

# 酸素が作る奇妙な物質 金属酸化物が拓く新しい科学

|         |   |
|---------|---|
| 組織委員会挨拶 | 2 |
| 文部省挨拶   | 3 |

## A セッション

|   |       |    |
|---|-------|----|
| はじめに - 「酸化物・強相関電子」とは？   | 福山 秀敏 | 8  |
| はじめに / 宇宙・物質・電子 / 物質の多様性の起源 / 電子の振舞い<br>バンド絶縁体・半導体・金属 / 強相関電子系・モット絶縁体 / ドープされたモット絶縁体  |       |    |
| 金属酸化物 - 高温超伝導から巨大磁気抵抗まで   | 前川 禎通 | 16 |
| 巨大磁気抵抗とは / 電子の形と個性 / 遷移金属酸化物中での電子の振舞い<br>遷移金属酸化物の物性変化 / 放射光を用いた共鳴 X 線散乱法 / 電子軌道の制御と物性変化<br>高温超伝導体の転移温度と軌道状態 / 21 世紀は金属酸化物の時代  |       |    |
| 高温超伝導 - 見えた真の姿  | 佐藤 正俊 | 25 |
| BCS 理論による超伝導状態とは / 1980 年代初頭の超伝導研究 / 高温超伝導体の構造と特徴<br>バンド絶縁体とモット絶縁体 / 高温超伝導体の発現条件 / スピン 1/2 の消失と物性変化<br>銅酸化物の特徴 / 異常金属相の出現と高温超伝導 / CuO <sub>2</sub> 面を舞台とした超伝導<br>超伝導の種の形成過程 / $t$ - $J$ 模型と $d$ - $p$ 模型 / 固体電子論の開拓に向けて |       |    |

## B セッション

|  |       |    |
|--|-------|----|
| モット転移 - 強相関電子系の基本問題  | 今田 正俊 | 40 |
| 金属とバンド絶縁体 / 金属とバンド絶縁体間の転移 / バンド絶縁体とは異なるタイプの絶縁体<br>結晶の周期ポテンシャルとモット絶縁体 / モット絶縁体の特徴 / モット絶縁体から金属へ<br>モット転移研究の歴史 / 風変わりな金属の出現 / 風変わりな金属の特徴<br>モット絶縁体近傍の金属の特徴 / 広がる応用可能性      |       |    |
| スピンギャップとは？   | 安岡 弘志 | 56 |
| 磁性体のスピン消失とスピンギャップ / 3d 遷移金属化合物の特徴<br>核磁気共鳴による磁性測定 / 磁気応答と NMR / 高温超伝導体のスピンギャップ<br>高温超伝導体の骨組みと核スピン・格子緩和時間、 $T_1$ / スピンギャップのキャリア濃度依存性<br>酸化バナジウムのスピンギャップ / まとめ             |       |    |
| ストライプの物理と化学  | 内田 慎一 | 68 |
| ストライプとは何か / ストライプ状態の運動量空間表現 / ストライプの“1/8”問題<br>強相関電子系の特徴 / 電子の運動とストライプの形成 / 高温超伝導体での構造相転移<br>高温超伝導とのかかわり / 高温超伝導体の競争相手 / ストライプは新しい量子状態か<br>液晶状態実現のメカニズム / ストライプの制御による新展開 |       |    |

## C セッション 特別講演

|  |      |    |
|--|------|----|
| 高温超伝導と磁束構造   | 外村 彰 | 84 |
| 電子の振舞い / 単一電子による干渉縞の形成 / 電子は波である / 水面の波紋と干渉縞<br>ホログラフィーの発見 / ベンジャミン・フランクリン・メダル / 電界放出型陰極チップの開発<br>交流磁場の電子線に及ぼす影響 / 電子線ホログラフィーの原理 / 磁力線の観察<br>ロイヤル・インスティテュションでの金曜講話 / 超伝導体のマイクロ構造を見る<br>磁束量子の観察法 / 磁束量子の動的振舞いの観察 / 超高压ホログラフィー電子顕微鏡の開発<br>磁束量子のマイグレーション / おわりに |      |    |

# 目次

## Dセッション

- 興味ある物質群 - 強相関電子の晴舞台 ..... 高野 幹夫 102  
物質の性質を決めるもの：組成・構造・かたち / 化学の目でみた 3d 遷移金属酸化物  
遷移金属酸化物のありよう / 遷移金属酸化物の構造と物性 / 新しい 3d 遷移金属酸化物の創出  
SrFeO<sub>3</sub> の合成と物性 / 環境・エネルギー問題への貢献
- 梯子型超伝導体 - 発見と物性の追求 ..... 秋光 純 114  
CuO<sub>2</sub> 面の枚数と転移温度 / 梯子型格子の可能性 / 梯子型格子による超伝導の可能性  
なぜ、La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>2.5</sub> は超伝導にならないのか / (Sr, Ca)<sub>4</sub>Cu<sub>24</sub>O<sub>41</sub> の特徴  
(Sr, Ca)<sub>4</sub>Cu<sub>24</sub>O<sub>41</sub> の超伝導の出現と問題点 / (Sr, Ca)<sub>4</sub>Cu<sub>24</sub>O<sub>41</sub> の問題解明に向けて  
梯子格子系の超伝導 / 磁気的な性質 / まとめ / 今後の課題

## Eセッション

- 新しいタイプの金属酸化物超伝導 ..... 北岡 良雄 130  
はじめに / 超伝導電子対のタイプ / 新しいタイプの金属酸化物超伝導体の発見  
ルテニウム遷移金属酸化物の特徴 / 酸化物の物性の制御 / d 電子軌道のかたちと種類  
強相関電子系の磁性と超伝導のフロンティア / Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の物理的性質 / Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の超伝導特性  
超伝導電子対のスピン状態を決定 / 超伝導の発現機構 / おわりに
- 第 3 の自由度 - 軌道 - の物理学 ..... 永長 直人 144  
電子のかたちとは / 波としての電子の特徴 / 原子に束縛された電子のかたち  
固体における周期性 / 固体中の電子軌道は個性を保っているか / 固体中の 3 種類の電子  
煩悩電子は内部自由度を発現する / 波動関数の符号とかたち / 曲率を感じる電子  
遷移金属酸化物の電子構造 / 電子の液晶状態 / CMR 効果の電子状態  
電子複雑系の物理へ向けて / まとめ

## Fセッション

- 強相関エレクトロニクス ..... 十倉 好紀 158  
強相関エレクトロニクスとは / 強相関エレクトロニクスの素子サイズ  
ペロブスカイトの特徴 / エキゾチックな相制御 / 層状構造のスイッチングへの利用  
電荷軌道整列 / 電子固体 - 液体の相転移の利用と制御法 -  
磁場による巨大磁気抵抗の利用 / 磁気リラクサー / 応力による相転移 / 人工格子の創出  
光励起による相転移 / 非線形光学効果光スイッチング / 今後の展望と課題

## おわりに

- おわりに ..... 福山 秀敏 178  
シンポジウムを振り返って / 本シンポジウムの流れ / 金属酸化物が拓く新しい科学
- 演者紹介 ..... 182

# はじめに 「酸化物・強相関電子」とは？

福山 秀敏

東京大学物性研究所所長

## はじめに

本シンポジウムの全体タイトルは『酸素が作る奇妙な物質 - 金属酸化物が拓く新しい科学』であり、「奇妙な」という言葉がついています。なぜ奇妙なのか、どのような意味があるのかを説明していくわけですが、たんに奇妙というだけではなく、刺激的で可能性をもったテーマであることをご理解いただけるよう、その前座を務めさせていただきます。

私は「酸化物」と「強相関電子」というキーワードをもとに、

物質の多様性とその起源：電子

ミクロな世界と量子力学：粒子性と波動性

金属と絶縁体の違い

現代技術の担い手：半導体

金属酸化物：原子の軌道

強相関電子系とモット絶縁体：磁石

More is different !

について考えてみることにします。

## 宇宙・物質・電子

この世はすべて物質で構成されていますが、

そのすべては 150 億年前に起こったビッグバンで始まります。

ちなみに、昔、ある哲学者は、世の中でもっとも巨大なものは人間の頭だと述べています。確かに、人間の脳は、概念としてすべてを含むことができます。

さて、150 億年前のビッグバン後、“宇宙の泡”が光速で広がったとすると、現在の宇宙の大きさは  $10^{28}$ cm となります。

一方、この世の中でもっとも短い長さの単位は、宇宙の始まりにできた宇宙の泡粒です。それは、プランクの長さ ( $10^{-33}$ cm) と呼ばれ、重力常数とプランク定数と光速で決まります。つまり、 $10^{-33}$ cm と  $10^{28}$ cm の間にすべてのものがおさまっています。このように、 $10$  の何乗かで示すとたいした数ではありませんが、そのなかにすべてがおさまっているわけです。

本シンポジウムでは、われわれの周囲にある物質について考えますが、これらの物質すべては原子を基本としています。原子の大きさは  $10^{-8}$ cm 程度ですので、物質というときに問題になる長さの単位は、 $10^{-8} \sim 1$ cm 程度となります(表 1)。

表1 多彩な物理現象の長さによる分類

| 長さ (cm)    | 物理現象  | 特徴的なエネルギー (単位はK)                       | 重要な物理法則               | 学問分野                   |
|------------|---|--|-----------------------|------------------------|
| $10^{-33}$ | プランクの長さ<br>量子重力(ブラックホール、ビッグバン)                              | $10^{32}$ ( $10^{19}$ GeV)             | ↑<br>量子論<br>↓         | 量子論的宇宙論                |
| $10^{-16}$ | 弱い相互作用の到達距離<br>ワインバーグ・サラム理論<br>クォーク・グルーオンプラズマ               | $10^{16}$ (1 TeV)                      |                       | ↑<br>相対論<br>↓          |
| $10^{-13}$ | fm 強い相互作用の到達距離<br>(原子核の大きさ)<br>湯川中間子理論<br>原子核反応・核融合<br>線の波長 | $10^{13}$ (1 GeV)<br>$10^{10}$ (1 MeV) | ↑<br>統計力学 (多粒子系)<br>↓ | 原子核物理学                 |
| $10^{-8}$  | Å 原子半径<br>固体中の原子・分子<br>および金属中の電子の平均距離<br>X線の波長              | 固体中の諸現象                                |                       | ↑<br>物性物理学 (物質科学)<br>↓ |
| $10^{-7}$  | nm 金属微粒子・クラスター<br>超流動・超伝導<br>BCS理論                          | $10^{-10} \sim 10^3$ K                 | ↑<br>ニュートン力学<br>↓     | 生物物理学                  |
| $10^{-4}$  | μm メソスコピック系<br>半導体素子<br>レーザー光の波長 ( $10^{-5} \sim 10^{-1}$ ) |  |                       |                        |
| $10^{-2}$  | 固体中の音波の波長   |  | ↑<br>相対論<br>↓         | 天体物理学                  |
| 1          | りんご   |  |                       |                        |
| $10^3$     | ラジオ波の波長 (FM)  |  | ↑<br>相対論<br>↓         | 観測論的宇宙論                |
| $10^5$     | ラジオ波の波長 (AM)  |  |                       |                        |
| $10^6$     | 大都市での平均通勤距離   |  |                       |                        |
| $10^9$     | 地球の半径   |  |                       |                        |
| $10^{10}$  | 光が1秒間に進む距離、太陽の半径  |  |                       |                        |
| $10^{13}$  | 地球・太陽間距離  |  |                       |                        |
| $10^{15}$  | 太陽・冥王星間距離   |  |                       |                        |
| $10^{18}$  | 1光年   |  |                       |                        |
| $10^{23}$  | 銀河系円板部  | 宇宙の背景輻射                                |                       |                        |
| $10^{28}$  | 宇宙の大きさ (150億光年)   | 3K                                     |                       |                        |

### 物質の多様性の起源

物質の基本は原子です。今世紀初頭に原子の内容がみえてきました。そのことをもとに、世の中に存在する原子は周期律表にまとめられています。もっとも軽いのは水素です。本

シンポジウムで問題になるのは、金属とその相手である酸素です。酸素と金属の組み合わせでできた物質を金属酸化物と呼びますが、それが今回のシンポジウムでの興味の対象になります。

ところで、この世の物質は元素の集団です。