

## 共振器量子電磁力学

量子コンピュータのハードウェア理論

越野和樹著, B5判, 200頁, 本体2400円, サイエンス社



量子コンピュータの話題が産業界を賑わすようになって久しい。評者はおよそ10年前からいわゆる「量子情報」の研究分野に参入したが、当時は1または2量子ビットの実験が頻繁に報告されていた時代で、ほとんどの研究者が量子情報を「科学」と認識していた古き良き時代であったように思う。しかし、2014年に5超伝導量子ビットが集積した量子CPUにおいて99%以上の信頼度でゲート操作に成功したことがカリフォルニア大学サンタバーバラ校のチームから報告されると、業界の様相は急変する。巨大IT企業が競うように量子コンピュータ開発に乗り出し、それからわずか5年足らずで量子超越（量子コンピュータが特定のアルゴリズムの実行速度で古典スーパーコンピュータを上回る）が実証され、今や100量子ビット規模の量子コンピュータ開発が進んでいるなど、隔世の感がある。

さて急速に産業化が進んでいるということは人材育成が急務であり、つまり基礎事項を網羅した教科書が必要である。量子コンピュータのハードウェアの方式はまだ確立されておらず、超伝導、イオン、スピン、半導体、光、原子などの物理系を用いた方式の研究開発が並行して進められている。一方、ハードウェアの動作原理に関してはほぼすべての物理系において共振器量子電磁力学（共振器QED）の知見が駆使されている。つまり、量子コンピュータのハードウェアは共振器QEDの知見と技術が結集された産物であるといえよう。本書はこの共振器QED系に焦点を当て、必須の基礎事項が最新の研究成果を交えて系統的に解説されている。量子情報の研究者およびエンジニアを目指す学生や若手研究者にとってまさに待望の一冊である。

本書は1章で量子力学の基礎事項を復習したのち、電磁場の量子化、2準位系、Bloch球などの量子情報における必須事項が解説されている。2章と3章では共振器QED系の物理の最重要項目であるRabiモデルとJaynes-Cummingsモデルが解説され、固有状態や時間発展の計算をする。2量子ビットゲートへ応用される真空Rabi振動と、量子ビット測定へ応用される分散結合領域の物理をここで理解できる。

ここまでは減衰が存在しない閉じた系についての議

論であったが、現実の系には必ず散逸があり、さらに制御や観測のためには外部と相互作用をさせなくてはならない。このため、4章と5章ではより実践的な「開いた量子系」に関する議論へと進み、その必須のツールである量子マスター方程式と入出力関係式が解説されている。特に初学者にとって理解が困難な共振器の入出力関係が詳しく解説されているのありがたい。恥ずかしながら、評者もこれまで入出力関係式を天下りの利用するだけで、例えば共振器の漏れレート $\kappa_e$ （表記は本書に倣った）がハミルトニアン上で $\sqrt{\kappa_e}$ となる根拠を本書を開くまでは理解していなかった。

6章では減衰を取り入れたマスター方程式を計算し、共振器によって量子ビットの緩和を制御できるPurcell効果についても解説されている。ここで読者は共振器の存在意義を改めて認識するであろう。7章では共振器の応答を具体的に計算する。実験では多くの場合共振器の応答を測定するので、実験結果をシミュレーションする手順を理解できる。8章と9章では光子の時間発展や2光子間の量子ゲートの方法について解説されており、最新の研究成果と共に踏み込んだ量子光学の解説がなされている。最後に10章で量子情報工学における必須のツールであるパラメトリック増幅・発振が議論される。ここでパラメトリック増幅・発振の動作モードおよびスキューミングを理解できる。

このように、本書一冊で量子情報工学を基礎から最先端の研究まで効率良く学習することができる。一方ページ数の都合だと推察するが、計算や説明の省略が見られる。この点は著者のホームページ等で継続的にアップデートされることに期待したい。逆に学生や若手研究者には本書の補足計算等に挑戦してほしい。折しもオンラインの量子技術教育プログラムも開講したので、そのプラットフォームを利用して議論してはいかがだろうか。読者からの活発な議論やフィードバックはより充実した改訂版へと繋がり、それがひいては日本の量子情報産業の未来へと繋がるはずである。

久保 結丸 (沖縄科学技術大学院大学)