序　文

本書は，大学の理工系学部における，基礎レベルの量子力学のテキストである．量子力学は，原子や電子などが関与するミクロな世界の基礎法則であり，1900 年初頭の熱放射の難問に対するプランクのエネルギー量子仮説をきっかけに，およそ 30 年の歳月を要して 1920 年代に構築された．

その構築のプロセスは，科学史的にも大変興味深いもので，アインシュタインの光量子仮説，それに啓発されたド・ブロイの物質波仮説，さらに，それらに基づくボーアの作業仮説的な前期量子論などを指針として，主に，シュレーディンガー，ハイゼンベルク，ディラックらの若きトップランナーたちが量子力学を完成させた．

ところが，この量子力学は古典力学ともいわれるニュートンの力学とは全く異なる特徴をもっていた．例えば，ニュートンの運動方程式を解けば，天体の運行からグラウンドで投げたボールの軌道まで，完全に一意的に決められることは，力学を学んだことがある人ならば知っているはずである．ところが，量子力学の基礎方程式（シュレーディンガー方程式）の解（これを波動関数という）からは，電子の軌道はボールの軌道のようには決まらず，それどころか，1 個の電子の軌道という概念すら存在しない．このような奇妙なことを教わると，読者は困惑し，量子力学は本当に役に立つ基礎科目なのだろうか，と疑う人も出てくるだろう．

しかし，この量子力学は，私たちの日常生活の隅々にまで行き渡っている科学技術の基礎を与えている．実際，情報化社会を支える通信技術やナノスケールでのエレクトロニクス技術の基礎として，現代社会に不可欠な存在になっている現実を前にすると，量子力学の実用性や重要性は疑う余地がない．

量子力学の奇妙で常識外れな基礎法則と概念，そして波動関数の不可解な確率解釈などはすべて，電子などのミクロな粒子がもつ「粒子と波動の二重性」に起源をもっている．ミクロな世界の二重性を基礎にしてつくられた量子力学に，日常生活の常識は通用しない．そのため，量子力学を学んでも，力学や電磁気学を学んだときのような「わかった！」，「解けるようになった！」という

嬉しい実感がなかなかもちにくい．そこで，量子力学の学習方法や目的について，少し考えてみよう．

（1）　量子力学の学習は，難しいのだろうか？

量子力学を学びはじめるとすぐに気づくかもしれないが，そこに登場してくる主な数学は

複素数，線形代数（ベクトルと行列），確率・統計，微分方程式

などである．しかも，これらの多くは，力学や電磁気学や統計力学などの古典物理学で出会ったものばかりである．特に，微分方程式に関しては，固定端をもった弦の振動とその波動方程式，あるいはマクスウェル方程式の境界値問題や固有値問題などを学んでいれば，シュレーディンガー方程式の解法は難しくないだろう．そのため，見方（力学や電磁気学の習熟度）によっては，量子力学の方が古典物理学よりもやさしいといえるかもしれない．

（2）　量子力学の学習は，どこからはじめるのがよいだろうか？

よく知られているように，力学は「ガリレオの慣性の法則」を基礎にして，ニュートンが経験的な法則（ニュートンの運動方程式）として提唱したものである．この歴史に倣えば，量子力学は「アインシュタイン－ド・ブロイの関係式」を基礎にして，シュレーディンガーが経験的な法則（シュレーディンガー方程式）として提唱したものといえる．

そして，力学を学んだ学生にとって，ニュートンの運動方程式の正しい理解に「慣性の法則」の理解が不可欠であることは自明である．そこで，シュレーディンガー方程式に対しても，「アインシュタイン－ド・ブロイの関係式」の理解が不可欠であると考えるのが合理的なので，本書では，この解説（第1章～第3章）からはじめるようにした．

（3）　量子力学の学習は，どこまで含めるのがよいだろうか？

シュレーディンガー方程式の解（波動関数）に対する確率解釈（第4章）は，量子力学を学ぶ上で必須項目である．そして，量子力学が準拠する前提（第5章）を学び，量子力学と古典力学との相互関係（第6章）を理解した上で，基礎レベルのシンプルな1次元の問題（反射と透過，束縛状態，トンネル効果などのポテンシャル問題（第7章），調和振動子（第8章），角運動量（第9章），摂動論（第13章））と，やや複雑な3次元の問題（水素原子（第10章））に取り組むのがよいと思われる．

なお，これらの章の大半は，1次元のシュレーディンガー方程式（変数は

x と t だけ）に限定して話を進めている．その理由は，単に計算が簡単で論理や思考の過程がフォローしやすくなるということだけではなく，量子力学の主要な特徴や性質などが，ほとんど 1 次元の問題で理解できるからである．

（4）　量子力学の学習は，どこまで広げるのがよいだろうか？

従来の量子力学の多くのテキストで扱われてきた原子核物理学や原子物理学の分野から，現在，量子力学の応用領域は情報科学分野（電子工学，量子光学）にまで広がっている．このような領域を理解するには，波動関数一辺倒の記述だけでは不十分で，ブラ・ケット記法が必要になる．この記法は，量子力学の基礎コースで扱われることはほとんどなく，上級コースで学ぶのが一般的であるが，その重要性と汎用性に鑑み，本書ではこれを丁寧に解説（第 11 章）し，その具体的な応用例として，スピン（第 12 章）および将来の情報通信技術のベースとなる「量子もつれ」現象（第 14 章）を加えた．このように基礎コースの学習内容を量子力学の検証や応用まで広げると，将来，上級コースに進むときに大いに助けになるはずである．

（5）　量子力学の学習から，何を学ぶべきだろうか？

量子力学に固有な数学や計算テクニックなどは，(1)で述べたように，新たに学ぶべきものはあまりないように思われる．量子力学の大前提である「粒子と波動の二重性」，つまり「アインシュタイン－ド・ブロイの関係式」の背後に何があるのかは，いまのところわかっていないが，この関係式さえ認めれば，量子力学はミクロな粒子の運動を正しく記述する盤石な学問である．そのため，学ぶべきものは，量子力学的な世界像（すなわち，ミクロな世界に対する物質像や自然観）と，量子力学のリテラシー（すなわち，法則や概念を正しく理解して，量子力学的な諸問題に適用できる能力）ではないだろうか．量子力学と古典物理学との学習の間に，もし質的な違いがあるとすれば，まさにこのような点ではないかと思われる．

上記のように，「学習」に対するいくつかの観点に立って，量子力学が“わかって使える”ようになることを目標にして，本書を書き上げた．

最後に，本書の理念・構想から完成に至るまでの間，本文が読みやすく，わかりやすくなるように，いろいろと細部にわたり懇切丁寧なコメントとアドバイスを頂いた，裳華房 企画・編集部の小野達也氏に厚くお礼を申し上げます．

2020 年 10 月　　河 辺 哲 次