

## まえがき

本書は、物性物理あるいは固体物理と呼ばれている分野の教科書として書かれたものである。物性物理は、素粒子物理学と並ぶ物理学の一分野であると同時に、半導体や磁性体など、様々な材料科学の基礎となるものである。様々な背景を持つ人が学ぶこともあって、これまでに出版された教科書もバラエティに富んでいるが、そのほとんどにおいて物性物理の一般論と各論が記述されている。一方、本書は物性物理の一般論に傾斜して書かれており、いわば力学や電磁気学の教科書と同じスタイルで物性物理を解説したものである。

物性物理において何が一般論かについては議論があるところかもしれないが、筆者の考えでは、(1) 結晶の周期性に由来するバンド構造、(2) 温度を含む外場に対する応答、(3) 素励起の概念、(4) 対称性と相転移、(5) トポロジーなどである。本書ではこの5つについて、必ずしも十分とはいえないかもしれないが、基礎から解説してある。

物性物理に限らず、物理関連の学問においては、多大な労力をかけて勉強したにも関わらず、概念を学んだだけで具体的に何かが計算できるようになったわけではない、ということがしばしば起こる。これはある程度仕方のない部分もあるとはいえ、勉学に対するモチベーションをはなはだ下げるのは事実である。したがって、本書ではできるだけ「最後まで自分で計算できる」内容を選んで解説してある。

物性物理を学ぶ上で、量子力学と統計力学は欠かせないものである。ただ筆者の経験上、物性物理を初めて学ぶ人が、仮に量子力学と統計力学を既習だとしてもそれらに精通していることはほとんどないので、本書ではその基本についても解説してある。量子力学と統計力学の基本の解説を入れたもう1つの理由として、物性物理を学ぶのにどうしても必要な量子力学と統計力学の内容は、それらの教科書に解説してあるもののごく一部である、ということがある。

量子力学、統計力学に限らず、本書はできるだけ他の本を参照しなくてよいように、セルフコンテインドになるように書いたつもりである。もちろん完全なセルフコンテインドは不可能であり、例えば線形代数や微積分、ベクトル解析については大学初級レベルの知識を仮定しているものの、それ以外にはそれほどの基礎知識は必要ないはずである。式番号の参照も多めにつけたので、式変形で迷子になることは少ないと考える。結果として全体的に式が多めの本となっているが、見かけほど大量の内容を扱っているわけではない。通常の大学の授業であれば、通年1コマか、それに少し満たない程度であると考える。

#### iv まえがき

本書には練習問題がついているが、それらは本来なら本文で解説すべきであるが、長くなり過ぎるのを避けるために練習問題としてその解答を巻末に回したものがほとんどである。したがって、読者はぜひ練習問題を解いて、あるいは解かなくてもその解答を読んでいただきたい。また、練習問題だけでなく、本文を読む際も、式をただ眺めるのではなく、実際に自分の手で書いてみるのが最もよい勉強法であることは強調しておきたい。

本物質・材料テキストシリーズには拙著「基礎から学ぶ強相関電子系」があるが、そちらは電子相関の強い系を記述するのに欠かせない第二量子化(あるいは場の演算子)の手法を学ぶことを目的としたものである。一方、本書では第二量子化は扱っていない。ただ、「強相関電子系」の方は、第二量子化に至るまでの部分は速習の感が否めないところがあるので、そちらを読む際の予備知識として本書は有用であると思う。これに限らず、本シリーズの他の巻を学ぶ上で必要な予備知識を得るという観点から本書が書かれた、ということは付記しておく。本書で物性物理の各論を扱わなかったのも、物質・材料テキストシリーズには優れた「各論」の巻があるのが大きな理由である。

「物質・材料テキストシリーズの様々な巻を読む際の予備知識となるような物性物理の基礎的な本」を、シリーズの編集会議において、シリーズの監修者でもある筆者が提案してから、紆余曲折を経て、筆者自身が書くこととなりました。監修者の藤原毅夫先生、藤森淳先生には、結果的に筆者の我儘を許していただき、さらには執筆に際して大変有益な助言をいただきました。また内田老鶴園の内田学社長に、シリーズの編集会議の場で毎回のように執筆の進行度合を尋ねられたことが、筆者の執筆に関する大きな励みとなりました。深く感謝を申し上げたいと思います。

2024年3月

勝藤 拓郎

## 各章の説明

物質には、電気が流れる銅や鉄のような金属と、食塩やシリカのように電気が流れない絶縁体があり、これらの違いの理由を説明するのが物性物理の最初の課題である。このためには、物質の中で原子が周期的に配列している結晶において、電子がどのように振る舞うかを理解する必要がある。第1章と第2章はそのための準備としての量子力学の解説であり、第1章ではポテンシャルのない自由電子の波としての性質を議論し、第2章ではポテンシャルがある場合のシュレディンガー方程式について議論する。その結果を用いて、バンド構造と呼ばれる結晶中の電子の状態について、第3章と第4章でそれぞれ異なる方向から議論する。

物質の性質の温度依存性は、物質中のアボガドロ数程度の数の電子がどのように振る舞うかという問題と関係がある。この問題を議論するために必要なのが統計力学である。第5章では統計力学の基礎について解説し、金属中の電子の有限温度での性質について議論する。

物質の性質を調べるには、外から外場を加えてその応答を見る手法が通常行われる。第6章ではそうした外場応答を半古典モデルによって議論し、特に電場に対する電流の応答である電気伝導度について、具体的な解説を行う。

物質中で原子が周期的に配列している結晶について、その対称性を議論するのが第7章である。対称性は物質の性質を決定する重要な要素であるが、結晶の対称性はその中で最も基本的なものである。さらに、結晶中の波の性質を表すための逆格子について解説を行う。

第8章では結晶中での原子の運動について議論する。結晶中の原子は周期的な配列という平衡位置から少し動くことができ、それは原子の集団運動(フォノン)として記述することができる。フォノンは物質の様々な性質に関わるとともに、物質中の素励起という概念の最も基本的な例である。そうしたフォノンに対して、統計力学を適用した結果についても議論する。

磁石が鉄などを引き寄せるといった現象は、電子のスピンという性質に由来する。第9章ではこのスピンについての性質を学ぶとともに、スピンの集団について統計力学を適用した結果についても議論をする。さらに実際の磁石に対応する、スピンの向きが自発的に揃った強磁性という状態について議論し、それをもとに相転移という概念について学ぶ。

第10章では物質のトポロジーについて議論する。トポロジーとは、例えばメビウスの帯のねじれがどうやっても解けない、という現象に関する数学であるが、これと同じことが物質中の集団としての電子について起こりうることを見る。