終え、ベル電話研究所へ帰った。彼はジョセフソン効果のすべてを理解していた。その現象が技術の世界に応用されるのではないかという予想が、漠然と彼の心に浮かんた。ベル電話研究所で特許管理を行っている腕ききの弁理士に、ジョセフソンの理論をわかりやすく説明した。それにまつわる現象が必ず存在するはずだというアンダーソン自身の感触も伝えた。まず、その弁理士は、ジョセフソンが一九六二年六月に投稿して、『フィジックス・レターズ』に掲載された論文を調べた。その論文は完璧で、基本性質がすべて公表されているため、新たに特許をとれるような部分はなかった*。

そこで、次にアンダーソンはジョセフソン接合を作りトンネル電流を測定するため、そのできる有能な実験家を探した。すぐさま彼の頭に浮かんだのが、J・ローウェルであった。ローウェルは、アンダーソンの明解な説明を聞き、未発見の新現象に目の色を輝かせた。これはおあつらえむきの実験対象であっ

*文献9) 参照。

た。彼は以前からトンネル結合素子を手がけており、その改作はお手のものだった。彼が長年培ってきた技能が、いかに発揮された。彼は鉛と錫の間に、今まで以上にきわめて薄い絶縁膜でしかもショートのない接合を作ることになった。その電圧・電流特性は磁場に非常に敏感であった。地球磁場を遮断したときには、電位差0で、 0.65 ミリアンペアの電流が流れた。これこそジョセフソンの予言したクーパーペアのトンネル電流にちがいない。その理由は、地磁気にさらすと 0.3 ミリアンペアしか流れなくなり、また、 20 ガウスの磁場をかけると電位差0では電流が流れないからだ。もし接合部のショートなら、磁場を変えてもショートがなくなるようなことはないはずだ。この磁場変化はニコル、シャピロ、スミスらの実験では確認されていなかった。アンダーソンからジョセフソン効果の話聞いてから、まだ数か月しかたっていないのに、目的のものが発見できたのだ。彼は早速その結果をアンダーソンに見せた。アンダーソンは、ローウェルの腕を信頼していた。彼は、ジョセフソンらがクーパーペアのトンネル電流を発見できずに、ローウェルが発見できた理由を分析し始めた。ローウェルの作った接合の常温での抵抗は 0.4 オームと小さい。そのうえ、測定回路全体の抵抗も小さく作られている。アンダーソンの頭

に電光のごとくひらめいたものがあつた。すべての謎が氷解していった。ローウェル以外の実験家が測定していた装置はみな、もつと高い抵抗をもっている。この場合その抵抗が熱雑音を発生するのだ。一本の抵抗の両端電圧を測つてみると、電子の熱運動によつて、外から電池をつないでいなくても、ごく微小な電圧が時々刻々変化しながら出現している。この電圧は非常に小さいので通常は無視されているが、今回はこれが重要な鍵をにぎっていたのだ。この熱雑音による電圧を減らすには抵抗値を下げればよい。ローウェルの装置は抵抗が小さかつたため、雑音電圧も小さく、トンネル電流の測定に成功したのだ。アンダーソンとローウェルの論文を契機に、ジョセフソン効果の多様な性質が次々と発見されていった。この話をする前に、バーディーンとジョセフソンの心温まる逸話を紹介しよう。

一九七二年、BCS理論の完成から一五年、ジョセフソン理論の発表から一〇年の歳月が流れていた。バーディーン、クーパー、シュリーファアは、その年のノーベル物理学賞に輝いたのだ。その受賞の知らせは、またたく間に、イリノイ大学中に拡まつていった。十月二十日、朝十時からの記者会見の会場は、多くの研究者であふれていた。バーディーンは、満面に笑みを浮かべてライト

のなかに立っていた。^{*} ふだん無口な彼だが、その日だけは言葉が堰を切って流れ出した。彼の心には一〇年前、ジョセフソン理論を聞いたときのことが浮かんた。クーパーペアは絶縁膜中でこわれてしまい、トンネルできないのではないかという疑問をそのとき提起したことが昨日のことのように思い出された。その後の実験から、今では疑いなくジョセフソン効果は存在し、超伝導のすばらしい側面を見せている。バーディーンは語った。「ジョセフソンは、BCS理論以後の画期的な発明であるジョセフソン効果を予言し、量子が巨視的世界にその姿を現すことを明らかにしました。私は彼がノーベル賞を受賞することを願ってやみません」。彼の祈りは一年後になえられ、ジョセフソンはノーベル物理学賞に輝いたのであった。

整数には誤差がない

ローウェルの実験で、直流ジョセフソン効果が明らかになった。次は交流ジョセフソン効果を見つける番だ。ジョセフソン接合に無理やり電流を流してみよう。ある臨界値を超えると、もはや接合間の電位差はゼロのまま維持できず、

^{*} 恒藤敏彦, 『自然』(中央公論社) 1974年1月号,
p. 38 にこの記者会見のようが書かれている。

有限な電位差 V が生じる。すると、膨大な数のクーパーペアが歩調をそろえて作る波（超伝導の波）は、その電位差 V をこらがり落ちる。そのとき、クーパーペアは（電位差 $V \times 2 \times$ 電子の電荷 e ）というエネルギーを得る。すると、量子効果によって、このエネルギーをプランク定数 h で割った値（ $2eV/h$ ）の振動数の振動が発生する。これは、ジョセフソン接合を通過する超伝導電流の振動として現れるはずである。この振動電流は電波を発生するだろう。これを観測できればよい。この電波はすぐに観測できそうに思えたが、接合の両側が超伝導体でおおわれているため、電波は電氣的にも磁氣的にもシールドされ、ごく狭い側面からしか放射できない。結局、非常に微弱な電波しか出てこず、なかなか観測できなかった。

ジョセフソンは、この難しい実験に、J・アドキンスとともに挑戦した。しかし、皮肉なことに、いくら工夫しても、交流ジョセフソン効果を見つけることができなかった。彼は「失敗の理由は今もってわかりません」と述べている。^{*}この実験は、一九六五年ギエバーによって再び行われ、交流ジョセフソン電流が観測された。また、同じ年に、ソ連のヤンソン、スヴィスチュノフ、ドミトレンコにより、電波も直接検出された。このように、ジョセフソンの予言は、

* 『ノーベル賞講演・物理学 12』（講談社）p. 64。

ことごとく実在したのである。

これに先立ち、一九六三年に、交流ジョセフソン効果の間接的証拠は得られていた。それは、シャピロによってなされたもので、じつに巧妙なやり方であった。ジョセフソン接合に外からマイクロ波を当てながら、電流を流すのである。すると、第15図のように、接合の両端電圧は階段状に変化していくのだ。

なぜ、こんなことが起こるのだろうか。ジョセフソン素子に電流を流すと、電流・電圧特性は、すでに述べたように正比例の関係から大きくずれる。すなわち、非線形の関係をもつ。そこで、シャピロが外から加えた九三〇MHzの周波数の電波が、接合に交流電流を誘起するが、非線形効果によって、九三〇MHzの整数倍の波動が作り出される。一方、ジョセフソン接合には電位差 V がかかっているため、交流ジョセフソン効果が生じ、 $(2eV/h)$ の周波数の波も同時に発生する。この二つの波が合わさって変調されて、二つの周波数の和および差の周波数の超伝導電流が作られる。とりわけ、この二種類の波の周波数が一致するとき、すなわち $(2eV/h) = 9300 \times 10^6 \text{Hz} \times \text{整数}$ となつてるとき、その差の周波数の波は周波数0になり、結局、直流電流成分が発生することになる。その際、ジョセフソン接合の両側での超伝導の波の初期位相差が変わる

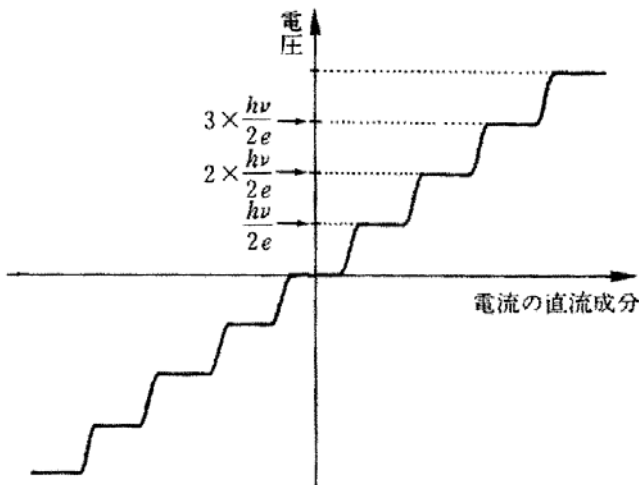
* シャピロは、 $9300\text{MHz} = 9.3 \times 10^9 \text{Hz}$ （ヘルツ）および 24000MHz の2種の電波で実験し、それぞれ階段状の電流・電圧特性を得た。文献10)にある。

*2 2つの周波数 ν_1 、 ν_2 の波が非線形素子で重ね合わせられると、変調されて、 $\nu_1 + \nu_2$ と、 $|\nu_1 - \nu_2|$ の周波数の波が発生する。

と、この直流成分の大きさが変化する。だから、この直流成分の大きさはその最大値と最小値の間のどんな値でもとれる。すなわち、ジョセフソン素子にかかっている電位差が「 $(h/2e) \times$ マイクロ波の周波数」の整数倍という一定電圧を保ったままで、直流電流がある範囲で変化できるのだ。結局、第15図のグラフのように、電圧が一定な平坦部ができるのである。

一方、電圧が $(h/2e) \times \nu$ の整数倍からずれると、マイクロ波の高調波とジョセフソン振動波に対して、おのおのの周波数の和と差がどちらもゼロにはならない。だから、このような電圧のときは、グラフに平坦部が現れない。

それでは、第15図のグラフが階段状になる



第15図 正確な電圧の決定

のはどうしてだろうか。それは、ジョセフソン素子に電圧がかかっているときには、超伝導電流のほかに常伝導電流も流れ、これはほぼ電圧に比例する。そのため、全電流は、平均として、第15図のグラフのように右上がりになる。そして、この常伝導電流に、すでに説明した平坦部のある超伝導電流が加わるため、階段状になるのだ。

このシャピロの実験は、その後どんどん改良され、その精度が飛躍的に向上した。平坦部の電圧は、ジョセフソン素子を使わない従来の測定では考えられないほど正確であった。ジョセフソン素子を作る超伝導物質を変えても、温度を変えても、この電圧は変わらず、その相対誤差は 0.5×10^{-9} 以下というきわめて精度の良いものであった。

誤差の原因となるのはマイクロ波の周波数だけなので、原子時計を使って正確に周波数を決めるとこの電圧は標準電圧として使える。ジョセフソン素子一個の両端電圧は一ミリボルト以下という微小な電圧なので、実用上の測定では直列にして使うと便利である。今日では、特性の非常によくそろったジョセフソン素子を一〇〇〇個以上も直列につないだ素子が作られている。これに、均一にマイクロ波を当て、一ボルト近くの必要な電圧を、相対精度 2.7×10^{-9} で

*マイクロ波の周波数は、現在の精度では、相対誤差 10^{-12} 程度まで精密測定ができる。

維持できる。一九七六年から、国際標準の電圧は、長年使われてきた標準電池を廃止し、ジョセフソン素子に切り換えられた。八桁もの電圧を決められる技術、これは量子の世界がもたらした啻り物なのだ。

量子化する磁束

第二種超伝導の発見の節で、磁束が超伝導体をつき抜ける様子を説明した。それによれば、磁束は、第二種超伝導体を一様に貫通するのではなく、あばた状につぶつぶな部分だけから侵入し、貫通していることがわかる。この磁束が貫通している領域を筒状にとりまくように、超伝導電流が流れている。そして、この電流の生み出す磁場と外部からの磁場が重なって、磁束の貫通している部分の外側へ磁場がしみ出さないようになっている。

また、磁束貫通部分の外側は超伝導状態になっており、膨大な数のクーペーペアが超伝導の波を作っている。この部分には磁場がないが、脚注で説明するように、ベクトルポテンシャルというものが存在している。このベクトルポテンシャルの影響を受けて、超伝導の波の位相が変化する。磁束貫通領域の外側

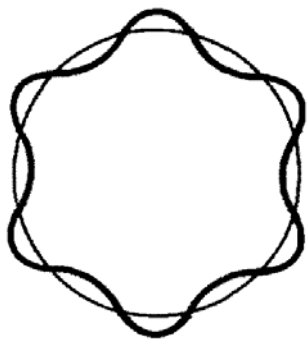
* 電位と同様に磁場を生み出すポテンシャルのことをベクトルポテンシャルという。これは電磁場をより少数の成分で記述するのに有効な人工的なものと思われていた。しかし、量子力学では電磁場を使って表せず、ベクトルポテンシャルと電位が基本量であることがわかった。磁場のないところにもベクトルポテンシャルは存在し、電子の波はその影響を受ける。

を一周する間に、この位相変化は磁束の大きさ Φ に比例した値になる。そのうえこの位相変化は、クーパー・ペアが受けているので、その電荷 $2e$ にも比例する。結局、磁束 Φ のまわりを一周まわったときの位相変化は、 $(2\pi)\Phi(2e)/h$ で表される。一周まわると元の位置にもどっているので、第16図のように位相も元にもどらなければならない。だから、この位相変化は、 2π の整数倍^{*}でなければならない。すなわち、 $\Phi(2e)/h \equiv (\text{隣接})$ となる。これを磁束 Φ の値を与える式に書き直すと、 $\Phi \equiv [h/(2e)] \times (\text{隣接})$ となる。そこで、この磁束の最小値 Φ_0 は整数が1のときであり、 $\Phi_0 \equiv h/(2e)$ で与えられる。

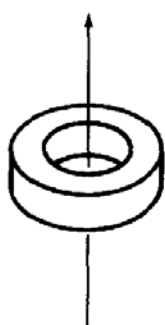
さて、この最小磁束 Φ_0 のことをフラクソンといい、その値は約 2×10^{-6} 「ガウス・cm²」という非常に小さな値である。そして、一般に、超伝導状態がとりかこんでいる中を磁束が通るとき、前式からその磁束 Φ の値はフラクソン Φ_0 の整数倍でなければならない。第17図のように、リング形の超伝導体の内側を磁束が通る場合も、フラクソンの一倍、二倍、・・・の磁束しか許されないのだ。このように超伝導状態を貫通する磁束が、 Φ_0 の整数倍しか許されないことを、磁束の量子化という。

古典電磁気学では、連続的に変えられるはずの磁束が、超伝導状態を貫通す

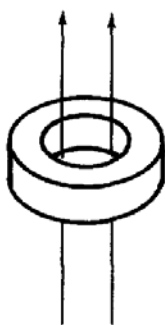
^{*}位相は角度と同様 $0^\circ \sim 360^\circ$ までの値があり、ラジアン単位で書くと $0 \sim 2\pi$ までの値をとる。 2π の整数倍だけ違った位相は、角度と同様に、同じものを表している。



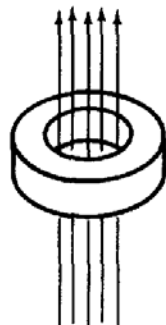
16 図 円周上の超伝導の波
(一周で6回振動している)



$\Phi = h/2e$
フラクソン 1 個



$\Phi = 2h/2e$
フラクソン 2 個



$\Phi = 5h/2e$
フラクソン 5 個

第 17 図 超伝導リングの中の磁束の例

るときは、とびとびの値しかとれないのだ。この磁束の量子化は一九四八年、F・ロンドンが予言した*。しかし、彼は超伝導電流が、クーパーペアでなく、電子そのものだと思っていたために、 $\frac{h}{2e}$ の整数倍の磁束だと考えた。今では、 e ではなく2倍の電荷 $2e$ であることがわかり、磁束も $\frac{h}{2e}$ の整数倍となっている。

ともかく、F・ロンドンのこの考えはあまりにも斬新であつたため、またフラクソンの値があまりにも小さかつたため、しばらくは注目されなかつた。超伝導の波の量子力学を研究したギンツブルクとランダウも、彼らの論文にはこの磁束の量子化を述べていない。それほど、F・ロンドンの考えは斬新なものであつた。一三年後、一九六一年、ディーバーとフェアバンクのグループ、およびドルとネバウアーのグループが独立にこれを発見したのだ。フェアバンクらは、太さ 0.1 ミリの鋼線に錫メッキをし、錫だけが超伝導になるのを利用して、極小の超伝導リングを作つた。そして、彼らは、このリングにとらえられる磁束を測定した。すると外から加える磁場の強さを連続的に変えても、超伝導リングにとらえられる磁束は連続的に変わらず、 $\frac{h}{2e}$ の整数倍になることがわかつた。このように e ではなく $2e$ が現れたのだ。このことか

*文献 11) に書かれている。

ら、超伝導電流を作るクーパーペアが、確かに電子2個からできていることが明らかにされた。

ロンドンの予測どおり、磁束の量子化は、確かに実在していたのだ。しかし、F・ロンドンはこのすばらしい発見を知ることなく、一九五四年三月三十日、心臓発作のためこの世を去った。^{*} 彼の数限りない業績のなかで、磁束の量子化の予言は、ひとときわ光輝いている。次の節で見るように、この性質が、新しい素子を生み出し、電気磁気に関する測定技術に革命をもたらしたのである。F・ロンドンはノーベル賞をもらわなかったが、彼の不滅の業績をたたえ、彼の死後、一九五七年、低温物理の優れた仕事に対して与えられるフリッツ・ロンドン賞が設立されたのである。

SQUIDの驚異

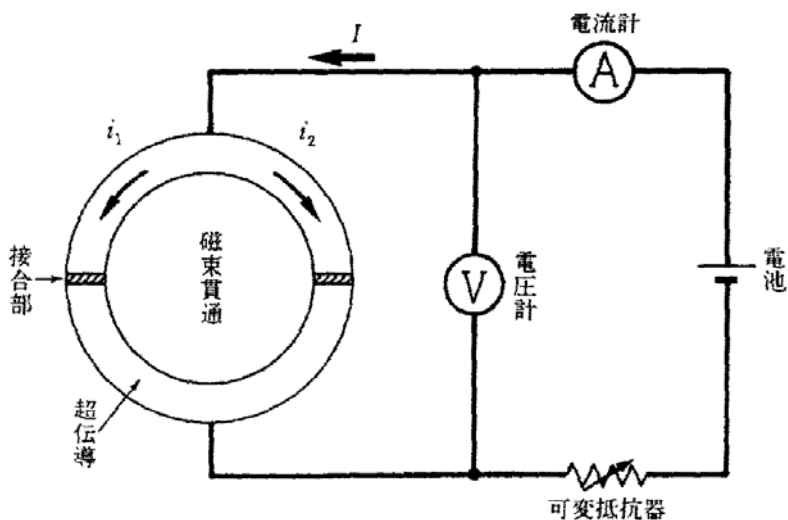
ジョセフソン接合と、磁束の量子化をきわめてうまく利用した新しい素子が、一九六四年、フォード自動車会社の研究所のジャクレビツクのグループによって考案された。これは、第18図のようにドーナツ型の左右に、それぞれ一

^{*}フリッツ・ロンドン著，井口家成訳『超流体ヘリウム』（講談社）p. 3。

^{**}文献12) 参照。

つずつジョセフソン接合を作った素子である。この素子は、超伝導量子干渉素子の英名の頭文字をとって、SQUID（スクウィッド）と呼ばれている。

SQUIDは、ドーナツ型の超伝導体でできているが、左右で二か所、超伝導部分が切れているため、ドーナツの中を通る磁束はフラクソン Φ_0 の整数倍でなくともよく、連続的に変化しうる。このとき、クーパーペアが二つの接合をトンネルして一周するときの量子条件は、前節の条件と少し違ってくる。SQUIDのドーナツの中を通る磁束が Φ_0 の整数倍からずれた場合を考える。そのとき、そのずれた量に比例して、ドーナツを一周する超伝導電流が発生するのだ。すなわち、ドーナツを一周する電流は、ドーナツの中を通る



第18図 SQUID による磁場測定

磁束が Φ_0 の整数倍になったとき消滅し、 Φ_0 の整数倍から $\Phi_0/2$ だけずれたとき最大の電流が流れることがわかる。

さて、このSQUIDに、第18図のように外部から電流を流してみる。説明を明確にするために左右の接合が完全に同じとする。磁場がないと左右の接合を流れる電流 i_1 と i_2 は同じになる。このとき、ジョセフソン接合を流れうる臨界電流は I_c なので、 i_1 と i_2 が同時に臨界値 I_c に達する。それで外部から流れ込む電流がすべて超伝導電流として接合を通過できる最大値は $2I_c$ となる。次に、外部から磁場がかかり、SQUIDを貫く磁束が Φ_0 の整数倍でなくなると、量子効果によって、SQUIDを一周する超伝導電流が生じる。この電流により、接合を流れる超伝導電流 i_1 と i_2 は異なる値になり、 i_1 と i_2 のうちどちらか大きいほうが先に臨界に達してしまう。そのため、 i_1 と i_2 の和は $2I_c$ には達しない。すなわち、第18図のように外部から電流を流したときに、接合両端の電圧がゼロのまま流れうる外部からの電流の最大値は、磁場0のときより減ってしまうのである。だから、外部からSQUIDに電圧ゼロで流しうる臨界電流を測れば、磁束 Φ_0 の整数倍になるたびに $2I_c$ となり、半整数倍^{*}になると最小になる。

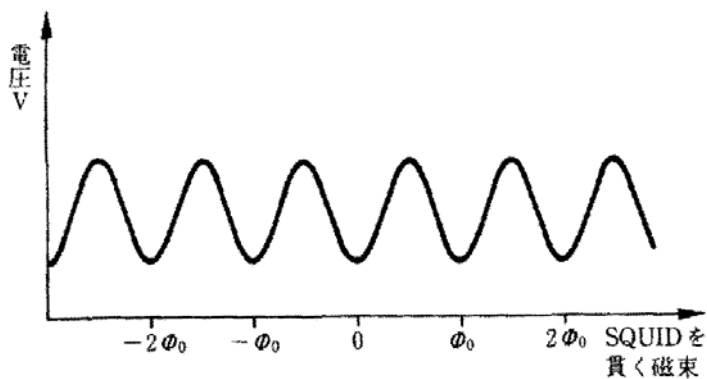
^{*}半整数とは、整数+1/2のことをいう。

これを観測するために、外部から無理やり $2I_c$ 以上の一定電流を流しておき、SQUIDの両端電圧 V を測定してみる。^{*} 全電流が $2I_c$ 以上なので、超伝導電流以外に常伝導電流が流れて、両端電圧が0でなくなっている。磁束 Φ が変化し、 Φ_0 の整数倍になると超伝導電流が最大になり、常伝導電流が最小になるので、両端電圧 V は最小になる。磁束 Φ が Φ_0 の半整数倍になると超伝導電流が最小となり、両端電圧 V は最大となる。この電圧 V の観測結果は、第19図のように山谷ができ、磁束 Φ を Φ_0 単位で測定できることがわかる。この電圧の山から山への間を一万分の一に分解できれば、フラクソンの一万分の一、すなわち約 $\frac{1}{10} \times 10^{-10}$ ガウス・cm という極小の磁束が測れるのだ。一〇平方ミリメートルぐらいの面積のSQUIDを作れば、地磁気の一〇億分の一という小さな磁場の検出も可能になるのだ。このように、SQUIDは新しい驚異の目を人間に提供してくれた。

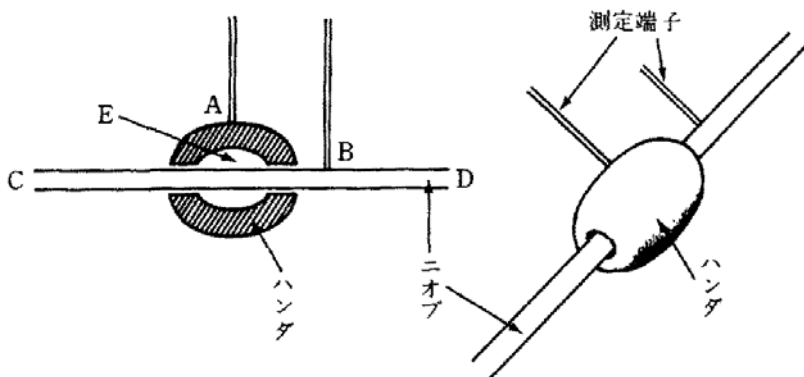
さらに、一九六六年、クラークによって考案された単純な構造ですごい性能をもつ素子がある。それは、第20図のように、ニオブの針金にハンダをつけただけのもの^{***}で、誰でも簡単に作れる素子だ。AB間を通常のSQUIDとみると、空間Eを通る磁束によって、AB間の臨界電流が変化する。この磁束は

* SQUIDによる測定方法は、日本物理学会編『超伝導』（丸善）を参照されたい。

*** ニオブ線とハンダはなじみにくく、ごく薄い酸化絶縁膜がニオブとハンダの間にできる。このため第20図のようにハンダAとニオブ線Bの間に、2か所以上のジョセフソン接合ができたことになり、図のEの部分が、SQUIDの磁束の通る穴になる。



第 19 図 SQUID による磁場の測定例



第 20 図 SLUG

(左は断面図，原理は SQUID と同じで，第 18 図の上半分はこの図の A のハンダ部にあたり・第 18 図の下半分がニオブ線にあたる。ハンダ・ニオブ間にジョセフソン接合があり，中の空洞部 E が SQUID のリング内部の穴にあたる。この空洞部 E へは外部の雑音が入ってこず，CD を流れる検出用電流のみが磁束を作れる)

C Dを流れる電流によって作られる。今、C D間に測定する微小電圧をかけると電流がC D間に流れ、A B間の臨界電流が変化する。この変化を見ると、 ϕ 間の電圧を検出することができる。この原理を使って、10⁻¹⁰ボルトの電圧検出も可能になっている。この素子はS L U Gと呼ばれ、クラークはこの素子の発明によって、一九八七年のフリッツ・ロンドン賞を受賞した。今日では、これらのジョセフソン素子の種々の応用が、想像を絶するような微弱測定分野を開きつつある。

第5章 高温超伝導の発見

一九八七年、この年は、技術の世界にとって記念すべき年となった。というのは、高温（セラミック）超伝導体^{*}が発見されたからだ。高温といっても、今までの超伝導体に比べて高温という意味で、マイナス一八〇度Cもの低温でやっと超伝導になるのだが、これでも今までのものに比べて画期的に高い温度なのだ。それまでは、超伝導状態を作り出すのに一リットル二〇〇〇円もする液体ヘリウムで冷やさねばならなかった。ヘリウムは資源的にみても、あまり豊富ではない。それが、一リットル五〇円以下の液体窒素で冷やせば、超伝導状態になる物質が見つかったのだ。このことは、前章までに述べた利用価値の高い超伝導現象をあらゆる産業で利用できることを意味する。この無限の可能性を秘めた高温超伝導を、企業が見逃すはずがない。超伝導フイバーが世界中に巻き起こった。

^{*}これは、その特長から、高温超伝導体、セラミック超伝導体、酸化物超伝導体などと呼ばれている。

NECのある研究者は、「われわれは、室温超伝導が発見されるまで座して見ているわけにいかない。すでに見つかった九〇Kでの超伝導体でも、充分コンピュータ素子として生かせる画期的な新素材だ」と語っている。住友金属の一研究者は、「高温超伝導に追いまくられて、忙しくて忙しくて」と語り、シャープ株式会社の社員も、「わが社は、高温超伝導体を利用して、超伝導磁気抵抗素子をすでに開発した」と意気さかんだ*。中小企業でもこのフィーバーに感染したところが結構多い。この新物質は誰にでも比較的容易に作れ、またいろいろな成分を変えたり、製作条件を変えることにより千変万化する。この魅力が、多くの人をとらえて離さない。

さて、この物質がどのようにして発見されたのかをみるために、発見者のベドノルツとミュラーのいるIBM・チューリヒ研究所を訪ねてみよう。

ベドノルツとミュラーの出会い

IBM・チューリヒ研究所は、ヨーロッパにおける基礎研究所として、一九五六年に設立された。それは、スイスの美しい自然にいだかれ、チューリヒ湖

* これら企業の研究者からの発言は、著者の友人から集めた。

畔の丘の上に建っていた。建物は広々とした草原と木立にかこまれ、時折、散歩する人々の姿が見られた。

研究部門は、固体工学、通信・コンピュータ科学、物理の三グループに分かれていた。一九八二年、この物理グループに、博士号をとったばかりの若者、J・G・ベドノルツが就職してきた。当時の物理グループマネジャーは、K・A・ミユラーであった。このグループでは、総勢三三名の研究員が、四つのテーマに分かれて研究していた。ベドノルツは、入社当初、日本から同研究所に滞在していた九州大学の大濱順彦氏と、長年使われずほこりをかぶっていたX線回折装置を修理したりしていた。薄膜結晶の試料を作るのも彼の仕事であった。このベドノルツが、ミユラーの指導のもとに、一九八三年夏頃から新しい超伝導体の探索を開始したのだ。

ミユラーは、若い頃から、ペロブスカイト構造のチタン酸ストロンチウム(SrTiO_3)を、長年研究していた。これは、無色の結晶で誘電材料として使われており、絶縁体である^{**}。この物質の親戚にチタン酸バリウム(BaTiO_3)があり、これは、小型コンデンサーに使われ、家庭用テレビ、ステレオなどの中に数多く組み込まれ、われわれに身近な物質である。

*文献 13) 参照。

**この物質を高温処理すると酸素を失い、黒色となり、導電性を増す。この導電性のあるものの中には、0.3K くらいの低温で超伝導性を示すものもある。

ミュラーとベドノルツは、このペロブスカイト構造の物質群のなかで、超伝導になる物質を探し始めた。よりもよって、絶縁体としてのほうが有名な物質のなかから超伝導を探さんて気違いじみていると、読者のみなさんも思われるだろう。しかし、キャラバーティという人の仮説があつて、超伝導相が金属と絶縁体相の境界近傍に出現するという理論的予想があつた。そして彼らの調べた物質群は組成を少し変えたり製法を変えたりすると、絶縁体になったり、導体になったりするという特長をもっていた。すなわち、キャラバーティの予想では、超伝導になるのが有望な物質群であつた。

また、彼らの扱った物質群は酸化物で、ミュラーの考えによれば、高温超伝導の見つかる可能性の高い物質群でもあつた。ミュラーは次のように述べている。「発見はマジックでも何でもない。金属間化合物の超伝導転移温度が、一九一一年の水銀以後一九七三年まで徐々に上昇したのに対して、酸化物の転移温度は急激に上昇していることにただ気がついたからである。……酸化物の転移温度上昇率が非常に大きいので、ある時点で金属間化合物の転移温度を追い抜いて酸化物のほうが高くなることを予想した^{***}。しかし、この予想は一般的なものではなく、彼の洞察力のたまものというほかない。

* 1964年、チタン酸ストロンチウムが還元されたとき、0.3Kで超伝導になることがわかった。これが最初の酸化物超伝導体である。その9年後 LiTiO_4 が発見され、2年後 Ba(Pb, Bi)O_3 が見つかった。転移温度は13Kであつた。後者が東大、田中昭二教授のグループが精力的に研究したものである。

*** 文献14) 参照。

この方針に従って、ベドノルツはランタン・アルミ・酸素 (LaAlO_3) とランタン・ニッケル・酸素 (LaNiO_3) を混ぜ合わせ^{*}、新しい物質を作ることから始めた。くる日もくる日も彼は乳鉢でこの物質をこまかくくだき、混ぜ合わせ、焼き固めた。この光景を他人が見ると、彼が同じような単調なくり返しを飽きもせず続けているのは、まことに奇妙に映ったかもしれない。しかし、ベドノルツにとっては、心そそられる毎日であった。

新しい物質が焼き上がるたびに、炉の扉を開ける。その瞬間は、何ともいえない気持ちの高ぶりを覚える。思いどおりのものができていてほしいと期待しながら、新しくできた試料を見る。試料の色は、その電気伝導性を表している。透明なら光を減衰させないから、おそらく電気を流さない絶縁体だろう。黒ければ、炭素と同様に電気を通すだろう。金属光沢があれば、もつとよく電気を流すにちがいない。彼は、炉から出した物質をためつすがめつ眺めた。試料の一部にでも、目標の物質ができていればよいからだ。満足なものがないと、今までの成分の混合比、焼くときの温度や時間を改め、何度もねばり強くやり直してみる。こんなくり返しで、またたく間に一年、二年と歳月がたつていった。一九八五年の暮れまでは、失敗の連続であった。

* 文献 15) 参照。

その年の十二月、ベドノルツは行きづまりを打開するために、手かかりがな
いかと思って、文献を探してみた*。その時、一つの文献が彼の目にとまった。
それには、ミツチエルらが化学の触媒の研究で見つけた物質の実験が報告され
ていた。その物質は、ランタン・バリウム・銅の酸化物で、彼になじみ深いも
のであった。というのは、それまで手がけていた物質のアルミ・ニッケルのと
ころを、バリウム・銅に置き換えただけの物質であったからだ。

ミツチエルらのデータによると、この組成の物質は、温度を上げると酸素が
結晶から逃げ出し、下げると酸素がもどてくるというおもしろい性質をもつ
ていた。彼らはまた、マイナス一〇〇度Cまで冷やして、電気伝導度も調べて
いた。それらのデータは、ベドノルツとミューラーが目標にしていたものとびつ
たり合っていた。ベドノルツは、その時、この物質をもつと低温にすれば超伝
導になるのではないかと思った。彼はいつになく興奮して、図書室を出てきた。
彼の中に何か熱いものが走り始めたようであった。

* 文献 16) 参照。



J. G. ベドノルツ

最初の電気抵抗の低下を、超伝導の兆しと見抜いた彼の眼力が、高温超伝導という革命を導いたといえる。趣味は料理。研究に失敗したらコックになると言っていたそうである。

一三年ぶりの超伝導温度の更新

彼は早速、この物質を作ってみた。作り方には、すでに充分精通していた。それでも各元素の配合比率に未定なところがある。均一に混ぜたつもりでも、でき上がった物質は、こまかい微結晶の集りとなり、その部分部分で組成が変わっているという複雑なものだ。こんなわけで、彼は試料をできるだけ多く作ってみた。

試料ができたなら、液体ヘリウムで冷やして電気抵抗を測ってみる。抵抗を測るために、試料に線を取りつけるのが、なかなか難しい。四端子法と呼ばれるやり方で、接触部の抵抗の影響を避けて、試料そのものの抵抗を測るように工夫するのだが、それでも線の取付けには注意が必要だ。初めは抵抗変化が見られなかったが、一九八六年一月二十七日、多くの試料のなかに、低温で急に電気抵抗が下がるものが見つかった。^{*}一三Kから四Kの間で抵抗が半分に落ちるだけで、ゼロにはならなかった。それでも彼は、自分たちの目標としていた物質がとうとう見つかったと思った。

^{*}文献 17) 参照。

それからの一日、一日は、熱に浮かされたような日々であった。試料の良し悪しは、半分は色で判断できるようになったが、最終的には、液体ヘリウムで冷やして測定しないとわからない。この測定には、最低一日の時間が必要であった。何度も失敗を重ね、ついに一三Kで電気抵抗がゼロになる試料が得られた。しかも、これは三五Kから急に電気抵抗が下がり始めるので、おそらく三五Kでも試料の一部が超伝導になっているのではないかと思えた。

時間をかけて良い試料を作る方法を開発すれば、三五Kで電気抵抗ゼロのものが作れるにちがいない。もしこれが本当なら、大変なことなのだ。今まで見つかったいた最高温度の超伝導物質は、3ニオブ・ゲルマニウム(Nb₃Ge)であった。一九七三年、ギャバラー^{*}がその薄膜を作り、二三Kで超伝導状態になることを確認している。だから、ベドノルツの作った物質は一三年ぶりに、超伝導状態の温度の最高記録を一二Kも上回り、更新したことになる。

彼は、ミュラーにすべてのデータを見せた。ミュラーは、まずプライオリティを取るために、論文を書くことを勧めた。試料の作り方を改良して、電気抵抗がゼロになる温度を上げるようにすることも必要だが、プライオリティの確立が先だ。三月中旬から、実験を中断し、論文を書き始めた。ベドノルツは、急

*文献 18) 参照。

にたばこをのむ量が増えた。この新物質の発見は、きつと多くの研究者に衝撃をもたらすであろう。そして、他の研究者が即座に同一の物質を作り、改良してくるだろう。彼らは三五Kで抵抗ゼロのものを作り出すかもしれない。もしそうになったら、自分たちのものが、3ニオブ・ゲルマニウムの二三Kさえ超えていない一三Kでやつとゼロ抵抗になるのは、とても見劣りがする。こんな状態で発表してもいいのだろうか。だけど、発表しなければ、誰かが見つけてしまいかもしれない。不安にかられては、たばこに火をつけ、気持を落ち着かせ、少しでも早く論文を仕上げようと自分に言い聞かせるのであった。

彼らの論文は四月中旬にでき上がり、どの雑誌に投稿するかが問題になった。投稿した原稿のコピーが、印刷される前に出回るといいうやなうわさがあった。もしそんなことにでもなったら大変だ。そのコピーを見た人が、より改良した実験をして、別の専門誌に発表し、そちらの論文のほうが自分たちのよりも先に公表される危険さえあった。この新しい型破りの実験を、形にとらわれて掲載拒否したり、情報を漏らしたりしない雑誌を選ぶ必要があった。四月十七日、彼らはその論文をドイツの雑誌に投稿したのである。

*文献 19) 参照。

日本人研究者との協力

この頃、ベドノルツの部屋には、もう一人の研究者がいた。その年の二月にIBMから招待を受けて、日本から研究に訪れた高重正明さんである。ミュラーの隣の部屋に、ベドノルツと高重氏は机を並べるようになった。しかし、四月下旬まで高重氏は別の仕事をしており、ベドノルツの新超伝導物質の発見は知らなかった。

ある日、ミュラーが彼に、「君は、ベドノルツの結果を信じるか？ ……即答できないのは無理もない。自分だってまだ信じているわけではない。でも、やってみないか。……君は、誘電体の論文はすごいぶんと書いてきたようだが、この辺で、他の分野のことも勉強してみてはどうか。まだ若い。もしこの物質が贋物であり失敗したとしても、古巣には簡単に戻れるよ^{*}」と言った。彼はこの研究に参加することに同意し、三人の研究が始まったのだ。

高重氏は、当時のことを、ベドノルツへの思いやりを込めて次のように語っている。研究所へ「到着間もなく、ベドノルツの実験室の机の中の数多くの試

* 文献 20) 参照。

** 文献 21) 参照。

料の残骸を見て、彼が何をしてきたかを直ちに理解することができた。……この種の経験主義的探索は、論文を適当に生産しなければならぬ宿命の若い研究者にとって厳しいものである。というのは、うまく何か見つかればいいもの、たいていは何も出てこないからである。出てくるものは、ただ試料の残骸のみ、しかし、探してやろうという積極的意志がなければ、もちろん何も出ない。ベドノルツ・ミュラーの場合は、この意志があつたことはまちがいないことである。さらに、ベドノルツが、確定的実験が欠けている不安から、急にたばこの量が増えたのを見て、「そのように苦しんでいる人間に対し、それはおもしろい、オレにもやらせろ、とは言えまい。ただいっしょにスモッキングするのみであつた^{*}」と述べている。

五月以後、高重氏を加えた研究が始まった。条件を変えて、いろいろなサンプルが作られた。それらの抵抗特性、粉末X線解析、組成分析、各種熱処理効果の分析が詳細に行われ、電気抵抗ゼロの温度も徐々に上がっていった。論文が発表されれば、他の研究者との競争になるだろうが、二つのことだけはこのチューリヒ研究所の三人のグループでやりとげたいと、ミュラーは常々言っていた。その二つとは、この物質が確かにマイスナー効果をもっていることを確

*文献 22) 参照。



K. A. ミュラー

「自分はこの発見（高温超伝導）がなくても物理学者としての人生に満足していた」という彼の言葉が象徴するように、ヨーロッパの科学者としての強烈な誇りをもった人。趣味はスキーで、その腕は超一流。

認するのと、超伝導になっている相の構造を確定することであった。

研究所には、マイスナー効果を測定する装置さえなかった。日本の大学で超伝導を研究するところなら必ずある装置も、ここにはなかったのだ。発注した装置が来て使えるようになったのは、予定より一か月半も遅れた九月二十日過ぎのことであった。第一論文はすでに公表されており、他の研究者の追撃が始まっているはずだ。三人には、もう時間がないのだ。すぐさま新しい装置による測定が開始された。彼らが気負ったわりには、意外にあっさりと、新物質のマイスナー効果が確認された。永久電流による磁束の閉じ込めも確認でき、まちがいになく超伝導物質であることもわかった。三人は、やっと落着きをとりにどした。

この頃、ミュラーは、よく二人を昼食後の散歩に連れ出し、今後の研究の方針などを話し合った。三人はとても幸せな気分で、木立のなかを歩いたり、丘の上からチューリヒ湖を見下ろしたりした。第二論文は、三人の連名で、十月十七日、『ユーロフィジックス・レターズ』に投稿された。

高重氏には、三人の研究のペースが少し遅いのではないか、という一抹の不安があった。十一月に入ると、バリウムをストロンチウムやカルシウムに置き

*文献 23) 参照。

換えて、より高温の超伝導が得られないかを調べ始めた。十一月中には、それらの超伝導性を確認できた。十一月末、研究が東京でスタートしていることを新聞で知り、C・W・チュウ教授からは、ヒューストンでも新物質が超伝導になることを確認したという手紙が届いた。^{*}世界中で、新しい超伝導物質の研究が始まったのだ。三人は、追いつけられなくなる立場になっていた。各元素を、少なくとも同族の元素に置換してみる必要があったが、彼ら三人がその競争に勝つためには、もっと研究のテンポを上げなければならなかった。

世界的なフィーバー

東大工学部、田中昭二教授のグループは、酸化物超伝導体を長年手がけてきた。それは、バリウム・鉛・ビスマス・酸素の化合物で、一三Kで超伝導になる物質であった。その構造は、むしろ絶縁体である強誘電体と類似しており、それが超伝導になるのは非常に特異なことであった。田中教授はこの特異性に魅せられ、一九七五年頃からずっとその研究を続けてきていた。

田中研究室の北沢助教が、ベドノルツ・ミューラーの第一論文を見たのは、

^{*}文献 24) 参照。

一九八六年十月のことであった。今まで高温超伝導物質だと発表されて、再現されないまま消えていった物質が数限りなくあった。それで彼は、この論文の物質が本物の超伝導かどうか信じかねていた。十一月になって、同研究室の内田講師、高木助手、当時四年生の金沢さんらが追試実験することになった*。

セラミック作りやマイスナー効果の測定は、田中研究室の人々には手慣れたものであった。一週間もすると超伝導体ができ、マイスナー効果の確認もなされた。ベドノルツ・高重・ミュラーの研究の進行状況に比べ、その早さは驚くべきものであった。本物の高温超伝導であることが十三日にわかると、研究室中に興奮が走った。十四日からは、二四時間泊り込みの臨戦態勢がしかれた。

十一月二十八日、異例の記者会見が行われ、ベドノルツ・ミュラーの発見した物質が、本物の超伝導物質であることを発表した。ジャーナリズムの世界を通じて、超伝導フィーバーの幕開けを宣言したのだ。次いで東大笛木和雄教授のグループが、バリウムをストロンチウムに置き換えて、三七Kで電気抵抗ゼロを記録した。記録合戦が始まった。年が明けて、競争は一段と激化した。もう論文による発表は、時間がかかりすぎて間に合わない。新記録は、新聞、テレビなどのジャーナリズムを通じて、全世界へ報道された。超伝導温度の上限

*この辺のいきさつは、日刊工業新聞科学技術部編『超伝導最前線』p.9に詳しく述べられている。

は、じりじりと上がっていった。

一九八七年二月十六日の新聞は、米国、ヒューストン・アラバマ大のグループ、チュー教授らが、九〇Kを超える温度で超伝導になる物質を発見したことを報道した。この温度は、特別な意味をもっていた。それは一気圧での液体窒素の沸点七七Kを超えていたからだ。今までの物質はすべて、液体窒素温度で超伝導状態にはならない。この新物質が、世界で初めて、液体窒素温度で超伝導になったのだ。この瞬間、超伝導研究は基礎から応用へと大きく変身したのである。無尽蔵で、一リットル五〇円以下という安さの液体窒素で超伝導が実現できるのだ。これを企業が見逃すはずがない。高温超伝導のフィーバーは、企業の研究所をも巻き込んだ巨大な輪として拡がり始めた。

チュー教授らの作った新物質は、特許の関係でその組成が明らかにされなかった。それで、日本でも中国でも同様な物質を求めて研究が続けられていた。東大教養学部・氷上忍助教授も、高温超伝導物質を探し求めている。^{*}彼は、イー・ヘンリー著の『電子セラミックス』という本に書かれているイットリウム・鉄・ガーネットにならって新物質を作ってみようと思った。彼は、イットリウム(Y)と銅(Cu)に、ストロンチウム(Sr)を混ぜてみた。著しい抵抗減少が

*文献 25) に発見の経過が詳しく書かれている。

見られたが、絶対零度近くでも残留抵抗があった。二月二十一日、ストロンチウムをバリウム（Ba）に換えて焼いてみた。できた試料の抵抗は八〇Kぐらいから下がりはじめ、四〇Kでゼロになることがわかった。ついに、室温を超え、超伝導体を見つけたのだ。早速、論文を書き、J J A P のレターズに投稿した。また新聞発表もしたが、やはり物質は公表せず、秘密のままであった。

折しも、二月二十六日、『人民日報』紙上に、中国科学院物理研究所が、新超伝導物質を発表し、イットリウム・バリウム・銅・酸素より成ることが、世界中に報道された。新超伝導物質のベールがはがされ、世界各地でまたたく間に同様な物質が作られ、超伝導フィーバーはその頂点を迎えたのである。

第6章 未来への発進

トランジスタ効果が発見されてから約六〇年で、半導体がわれわれの生活のすみずみに使われているのを見ると、超伝導体も、遠からずわれわれの日常生活に浸透してくるように思える。その頃には若者たちは、「量子を単位に測れば簡単だ」「量子効果で磁束をピンニングすればいい」「結線部の発熱？ そんな大昔の話は知らないね」「医療機器はジョセフソン素子で」……などと、気楽に話しているかもしれない。超伝導の性質は、半導体に比べてもはるかに多様なので、弱電から強電まで、大変な変革の時代が訪れるかもしれない。この夢の最前線を見てみよう。

*弱電とは、小電力の分野で電気回路を中心としたコンピュータ、通信機器などの分野をさす。強電とは、大電力を扱う分野で発電機、交通システム、モーターなどの分野のことをいう。

高温超伝導体のその後

イットリウム (Y) ・バリウム (Ba) ・銅 (Cu) ・酸素より作られるセラミックは、九〇K付近で超伝導状態になる。この物質の性質は、発見から一年ほどの間によくわかってきた。これを使った応用研究が、各企業で精力的に進められている。

もう一つの動きが筑波で始まった。金属材料技術研究所筑波支所の前田、田中、福富、浅野さんたちは、希土類の元素を使わない、セラミック超伝導体を新しく発見した。^{*}ベドノルツ・ミユラーの発見した超伝導物質と同系列ではあるが、ビスマス、ストロンチウム、カルシウム、銅、酸素 ($\text{BiSrCaCu}_2\text{O}_x$) を組成としている。しかも、温度を下げていくと、一二〇Kぐらいから抵抗の減少が見られ、一〇〇Kクラスの超伝導物質になっているらしい。さらに、アメリカ・アーカンサス大学のグループが、タリウム (Tl) 系の新超伝導物質を発見した。その組成は ($\text{Tl}_2\text{Ca}_2\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) で、一二五Kで超伝導になる。

さらに多くの物質が調べられた。1992年には、Putilin, Antipov, Chmaissem, Marezio により、 $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4-x}$ が 94K で超伝導になることが発見され、彼らの論

* 文献 26) 参照。

文は、Nature の 1993 年 3 月 18 日号に公表された。即座に追試と改良が始まった。スイス ETH の Scilling, Cantoni, Guo and Ott がカルシウムを加えた新物質を研究したのだ。すなわち、 $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{1+x}$, $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+x}$ を含んだ物質が、130K を超えた温度で、超伝導になることを発見した。この論文も、Nature の 1993 年 5 月 6 日号に公表された。その後、この物質は、135K で超伝導になることが示され、圧力をかけると、160K で超伝導になることが分った。2006 年の時点では、この温度が超伝導物質の最高温度である。しかし、Scilling が述べているように、 Hg 系は当初期待されたほどではなく、ちよつとした磁場で、超伝導が壊れてしまう欠点があった。そのため、応用上は有望でなくなった。酸化物超伝導物質の分野は、元素の置換えによって、新物質が続々登場している。新超伝導物質の発見された数を各年別に示すと、1986 年に一種類、87 年に二種類、88 年に 16 種類、89 年に 5 種類、90 年に 4 種類、91 年に 3 種類、92 年に 3 種類が発見されている。(脚注 Nature 1993 年 3 月 18 日号、204 ページ) 応用上は、室温で超伝導になる物質ができれば、事情が一変する。そのため、世界中で室温超伝導を探す競争が展開されているが、今までのところ成功していない。そんな中で酸化物ではなく、金属合金で新しい超伝導体が発見された。

新しい金属超伝導物質の発見

2000年、青山学院大学の秋光研究室では、四年生の卒業研究が行われていた。秋光純 先生が、永松純 君に出したテーマは、ホウ素、マグネシウム、チタンの合金を作り、低温でその電気抵抗を測ることである。秋光先生の目標は、金属の超伝導物質を見つけることにあった。よく使われている超伝導物質が、ニオブ・チタンであるので、チタンを入れて調べることにした。また、ホウ素（ボロン）は、秋光研究室では、十年ほど前から調べられていた物質である。秋光先生は、三つ目の元素は、マグネシウムかカルシウムだと考えていた（脚注 sascom Special Interview 秋光談話）。結局、マグネシウム、チタン、ホウ素の三つの元素の配合の中に、超伝導を示す金属が見つかるのではないかと、卒業研究のテーマにした。

永松氏は、いろいろな配合の試料を作り、実験を行った。2000年6月頃に18Kぐらいの温度で、超伝導の兆候（脚注 sascom Special Interview 秋光談話）が見られた。配合した物質をできるだけ均一にして合金を作るのだが、部分部分で組成の違う物質が混ざってできることがある。そこで、ひよっとしたら、

一部分に目的の超伝導物質ができたのではないかと考えた。それが混ざって、測定されたため、超伝導の兆候が得られたのではないか。秋光先生は、永松氏に配合比率を少しずつ変えて、測定を継続するように、指導した。

しかし、その後の状況は、思わしいものではなかった。永松氏はいろいろ奮闘したが、時間がたつていった。研究とはこういうものだ。やれば必ず結果が出るという仕事ではない。ほとんどの場合、予想した結果は得られず、徒労に終わるものである。それを何度も経験しながら、成功するまで続ける執念が必要であった。永松氏の場合は、卒業研究の発表が次の年には控えていた。それを行わないと卒業できない。そのため、今やっている実験がうまくいかなかったら、卒業研究のテーマを変える必要があった。

2000年10月に、手元に残っていた6つの試料が、超伝導になるかどうかを、調べることにした。テーマを変えるぎりぎりのタイムリミットであった。うまくいかなかったら、この系の実験はやめようと思っていた。夜中に、それらの試料を実験装置にセットし、自動測定されるようにすべてを整え、自宅に帰った。翌朝、計測された結果を見ると、その試料の一つが、超伝導を示していた（脚注 日経サイエンスNo.32 永松氏の談話）。しかも、その物質は、3つの元

素からなるものではなく、彼が最後の挑戦として作っておいたホウ素とマグネシウムを結合させたものであった。

秋光研究室では、綿密な追試が行われていった。発表の時期が大切であった。この物質は誰でも入手できるため、情報が漏れればすぐさま競争相手が実験し発表してしまう危険性があつた。翌年の一月十日には、仙台で、研究会が開かれる。それに照準を当てて、それまでに確実な結果を出し切ることが必要であつた。そこで、詳細な実験をするために、研究室全体の力が集められた。その後の精密な測定から、物質は、 MgB_2 で、超伝導になる温度は、約 39K であることが分つた。一月十日に発表された情報は瞬く間に世界を駆け巡つた。

アメリカからは、非常に早い応答があつた。ホウ素（ボロン）には、中性子の数の異なる同位元素がある。質量数 10 の ^{10}B と質量数 11 の ^{11}B である。アイオワ州ポールキャンフィールドのアイオワ州立大学でも、実験が行われた。S. L. Bud'ko, G. Lapertot, C. Petrovic, C. E. Cunningham, N. Anderson, and P. C. Canfield のグループが $\text{Mg } ^{10}\text{B}_2$ が 40.2K 以下の温度で超伝導になり、 $\text{Mg } ^{11}\text{B}_2$ が 39.2K 以下の温度で超伝導になることを明らかにしたのだ。同位元素効果が発見され、BOS メカニズムで超伝導になっていることが分つた。（脚

注：第3章「超伝導の本質」で書いたアイソトープ効果である。超伝導になるための電子対を作るのに、音波（格子振動）が介在していることが分る。）この論文は、Physical Review Letters に2001年1月30日に投稿され、2月26日、その雑誌に公表された。秋光先生らの論文は、まだ公表されていなかった。有名な雑誌Nature に投稿していたが、その投稿の日付は、2001年1月24日である。しかし、公表されたのは、2月1日号であった。これほどの早さで、アメリカが追い上げてきたことは、不思議である。結局、この分野での競争は、かくも、しれつなものであることが分る。生き馬の目を抜くようなところがある。研究者は、このような緊張感の中で、仕事をしている。

青山学院 NEWS Vol. 6 には、秋光先生の談話として、次のような謙虚な発言が載っている。「超伝導性に関わりのある物質であるチタンを抜いてしまおうという発想は、我々にはできなかった。いや、本当にラッキーでした。永松君のおかげです」と述べられている。同じ記事に、永松氏の談話も載っており、「物理学の発見というのは、往々にして偶然の積み重ねの上に生まれるものです。そして、その偶然を手元に引き寄せるためには、その時々で自分のやるべきことをしっかりとやる以外ありません。今回の発見は、僕にそうしたことの大切さ

を身に染みて感じさせてくれました」と述べている。

この物質は、化学実験で使うありふれた試薬であり、誰でも手に入れることができる。しかし、それを低温にして電気抵抗を測ることは、それまで、誰もやらなかったのである。このような物質が二十一世紀まで残されていたことに驚きを感じた研究者が多い。1元素からできた物質が超伝導になるかどうかは、すべて、調べ尽くされている。秋光研究室の結果が出るまでは、2元素から作られた物質も、調べ尽くされていると考えられていた。そのため、ほとんどの研究者は、3元素以上からなる物質を合成して、超伝導になるかどうかを調べていた。そのような中で、秋光研究室の発見は、我々に自然の奥深さを改めて気づかせてくれた。簡単な物質でも調べ尽くされていないことが分り、多くの若者に、勇気と希望を与えている。

応用の広がり

今回発見された物質は、2ホウ化マグネシウム (MgB_2) で、金属である。そのため加工性に優れている。第5章で述べた高温超伝導体は、酸化物だったので、割れやすく加工するのが大変であった。このことは、応用上じつに重要な

ことである。高温超伝導体が発見されて、約二十年の歳月が流れたが、磁石を製作するためにコイルの線材を作るのは、今でも難しい技術である。やっと、高温超伝導体の電流リード線が実用化されているぐらいである。

ところが、今回の MgB_2 は金属であるので、容易に加工できる。発見から、半年近くで、物質・材料研究機構の熊倉浩明グループが MgB_2 を線材化するのに成功している。異例のスピードである。ステンレス管に MgB_2 の粉末を詰め込み、平ロールで、圧延加工を行い、テープを製作している。そのテープは、五テスラ(5T)の磁場中で $12,000\text{A/cm}^2$ の電流を流すことができる。この成果を受けて、2002年3月、日立研究所は、10m クラスの長さの線材を製作する技術を開発し、コイルを作り、超伝導電流による磁場発生に成功した。その後も、応用研究が活発に行われている。

今回発見された MgB_2 は、実用上、非常に優れた性質を持っている。

(1) まず、安価である。ホウ素やマグネシウムは、地球上には大量に存在し、安価に入手できる。さらに、加工も比較的容易なため、現在、医療診断用 MRI のマグネットに使用されているニオブチタンの線材に比べても、半分以下の費用で製造できると言われている。高温超伝導線に比べると、さらに安く製造で

きる。

(2) 超伝導になる温度は、高温超伝導物質より、ずいぶん低い、多用されている超伝導線ニオブチタンに比べると、20度以上も高い。この性質が実用上大切なのだ。超伝導マグネットを動作させるには、超伝導になる温度の半分ぐらゐの低温まで、冷やさないとけない。超伝導になる温度の近くでは、少し、磁場をかけると超伝導はこわれてしまう。強い磁場を作るためには、このように、低温が必要なのだ。今回発見された MgB_2 は、約30K以下で超伝導になるので、マグネットを作るには、約20K位の温度で使用する必要がある。現在の低温技術では、この温度を簡単に生み出すことができる。少し高度な電気冷蔵庫のようなもので、電気を使つて20Kの温度に冷やせるのだ。それに比べて、医療機器にたくさん使われている超伝導線のニオブチタンは、もつと低温にしないと強磁場を発生できない。その低温を維持するためには、液体ヘリウムが必要である。身体の断層写真を取る有力な方法に、核磁気共鳴画像診断(MRI)診断がある。(脚注 この原理は、後の節「体の中はNMR断層撮影で」で説明するので参照されたい。) そのため、MRIを使う病院には、液体ヘリウムが供給されており、診断費用が高価になってしまう。 MgB_2 では、液体ヘリウムの必

要がないのだ。勿論、酸化物高温超伝導物質で、2 T近くの磁場が発生できれば、さらに簡単になり、液体窒素の温度77Kでの運用も可能になる。おそらく、十数年もすれば、医療用超伝導機器は安価で、維持費もかからない、使いやすいものになるであろう。

酸化物高温超伝導体でも、材料の改良が続けられている。2004年には、京都大学 松本要先生が世界最高の電流密度で流すことのできる高温超伝導薄膜を製作した。Tcの液体窒素温度、5テスラで、20万アンペア/cmの超伝導電流を流すことが可能になった。数百メートルの実用材料にするのはまだまだ先のことだが、確実に材料の性能はあがってきている。また、モーターの製作や送電線の実用化も進んでいる。2004年12月22日には、福井大学と7つの企業で作った産学グループが、液体窒素で冷やした超伝導コイルで駆動するモーターを開発している。定格時12.5kWの高温超伝導モーターが世界で初めて回っているのだ。送電線についても、住友電工の開発が進んでいる。(脚注 電力輸送での実用化は、後の節「超伝導送電線」で説明するので参照されたい。)このような各種の実用化が進めば、非常に大きな変革が訪れるであろう。

生活を変える超伝導

前章で見てきたように、超伝導は、すでに、電圧標準、極微小磁場の測定、強磁場を生む超伝導磁石に応用されている。そして、高価格でも、高性能であればよいものにまず利用され始め、超伝導の真価を示しつつある。そこへ、高温超伝導体（セラミック超伝導体）や2ホウ化マグネシウムの超伝導性の発見によって、超伝導の利用が本格化しそうである。後ろの節で述べるように、医療機器では、すでに、急速に利用が始まっている。MRI診断が普及し、脳ドックを初めとして、体の各部分の断層写真が精密に取られ、診断や治療に役立っている。今後、超伝導を使ったさまざまな応用が加速されていくであろう。

超伝導発電機

現在使われている数十万kWの発電機は、非常に大型なコイルと磁石が必要で、巨大化にも限界があり、一五〇万kWぐらいが上限だといわれている。これを超伝導コイルで作ると、従来の液体ヘリウムを使うものでも五分の一以下に小型化でき、三〇万kW以上の発電機では、超伝導発電機のほうが価格面でも低額になるといわれている。^{*}前述したように、2004年に、高温超伝導体を使っ

^{*} 日本物理学会編『超伝導』（丸善）p. 301。

たモーターが回っていることを考慮すると、超伝導発電機の夢が現実になる時が近づいている。電気抵抗によるエネルギーロスもなくなるだろう。

リニアモーターカー

鉄道総合研究所は、超伝導磁気浮上式鉄道の開発を行っている。そこでは、液体ヘリウムで冷やしたニオブ・チタン線で作った超伝導コイルが使われている。列車に、ヘリウムの液化器を設置し、超伝導磁石を積んでいる。この新型鉄道は、高速運転時には、磁石の力で磁気浮上し、非接触で、空中を走行する。また、駆動力は、リニアモーター方式である。すなわち、地上に作られたコイルに電流を流し、列車上の超伝導磁石との間の力で推進力を生み出している。この地上の電流を変化させ、列車が動くのに応じて、常に、前進する駆動力を生じるように、制御しているのだ。山梨実験線では、1997年12月に、有人走行で531km/hの速度を記録し、無人で550km/hの世界最速記録を作った。その後、2003年12月には、有人で、581km/hの走行を達成した。また、相対速度1003km/hの高速すれ違い走行にも成功している。これに高温超伝導体やMgB₂が利用されれば、経済性が飛躍的に上がるだろう。

超伝導電力貯蔵

日本では、電力需要がピークになるのは夏期の冷房用で、深夜負荷の二・五倍にもふくれ上がっている。もし深夜電力を貯蔵しピーク時に使えば、現在より二〇〜三〇パーセント発電能力を下げてもよい。そこで、夜間電力で超導コイルに電流を流し、磁気エネルギーとして蓄える方法がある。それによれば、一〇〇万kWHの貯蔵には、直径一五〇メートルで中心磁場六Tの超伝導コイルを、地下数百メートルの岩盤で保持し、エネルギーを蓄えればよい。

各種磁気浮上輸送システム

室温超伝導ができれば、もつともつと気軽に磁気浮上が使われ、工場内の輸送システムにも使われるだろう。荷物専用輸送版として、大都市間をパイプでつなぎ、パイプ内を磁気浮上で、摩擦なしに荷物が高速輸送されるかもしれない。

超伝導送電線

現在、電力の送電ロス、五パーセントといわれている。従来の送電線を超伝導線に置き換えて送電ロスをなくす実験が開始された。2006年7月20日に、住友電工と3つの企業が、ニューヨーク州オルバーニー市で320Mの高温超伝導ケーブル線での送電実験を開始している。これが成功し、さらに安価になれば、海底に超伝導線を敷設して、外国から電力を輸入することもできる。そうすれば、外国にはまだ膨大な水力発電の潜在的能力があり、石油を輸入する代りに、電力を直接輸入する時代がくるかもしれない。地球上の資源の考えるとき、早く実現させたいものである。

ジョセフソンコンピュータ

現在の半導体素子の技術では、スーパーコンピュータの性能が限界に近づきつつある。限界の理由は二点ある。一つは素子の集積度を上げ高速にすると、発熱が多くなり、通常の空冷では間に合わなくなる。スーパーコンピュータでは、素子を直接液体冷却する必要が生じている。もう一つは、素子の動作速度の限界である。この二つの限界を超える夢の素子が、超伝導を使ったジョセフソン素子なのだ。接合間電圧が数ミリボルトでよく、1ボルト近くで動作して

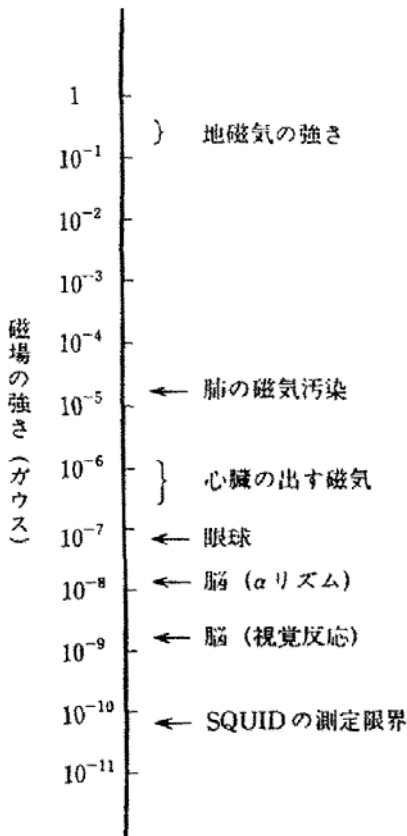
いる現在のLSIより、一万分の一以下の電力で動くので、発熱の心配はなくなる。そのうえジョセフソン素子の動作速度は速く、五ピコ秒ほどでスイッチングができる。一ピコ秒は一兆分の一秒で、光でさえ〇・三ミリしか走れない。こんな短時間に動作するので、今ある高速素子に比べても百倍以上高速なため、スーパーコンピュータの性能を一気に高めることができる。

NECの一研究者は、「液体冷却が必要になりつつあるスーパーコンピュータは、九〇Kクラスの超伝導を使ったジョセフソン素子に置き換えられる日が、間もなくやってくるかもしれない。液体窒素冷却による価格上昇も問題にならず、高速化のメリットは絶大である」と語っている。コンピュータ企業にとつて、高温超伝導は技術開発の最先端になりつつある。

医療機器はSQUIDで

SQUIDの説明のところで述べたように、SQUIDは地磁気（〇・三〇・五ガウス）の一〇億分の一、 10^{-10} ガウス（ 10^{-11} T）という信じられないほど小さな磁場を測定できる。この性質が医療に使えるのだ。人間は体内に微少な電流が流れており、それが微弱な磁場を作り出している。

第21図のとく、心臓の出す磁場が 10^{-6} Gaussぐらい、脳の出す磁場が 10^{-8} Gaussぐらいである。これらを測ると、各臓器の動きが詳しくわかる。例えば胎児の心電図は、母体の心臓からの信号で覆いかくされ識別困難だが、SQUIDで心磁図をとると、胎児のものだけを明瞭に測定できる。しかも磁場測定は体に接触せず、少し離れた所に感知器を置くだけでよい。未来の医療技術は、われわれがいま受けている診断とは非常に様変りしたものとなるだろう。



第21図 人体の出す磁気信号の強さ

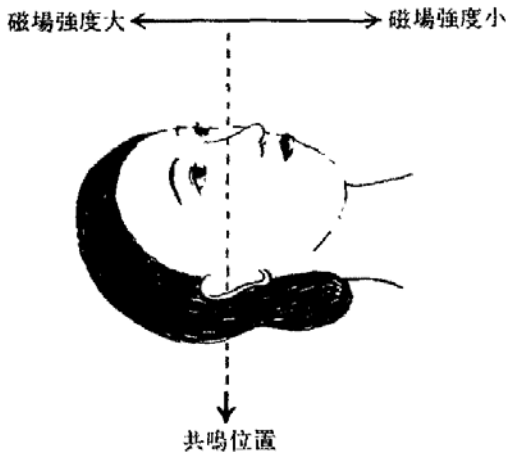
体の中はNMR断層撮影で

物質に強い磁場をかけて、同時に電波を当てると、各原子特有の周波数で電波の吸収が起きる。これは、原子核が固有の磁気モーメントをもっているため、磁場の作用下で、電波の共鳴吸収が発生するからだ。この吸収周波数は、磁場の大きさによっても変化する。それで電波の周波数を決めておくと、特定な強度の磁場のところの物質からのみ吸収が現れる。

今、第22図のように、人間の頭部に場所によって変化する磁場をかけてみる。例えば、頭の先端ほど磁場が強く、鼻、口、首となるに従い、磁場を弱くしておく。そこへ特定な周波数の電波を当て、吸収を測ると、特定な磁場強度のところ、すなわち第22図の点線部で表される断層部分からだけの吸収量がわかる。次に磁場変化を顔面のほうを強く、後頭部を弱くして、吸収を測る。さらに頭部の右耳を強く、左耳を弱い磁場にして吸収を測り、三次元的に各断面の吸収量が測定できる。この測定値をコンピュータ処理して、頭の中の各部分の吸収量が画像として見えるようになる。これを核磁気共鳴画像法と呼んでいる。英語では「Magnetic Resonance Imaging」で、その頭文字を取って、MRIと呼ばれ、

医療診断には欠かせない存在になっている。脳ドックでの診断などがその典型である。

さらに、電波を切ったとき、共鳴状態の原子が電波を放出して元へもどる時間を測定すると、その原子の分子内での結合状態がわかる。例えば、がん細胞内の水素原子と、正常細胞内の水素原子とでは、この時間が違うのだ。がんの体内での分布を画像化できるのだ。高温超伝導コイルによる強磁場が得られれば、体内のすべての部分のより細かい画像が、より安価に、どんな病院でも見える時代が訪れるだろう。現在、診断に使われている各種のX線写真、X線断層撮影、胃の透視撮影などは、放射線の悪影響があるが、必要悪として使われている。しかし、一九八七年になって、広島、長崎の原爆がもたらした人体への放射



第 22 図 NMR 断層撮影

線の影響が洗い直された。その結果、放射線影響研究所の報告によると、放射線によるがん発生率が高くなり、その死亡危険率は、従来の値の四〜六倍以上になることがわかった。このようにX線を含めた放射線の危険度が思いのほか高いことがわかつている。X線撮影に代わって、高温超伝導や MgB_2 の利用により、一日も早く、MRI断層撮影がもっと安価で簡便なものになってほしい。

その他の応用

このほかにも、微小電圧を測れるSLUG、精密な標準電圧を発生できるジョセフソン接合アレーなど、利用価値の高いものが目白押しでひかえている。IBMの作ったクイテロンや、NTT、日立などで開発されている電界効果型超伝導トランジスタなど興味は尽きない。室温超伝導ができれば、家庭用電化製品に、おもちゃに、応用の輪は確実に広がるだろう。

あとがき

本書は、熱物理を解明するために、心血を注いだ人々の物語である。真実を極めるには、深い創造性が要求され、それまでの歴史の流れに反する考えもせざるを得ない。そのため、独創的な研究者は、なかなか認められず、日が当たらない事も少なくなかった。それだけに、新しい地平を開いたときには、感動を伴う話もたくさん生まれた。これらの物語は、物理科学を志す学生達にさえ語られる事が少なく、断片的に話を聞かされる程度であらう。しかし、その創造の物語を知る事は、講義内容の価値や意味をより深く認識し、あるいは、その論理の心髄に触れるのに、非常に大きな役割を果たすだろう。そこで、「温度と熱を科学にした人々・その発見に至る逸話・アイディアを得た瞬間」等を物語風に書いてみた。

そもそも天才たちの偉大な発想の一部を切り出して表現するのは、不可能で不遜な事と思う。それにもかかわらず、それらの物語をできる限り伝えることは、無味乾燥な教科書に、心のかような話を付与し、深い味わいを与える一助になるものと信じて、この本を書くことにした。発見につながった問題意識や、発想に至るまでの迷いや、何を重視し、何にこだわっていたかなどを感

じてもらいたいと思う。

本書は JALIST・知識科学研究科の知識創造プログラムの科学の創造の現場を理解するための参考にする材料として書かれた。このことに関連してさらに、次のような事も訴えたい。

まず多くの若者が「複雑な物質科学に対しても、筋道を明快にたどれる」事を実感として知ってもらいたい。そして、その面白さを理解し、進んでこの世界の研究に飛び込む契機になればと願っている。また、多くの一般の人達には、独創的な物理の発想の現場や環境がどのようなものかを感じていただければ幸いである。特に政治・経済をリードする人々には、科学がいかに多くの努力と多様性に支えられているかを知っていただきたい。深い哲学と知識全体の集積が、諸々のシーズを作り出す源泉である事を認識して欲しい。重要で独創的な仕事の多くが、当時のオーソリティーよりは、その外にいた人々により作られたという事実を実感していただきたい。そして、これからの科学・技術全体の発展をサポートする際、これらの歴史の教訓が役立てば、幸いである。

第二部で、書いた紙上実験は、実際に液体ヘリウムで実験した経験をもとに書いている。ZEMMのカメラマンに、ビデオ撮影してもらった。このビデオには、「噴水効果」や、「いくらでも液体が出てくる小びん」の現象を見ることができる。

著者

参考文献

- 7) A. F. G. Wyatt. *Physical* 268 (1984) 392 ; M. Brown et al. *J. J. A. P.* Suppl. 26 (1987) 385.
- 8) 岩本文明, 東大低温センターだより 第7号, 1988年3月号, P. 6 ; Weinberg, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 86 (1986) 43.
- 9) P. W. Anderson, *Proceedings of 12th International Conference On Low Temperature Physics* (1971) 1.
- 10) S. Shapiro, *P. R. L.* 11 (1963) 80.
- 11) F. London, *Phys. Rev.* 74 (1948) 570.
- 12) R. C. Jaklevic et al., *P. R. L.* 12 (1964) 159.
- 13) 大濱順彦, 日本結晶学会誌, 26 (1984), p. 196,
- 14) 大鉢忠, 日本結晶成長学会誌, 14 (1987), P. 175.
- 15) 高重正明, 『科学』 1988年1月号, p. 64.
- 16) J. G. Bednorz, 『シュプリンガー・サイエンス』 2 (1987), P. 19.
- 17) 高重正明, 『国体物理』 22 (1987), P. 433.
- 18) J. R. Gavaler, *Appl. Phys. Lett.* 23 (1973) 480.
- 19) J. G. Bednorz and K. A. Müller. *Zeitschrift für Physik.* B64 (1986) 189.
- 20) 高重正明, 『国体物理』 22 (1987). p. 434.
- 21) 同上誌 p. 433.
- 22) 同上誌 p. 434,
- 23) J. G. Bednorz. M. Takashige and K. A. Müller, *Europhys. Lett.* 3 (1987) 379.
- 24) 高重正明, 『国体物理』 22 (1987), p. 437.
- 25) 氷上忍, 『国体物理』 22 (1987), p. 496.
- 26) H. Maeda et al. *J. J. A. P.* 27 (1988) No. 2.

参考文献

第1部の参考文献

1. 青木靖三編 世界の思想家「ガリレオ」平凡社 昭和51年。
2. 霜田光一著 「歴史をかえた物理実験」丸善株式会社 平成8年。
3. 広重徹 訳・解説 「カルノー・熱機関の研究」みすず書房 1973年。
4. エミリオ・セグレ著 久保亮五、矢崎裕二訳「古典物理学を創った人々」みすず書房 1992年。
5. R. Clausius, "On Several Convenient Forms of the Fundamental Equations of the Mechanical Theory of Heat", pp. 327-365, (1865), in the book "Mechanical Theory of Heat" (1865).
6. J. Loschmidt, Wiener Berichte 73 (1876) 128-142.
7. 小林謙二著 「熱統計物理学 I」朝倉書店 1983年。
8. キッテル著、山下次郎・福地充 訳「熱物理学」丸善株式会社昭和58年。
9. 訳者代表 新関良三 世界文学大系一八 シラー 筑摩書房 昭和34年。
10. J. Willard Gibbs : Elementary Principles in Statistical Mechanics, New York: Charles Scribner's Sons (1902).

第2部の参考文献

- 1) 佐々木祥介, 『物性研究』1987年6月号, p. 169 : 『固体物理』(アグネ技術センター) 1987年第22巻11号, p. 935.
- 2) Proc. LT13 (Boulder1972) Vol. 1, p. 279.
- 3) R. P. Feynmann, Phys. Rev, 94 (1954) 262.
- 4) S. Sunakawa, S. Yamasaki and T. Kebukawa, Prog. Theor. Phys. 41 (1969) 919.
- 5) F. Iwamoto, Prog. Theor. Phys. 44 (1970) 121.
- 6) S. Sasaki, J. J. A. P. Suppl. 26 (1987) 23.

参考文献

著者略歴

さ さ き しょうすけ
佐々木 祥介

1941 年京瓢に生まれる。1964 年大阪大学理学部物理学科卒業。乳軌 大阪大乍教養部物理学教室助手。理学博士。専門は理論物理学。

ほり ひでのぶ

堀 秀信

1942 年新潟県に生まれる 1965 年新潟大学理学部物理学科卒業 1973 年大阪大学大学院博士課程終了, 理学博士、1971 年大阪大学理学部物理助手、1986 年同助教授を経て 1993 年から北陸先端科学技術大学院大学教授、専門は物性物理

温度・熱現象が咲かせた物質科学物語

昭和●年●月●日 初版発行

著 者 佐々木 祥 介
堀 秀 信

©1988 Shosuke Sasaki

発行所 ●●●●●

編集担当 三枝篤文
落丁・乱丁本はお取替えいたします

●●印刷・●●製本
ISBN4-478-85009-7