

新版まえがき

この本の初版(数理工学社から刊行)を書いてから、早いもので15年が経過してしまった。15年前はみんな量子コンピュータの実現はずっと先の話だと思っており、量子情報科学を学ぶ人はそれほど多くはなかった。そのため、色眼鏡を通して見られることも多く、この学問が「量子力学そのもの」であることを強調する必要があった。しかし、今日では、種々の問題があるとはいえ、量子コンピュータはかなり実現に近づいており、量子情報科学の重要性について疑念を抱く人はもはやいないであろう。本当に隔世の感がある。今では、ブラックホールなど宇宙の成り立ちに関する議論にまで量子情報科学が登場する。このような時代背景のもと、「量子光学と量子情報科学」も新版として生まれ変わり、サイエンス社からSGCライブラリの一巻として刊行されることになった。新版では、旧版の大半を残したうえでアップデートし、それに加え、新進気鋭の量子物理学者である武田俊太郎博士に、今日の量子情報処理の主流になりつつある、量子テレポーテーションをベースにしたユニバーサル量子情報処理の実現手法と、その時間領域多重量子情報処理への応用を、「今後の展望」として加えてもらった。この分野の発展のスピードは極めて速いが、基本的な考え方は15年前と変わらないと思う。したがって、最近のトピックスを加えれば、この分野を理解するのに十分であると思われる。最後に、この分野の研究を旧版の時代から15年続けるためには、非常に多くの人たちにお世話になった。全員の名前を挙げるのは不可能であるが、古澤研究室メンバー全員にとっても感謝している。

2020年1月

古澤 明
武田俊太郎

まえがき

本書は基礎的な量子力学を学んだ理工系大学生・大学院生が、近代的な光学において量子力学がどのように応用されているかを学ぶための教科書あるいは参考書として執筆されたものである。したがって、ある程度量子力学の基礎を習得していることを前提としている。

広い意味でのナノテクノロジーの進歩により、人類が直接アプローチしうる領域は非常にマイクロになり、現代科学技術で取り扱う対象は全て量子力学的領域に到達したといっても過言ではない。つまり、現代科学技術におけるパラダイムが古典力学から量子力学に移行しているとしてもよいであろう。そのような状況の中、光を量子力学的に捉え直した量子光学は量子力学的効果研究の良い土俵として広く用いられている。これは、固体系に比べ、光では量子状態を保持しやすいからである。

量子光学の応用として、「量子情報科学」が考えられている。量子情報科学とは、量子力学を情報科学と融合させ、新たな情報科学パラダイムを構築しようとするものである。その中心的主題は量子エンタングルメント (量子力学的不可分性) である。量子エンタングルメントは、古典力学的には不可能な操作を可能にする。量子光学では量子エンタングルメントを比較的容易に生成できるため、量子光学と量子情報科学は不可分な関係になりつつある。

筆者は東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻において、「量子情報物理」という講義を担当し、主に修士1年生を対象に講義を行っている。そこでは、量子光学的観点から、量子情報科学を概観している。これは、量子光学的アプローチが実験的には一番進んでおり、問題点がクリアになるためである。講義の経験から、本書では現象の理解のため、実験に関する記述に重点をおいた。式を追っただけの表面的な理解では、真の理解に到達するのは難しいからである。

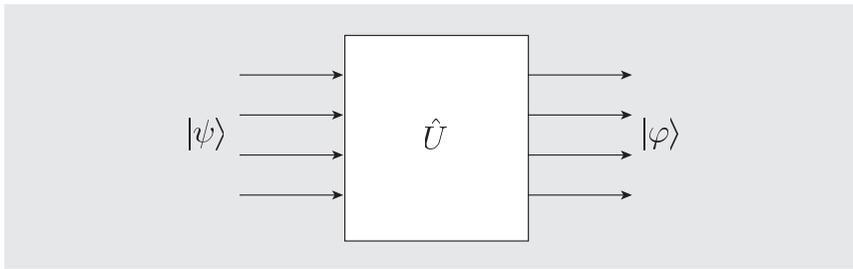
本書の構成について述べる。次の図に示したように、量子情報処理とは入力状態 $|\psi\rangle$ を出力状態 $|\varphi\rangle$ にユニタリー変換することである。式で書くと、

$$|\varphi\rangle = \hat{U}|\psi\rangle \quad (1)$$

となる。後で述べるように、ユニタリー変換はハミルトニアン \hat{H} を用いて

$$\hat{U} = e^{-i\frac{\hat{H}}{\hbar}t} \quad (2)$$

と書けるから、任意のユニタリー変換に相当する任意の量子情報処理操作を可能にするためには、任意のハミルトニアンが必要になる (計算機的に言えば、任意の「量子演算ゲート」が必要ということになる)。また、任意の量子情報処理操作を行うためには、初期状態 $|\psi\rangle$ をどのように選ぶか、あるいはどのように用意するかは非常に重要な問題である。さらに、ユニタリー変換器 (量子コンピュータ) の中で量子エンタングルメントが生成されて初めて古典的情報処理を凌駕できるので、量子エンタングルメントに関する理解は重要である。一方、量子光学とは、光の量子状態の生成と



量子情報処理

制御を研究する学問である。つまり、量子光学では、式 (1) を実現するための初期状態 $|\psi\rangle$ ，ユニタリー変換 \hat{U} ，ユニタリー変換器の中で生じる量子エンタングルした状態の研究を，光を用いて行っているということもできる。

このような背景から，本書では，前半で「量子光学」について解説し，後半で「量子情報物理」について解説するというスタイルを取った。前半で，量子情報処理の初期状態 $|\psi\rangle$ として用いることのできる光の状態，さらにそれを制御する物理過程をハミルトニアンおよびユニタリー変換の描像で解説した。また，光を用いた量子エンタングルメント生成法に関して詳しく述べた。後半では，前半で解説した光の量子状態，ユニタリー変換を用いて，いくつかの重要な量子演算が可能となることを示した。また，前半では，光の場を理解するのに有用な調和振動子について，量子光学につながる形で解説を試みた。かなりこじつけ的な解説を行ったが，読者の理解（混乱？）を深めるのに役立つことを期待している。

本書を執筆するのに参考にした本を挙げる。量子力学に関しては，清水 明著「新版 量子論の基礎」，サイエンス社 (2004) を参考にした。もし量子力学の基礎で不明の点が出たら，この本を読むことを勧める。量子光学の基礎に関しては，C. Cohen-Tannoudji, J. Dupont-Roc, G. Grynberg 著 “*Photons and Atoms — Introduction to Quantum Electrodynamics*”, John-Wiley & Sons, Inc. (1989) および W. P. Schleich 著 “*Quantum Optics in Phase Space*”, WILEY-VCH (2001) を参考にした。また，量子情報科学の基礎に関しては，M. A. Nielsen, I. L. Chuang 著 “*Quantum Computation and Quantum Information*”を参考に行っている。これらの本はとてもよく書けているので一読を勧める。

最後に，同じ専攻に属し学科の大先輩でもある藤原毅夫教授には本書の執筆を薦めていただき御礼申し上げたい。また，執筆に際して支えていただいた東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻古澤研究室のメンバーに感謝したい。特に青木隆朗博士には筆者の執筆中に幾多の仕事を引き受けてもらい，非常に感謝している。また，家庭において支えてもらった妻の朝子には特に感謝している。さらに，博士課程の学生である米澤英宏君には原稿を読んでもらいコメントをいただいた。記して感謝したい。

2005 年 1 月

古澤 明

目次

第 1 章 量子光学	1
1.1 シュレディンガー描像とハイゼンベルク描像	1
1.2 調和振動子	2
1.3 電磁場の量子化	12
1.4 時間発展としての物理過程	22
1.5 コヒーレント状態	26
1.6 スクイーズド状態	34
1.7 密度演算子	39
1.8 光の量子力学的測定——バランス型ホモダイン測定	40
1.9 ロスと真空場	47
1.10 ウィグナー関数	49
1.11 量子エンタングルメントと量子光学	57
1.11.1 2 者間の量子エンタングルメント	57
1.11.2 3 者間の量子エンタングルメント	71
第 2 章 量子情報物理	77
2.1 量子情報と量子エンタングルメント	77
2.2 量子情報処理	83
2.3 基本的量子情報処理としての量子テレポーテーション	88
2.3.1 量子ビットのテレポーテーション	88
2.3.2 ザイリンガーグループの実験	94
2.3.3 連続量テレポーテーション	102
2.3.4 カリフォルニア工科大学での実験	104
2.3.5 量子テレポーテーションネットワーク	109
2.3.6 ハイブリッド量子テレポーテーション	114
2.4 量子エラーコレクション	119
2.4.1 量子ビットのエラーコレクション	120
2.4.2 連続量エラーコレクション	123
2.5 量子テレポーテーションを利用した量子情報処理の展望	127
2.5.1 量子テレポーテーションを用いたユニバーサル量子情報処理	127
2.5.2 大規模・汎用量子情報処理へ向けた展望	130
章末問題解答	136
索引	144
あとがき	147