石原純夫

相関電子と軌道自由度

共立出版，東京，2020，ix＋178p，21×15 cm，本体2,000円（基本法則から読み解く物理学最前線22）［大学院向］
ISBN 978-4-320-03542-3



望月維人 〈早大先進理工〉

日本物理学会の領域8「強相関電子系」は今でも大きな領域だが，私が大学院に進学した23年前は，今よりももっと講演数も多く，さらに巨大な領域であったように思う．1986年にベドノルツとミューラーが銅酸化物超伝導体の発見を報告してからすでに10年以上の歳月が経過していたにもかかわらず，それにより口火が切られた「強相関電子系研究」の火は，鎮まるどころか爆発的に燃え広がり，「銅」以外の様々な遷移金属の化合物にその研究対象が広げられていった．その過程で発展を遂げた「電子相関の物理学」の最も重要な方向性の1つは，まぎれもなく本書の主題である「軌道自由度の物理」であり，著者はこの分野を先頭に立って切り拓いてきたパイオニアの一人である．

電子には「電荷」と「スピン」の自由度に加え，原子核周りの分布形状の自由度である「軌道自由度」がある．本書で生き生きと語られるように，この軌道自由度は，結晶を構成する原子間の電子の飛び移りを支配したり，スピン間や電荷間に働く相互作用を支配したり，相対論的効果を通じてスピンの向きと結びついたり，結晶格子と結びついたりすることで，系の物性を決める重要な役割を果たす．銅酸化物超伝導体では，その価電子数のために銅イオンの軌道自由度は不活性であり，その結果，単純なハバード模型やt-J模型などの軌道自由度を考えないモデルでその物性が比較的よく記述できた．しかし，その後の研究対象となったTi（チタン），V（バナジウム），Mn（マンガン），Fe（鉄）やRu（ルテニウム）などの遷移金属イオンを含む化合物では，軌道自由度が活性であり，それが上述の効果を通じて多彩で劇的な物性現象と物質機能を引き起こしている．特にMn酸化物における「巨大磁気抵抗効果」や「磁気強誘電性（マルチフェロイックス）」，Ru酸化物における「多軌道型超伝導」，そして多くの遷移金属化合物が示す磁気・軌道・電荷秩序とそれに絡む相転移や応答現象，輸送現象，非平衡ダイナミクスはその典型例であろう．

本書は，そのような「強相関電子系における軌道の物理学」に関する大学院生および研究者向けの入門書である．基礎から説き起こしながらも，最新のトピックスも盛り込まれており，すぐにでも研究に活かすことのできる現代的な視点と実戦的な一面を備えた良書と言える．第1章では「軌道物理学」の面白さが著者の視点から熱っぽく語られ，歴史的な背景についての紹介がある．第2章では相関電子系における軌道自由度の基礎的な事柄が簡潔かつ十分な形にまとめられている．第3章ではヤーン-テラー効果と呼ばれる軌道自由度と結晶格子とのカップリングについて述べられている．第4章ではそれらを踏まえ，「軌道自由度の擬スピン表示」や「軌道間の交換相互作用」といった理論的な取り扱いについて解説し，縮退ハバード模型や二重交換模型，Kugel-Khomskii模型といった強相関電子系における軌道と多自由度の相関を記述する理論モデルについて詳しく解説している．第5章，第6章，第7章では，これらの理論モデルを用いて「軌道秩序」や「軌道励起」といった具体的な現象を，それらを観測する実験手法や実験データと併せて詳しく議論している．本書で紹介されている研究例や実験データは，著者自身のこれまでの研究内容に多分に寄っているが，「軌道自由度」を取り扱うための普遍的で汎用性の高い理論的枠組みをしっかりと解説した後に，その理解を助ける例として挙げられたものであり，「偏り」と言うには当たらないだろう．むしろ俯瞰的かつ大局的な見地から書かれ，重要なことが漏れなく盛り込まれたバランスの良い入門書と言える．

ところで最近は，「軌道秩序」や「ヤーン-テラー効果」，「金森-Goodenough則」，「Kugel-Khomskii模型」といった，本書で取り扱われている「軌道物理学」の用語を学会でもセミナーでも聞くことが少なくなった．今の流行は，「トポロジカル」，「キタエフ・マヨラナ」，「スキルミオン」，「フロケ」などであろうか（個人の感想です）．これらの分野の理論研究では，現象論的なアプローチに加え，例えばSu-Schrieffer-Heeger（SSH）模型やKitaev模型，DM相互作用を含む古典ハイゼンベルク模型などの典型的な理論モデルが頻繁に用いられ，パラメータを変えたり，外場を印加したり，状況を変えたり，もっと言えば計算手法を変えるだけで，面白い結果が次々に出てくる．理論研究者は，先達が作り上げ，有効性を示したこれらのモデルの解析に夢中で取り組んでいる．この状況は，銅酸化物超伝導体の発見後に，理論家がこぞってハバード模型やt-J模型の研究に取り組んだ頃のそれと似ているのかもしれない．しかし，ハバード模型やt-J模型が銅酸化物の電子構造に対する真摯な洞察から，その有効性が示されたり，導出されたりしてきたのと同様に，SSH模型やKitaev模型の有効性も，物質の微視的な電子構造，特に軌道自由

©2020 日本物理学会

度の考察から示されたものである．銅酸化物の研究がその後，軌道自由度を持つ他の強相関物質が示す多彩な物性の研究に拡大・深化していったように，上に挙げた発展途上の研究分野も今後，物質が持つ個性的な電子構造に，より注意を払いながら豊かな物性現象や物質機能を探索・開拓する方向に発展していくことは疑いない．そのような時に研究者は，物質の中の電荷，スピン，軌道，格子の絡み合いに深く思慮を巡らせ，物質の個性を反映した理論モデルを自ら構築して分野を切り拓いていくことが求められる．その際に武器となる「知恵」と「知識」，「素養」を本書は授けてくれる．「軌道物理学の新しい展開」と題された第8章で語られるトピックスは，このような方法で分野を切り拓いてきた著者の生々しい体験談であり，多くの研究者や学生にとって素晴らしいお手本となる．私自身何度でも読み返したいし，同僚や学生にも薦めたい一冊である．

本稿の校正後に著者である石原純夫先生の訃報に接しました。常に分野を牽引し、若手を導いてくださった先生の早すぎるご逝去に悲しみがたえません。心よりご冥福をお祈り申し上げます。

（2020年10月19日原稿受付）

本欄では物理に関する新著を中心に，隠れた良書や学会員にとって有意義な本などを紹介していきます．

紹介書籍の表紙画像につきましては，出版社の許可を得られたもののみ掲載しております．