

高温超伝導とフラレーンの科学

目次

理解はここまで進んだ

C	O	N	T	E	N	T	S	
シンポジウム組織委員会挨拶							増本 健	2
文部省挨拶							中西 釧治	3
<i>Aセッション 高温超伝導のおもしろさとむずかしさ</i>								
高温超伝導のおもしろさとむずかしさ							立木 昌	8
<i>Bセッション 高温超伝導メカニズムはどこまでわかってきたか</i>								
理論の立場から							前川 禎通	20
実験はどこまで迫ったか							佐藤 正俊	31
<i>Cセッション 新しい高温超伝導体をデザインする</i>								
物質探索の魅力							秋光 純	48
<i>Dセッション 特別講演</i>								
高温超伝導 20世紀物性研究の夢がついに実現して							中嶋 貞雄	62
<i>Eセッション 高温超伝導体の応用へ向けて</i>								
高温超伝導体は磁場の下でどのように振舞うのか							北沢 宏一	74
高温超伝導はどこから実用化が始まったか							荻原 宏康	86
<i>Fセッション フラレーン(C₆₀など)の世界はどこまで広がるか</i>								
フラレーン(C ₆₀ など)の世界はどこまで広がるか 概観と展望							大澤 映二	98
<i>Gセッション フラレーンが示す新しい構造とユニークな性質</i>								
フラレーン結晶のふしぎ - 回転するフラレーン							寿栄松宏仁	112
成長するサッカーボール							阿知波洋次	121
サッカーボールのなかに金属元素をいれる							篠原 久典	135
超伝導体としてのフラレーン							岩佐 義宏	146
演者紹介								158

理論の立場から

前川禎通

東北大学金属材料研究所教授

はじめに

高温超伝導体が発見されてから 10 年あまりが経過しました。この間に多くの研究者によってさまざまな角度から研究がなされてきました。これだけ多数かつ多方面の研究者がひとつの問題に集中攻撃を行ったのは、ほかには例を見ないのではないのでしょうか。私どもは、幸いにもよいスタートを切れたこともあり、常に最先端を歩んでいくことができ、その研究成果をここで代表して紹介できることを幸せに思っています。まず、強調したいことは、高温超伝導体は発見当初に考えられていたよりもはるかに大きな問題を含んでいることが次第に明らかになってきたということです。

ここでは、まず、超伝導の性質について簡単に触れ、次にこの 10 年間で構築してきた高温超伝導に対する理論を紹介します。また、研究の過程で新しい素粒子が見出され、新しい固体電子論が構築されてきました。物質を理解することは、物質中の 1 個 1 個の電子の振舞いを量子力学的に理解することに基づいています。しかし、高温超伝導を理解するためには電子を 1 個 1 個追いかけるのではなく、新しく発見された素粒子に基づいて記述する強相関電子論が有力です。そこで、この強相

関電子論に基づいて、高温超伝導のメカニズムを説明したいと思います。

超伝導は基本的な現象

超伝導体になる元素は周期律表の約半分を占めています。そのため、超伝導は自然界の物質における基本的な現象のひとつであるといえます。ただし、超伝導が起こる温度が低いことが問題です。もっとも高い温度で超伝導を示す元素はニオブ(Nb)ですが、それでも -263.5 以下でしか超伝導を示しません。そのため、超伝導は基本的な現象であるにもかかわらず遠い世界のような印象を与えてきたわけです。

ところが、高温超伝導体ではそれより 100 以上も高い温度で超伝導が起こります。1911 年に水銀で初めて発見された超伝導の転移温度は 4.2K でした。その後研究が進み、1986 年に高温超伝導体が発見され、現在もっとも高い転移温度をもつものは 1993 年に発見された水銀系銅酸化物の $135\text{K}(-138)$ です。

金属の低温超伝導と高温超伝導とは本質的な違いがあります。従来型超伝導の発現メカニズムは、1957 年に BCS 理論で解明されました。発見から 46 年かかったわけですが、それだけの大きな問題であったといえます。ただし、

この46年の歴史の最初の3分の1は、量子力学の完成にかかっており、このような大問題を解決するためには、基礎理論をしっかりと構築する必要があるという教訓を与えています。このような歴史的な背景に基づいて高温超伝導のメカニズムを説明することが私の話の主旨です。

本題にはいる前に、金属について復習しておきます。金属とは何でしょうか。

高校の物理の教科書には「金属では正イオンが規則正しくなっており、そのなかを自由電子が不規則に運動している」と書かれています。金属に電界をかけると、自由電子が一方方向に動きだします。

そのとき、自由電子はイオンに衝突するため、方向をかえられたりしてジュール熱が発生します。そのジュール熱は抵抗の原因となります。ところが、超伝導では抵抗なしに電流が流れます。なぜ、抵抗なしに電流が流れるのでしょうか(図1、図2)。

そのことは、自由電子の気体がかたまって液体のようになったと考え、電子がイオンに衝突するという概念なしにすり抜けることができ、抵抗は生じないことになります。

気体と液体について考えてみます。水蒸気は気体ですが、100 以下で液体になります。同じことが金属中の電子でも起こっているわ

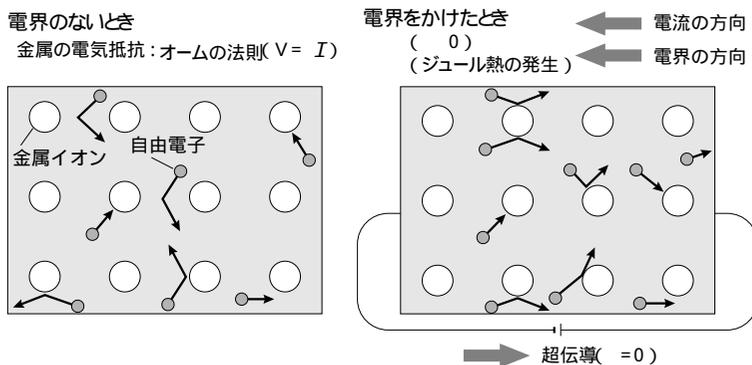


図1 金属中の自由電子

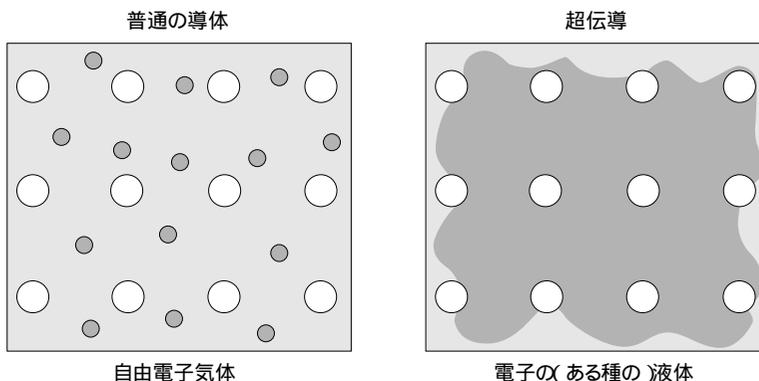


図2 普通の導体と超伝導状態

けです。自由に飛び回っている自由電子の気体がある温度(転移温度)を境にして液体のようになります。それが超伝導です。ただし、水との違いは、電子は量子力学にしたがった粒子であるということです。その違いが超伝導の本質にかかわってきます。

粒子の分類

量子力学のひとつの重要な帰結として、自然界の粒子を2種類に分類することができます。ボソンと呼ばれるボーズ粒子と、フェルミオンと呼ばれるフェルミ粒子です。例えば、電子や陽子、中性子はフェルミ粒子です。ま