

基礎からの 量子光学

—基礎理論から実用化に向けた取組みまで

監修

(社)応用物理学会 量子エレクトロニクス研究会

松岡正浩、江馬一弘、平野琢也、岩本 敏

まえがき

光学現象を扱うのに光と物質とともに量子論によって考えると、光を古典論でみた場合の予想とは異なる量子効果が得られる。これは多くの場合われわれが慣れてきた直感とは異なるものである。このように光と物質とともに量子化して扱う分野を量子光学と呼ぶ。歴史的には古典的な電磁波を量子論的に記述することからまず始められ、ついで、古典論にはない非古典的電磁波の状態が見いだされた。ここでは波動性と粒子性の境界における光学現象が明らかにされ、さらに、古典的限界を超えた様々な可能性が開かれ、その応用分野が発展している。

量子光学は古典光学や電磁気学に比べてとりつきにくい点があることは否めない。古典光学には通じているが量子光学はこれから学びたいとか、古典電磁気学は学んだが量子化された電磁場についてはこれからと思う人も多いであろう。あるいは量子光学は知っているがその応用分野について知りたいとか、さらには古典的な情報理論の上に量子情報について知りたいという場合もある。このような要望のために、できるだけ親しみやすい説明を行うことが求められている。そこで、オプトロニクス誌上では、2006年1月から2008年9月にわたって「基礎からの量子光学」という量子光学の基礎から応用にわたる連載をおこなった。本書はこれをまとめて基礎編と発展編、応用編としたものである。

各章は原則として、それぞれの分野を専門とする著者によって分担して執筆されたものであるが、基礎編はできるだけ全体を通して読めるように再構成した。発展編と応用編の各章は基礎編との関連を保ちながらも比較的独立したものになっている。たまたま2005年のノーベル物理学賞が量子光学分野の3教授に贈られたが、本書の企画はそれらの分野を十分に含むものであった。量子光学の基礎分野では、光の波動性と粒子性、あるいは光の二重性や真空揺らぎなど、比較的日常的にも耳にする概念が現れる。また、量子情報通信の応用分野ではそれらが新技術の鍵となっている。量子光学は歴史的にも量子力学の永年の問題を解決し、それを信頼あるものとし、内容を豊かなものにしてきた。量子光学がいかに基礎物理理論から現実の実験、日常の身近な応用までを直結する、魅力ある分野であるかを多くの方々に知っていただき、

この分野の発展にも参加していただきたいと願っている。

最後に、本書は(社)応用物理学会 量子エレクトロニクス研究会の依頼による連載をもとにできたものであることを記し、同会に感謝する。また、ご多忙中にもかかわらず各章の執筆の労を執って下さった著者の方々に心から感謝を申し上げる。更に、月刊誌とそれに続く本書出版の機会を与え、編集に労を尽くされたオプトロニクス社の川尻多加志氏、三島滋弘氏、宮崎尚樹氏に御礼を申し上げる。

2009年9月

監修者代表 松岡正浩

監修者

(敬称略)

松岡 正浩	(独) 情報通信研究機構 招聘研究員, 東京大学名誉教授
江馬 一弘	上智大学 大学院理工学研究科 理工学専攻 教授
平野 琢也	学習院大学 理学部 物理学科 教授
岩本 敏	東京大学 生産技術研究所 准教授

執筆者

(敬称略・50音順)

青木 隆朗	京都大学 大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 特定准教授
石坂 智	日本電気(株) ナノエレクトロニクス研究所 主任研究員
伊藤 公平	慶應義塾大学 理工学研究科 基礎理工学専攻 教授
井元 信之	大阪大学 大学院基礎工学研究科 物質創成専攻 教授
岩本 敏	東京大学 生産技術研究所 准教授
臼杵 達哉	(株)富士通研究所 ナノエレクトロニクス研究センター 主管研究員
枝松 圭一	東北大学 電気通信研究所 教授
江馬 一弘	上智大学 大学院理工学研究科 理工学専攻 教授
香取 秀俊	東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 准教授
神成 文彦	慶應義塾大学 理工学部 電子工学科 総合デザイン工学専攻 教授
小芦 雅斗	大阪大学 大学院基礎工学研究科 物質創成専攻 准教授
上妻 幹旺	東京工業大学 大学院理工学研究科 物性物理学専攻 准教授
佐々木 雅英	(独) 情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター 量子ICTグループ グループリーダー
高橋 義朗	京都大学 大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 教授
竹内 繁樹	北海道大学 電子科学研究所 教授, 大阪大学 産業科学研究所 招聘教授
武岡 正裕	(独) 情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター 量子ICTグループ 主任研究員
富田 章久	(独) 科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業発展研究 量子情報システムアーキテクチャ グループリーダー
鳥井 寿夫	東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻 准教授

- 納富 雅也 日本電信電話(株) NTT物性科学基礎研究所 グループリーダー, 特別研究員
- 長谷川 俊夫 三菱電機(株) 情報技術総合研究所 情報セキュリティ技術部 主席研究員
- 早瀬 潤子 電気通信大学 先端領域教育研究センター 特任助教
- 平野 琢也 学習院大学 理学部 物理学科 教授
- 藤原 幹生 (独) 情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター 量子ICTグループ 主任研究員
- 松岡 正浩 (独) 情報通信研究機構 招聘研究員, 東京大学名誉教授
- 南 不二雄 東京工業大学 大学院理工学研究科 物性物理学専攻 教授

— 第 1 部 —

基礎編

第1章

量子光学は量子力学の フロントランナー

この章では本書で扱う量子光学という分野についてその概要を述べる。まず、量子光学とはどんな分野であるかについて考察し、光の二重性や、量子化と真空揺らぎ、重ね合わせ状態、もつれた状態などの概念を中心に、その効果が現れる現象について述べる。これによって、量子光学が量子力学研究の当初からあった種々の問題点を解決し、その信憑性を高め、その内容をいかに豊かにしてきたかを知ることができよう。表題のフロントランナーはその意味のつもりである。量子光学が量子力学の基礎の理論を始め、思考実験として考えられた問題を現実の実験として可能にし、今や日常の身近な応用に直結する魅力ある分野となってきたことを概観する。それぞれの具体的内容の詳細については以下の各章を参照していただきたい。

1 量子光学とは何か

量子光学とは何か。それを単純に定義するのは案外難しい。簡単には力学が量子力学になり、多くの物理学の分野が量子何々学となったように、光学も量子光学になったといえるかも知れない。しかし、それほど単純ではないのは、光子自体の量子力学の本格的な発展は遅く、レーザーの発明のあとになってからであると考えられるからである。光の量子性は、今からちょうど100年前に量子力学の建設に大きな役割を果たしたのに、量子論による光のコヒーレンス理論の研究は1963年になってからである。それからまもなく70年代にスクイーズド状態が議論され、非古典的状态の研究が始まった。しかし、

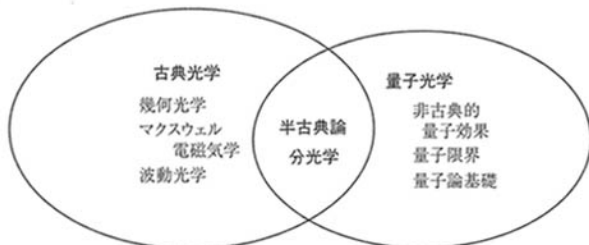


図1 量子光学の領域

ちょうどその頃、物質の側を量子論で扱うが、光の側は古典論で扱うといういわゆる半古典論によるコヒーレント過渡現象の分光学が盛んになり（基礎編第4章）、当時はこれを量子光学と呼んでいたのである（図1）。

もう一つ定義が単純にならないのは、当初量子論の初期から問題になってきた光の二重性やパラドックスなどの思考実験が検証されると、その後すぐに、それらの非古典的量子効果を利用した情報通信分野への応用が急速に広がり、それ自身が大きな分野になったためである。それはプランクの提唱した光子からまだまだ多くの実を得ることを示す。

そこで、本書では量子光学を、光も物質とともに量子論によって扱う光学分野とし、古典論の予想とは異なる非古典的量子効果や、直感とは異なる不思議な現象、量子限界に迫る測定、量子論の基礎に関わる測定などを中心とし、さらに、それらの応用を含む分野であると考え。しかしながら、いま述べた半古典論によるコヒーレント過渡現象などは量子光学に進むために欠かせない分野であるので、本書ではステップとして第2章から第4章までは半古典論の解説から始めて行く。

2 原子系のコヒーレント過渡状態—半古典論

コヒーレントで、単色な、パルス幅の短い、また指向性と集光性のよい光など、優れた性質の光がレーザーによって得られるようになって、原子系をコヒーレントな励起状態に励起する精密な光学実験が発展した。これは歴史的には、磁気共鳴やマイクロ波における分光学を光領域において実現するも

のであった。そこでは原子分子やその中の電子スピンや核スピンは量子力学的に扱うが、吸収・放出される電磁波は古典的なマクスウェルの電磁波によって表された。このような理論を半古典論という。物性分野では量子論的に考えられた物質に、古典的な光が摂動として加わった状況を扱うので、これも一種の半古典論である。励起される原子系の状態は単に基底状態から励起状態に励起されるように表されるのではなく、基底状態と励起状態の量子力学的重ね合わせという中間の状態を経て励起される、その重ね合わせ状態は位相を持ち、系内ですべての原子の位相がそろっているかないかが区別される。これはスピンのいえば磁場の上下の方向に向いたスピンだけでなく、横向きのさまざまな方向のスピン状態があって、それらがそろっているかどうかの区別をすることである。このような励起の過程は磁気共鳴において提唱されたブロッホ方程式によって表される。そこでは、物質の側は簡単な2準位として、光による励起を詳細に解析する。光は単なる摂動ではなく、上準位の励起状態の寿命だけでなく、重ね合わせ状態の位相の乱れてくる寿命も問題にする。それぞれを縦緩和時間 T_1 と横緩和時間 T_2 として表す。このような概念はスピンの限らずどんな2準位に共鳴する電磁波による励起にも共通である。このような位相のコヒーレンスは緩和するまでの過渡的な状態であり、コヒーレント過渡状態と呼ばれる。これに特有な様々な現象はコヒーレント過渡現象と呼ばれる。これらは原子系の励起状態に関してそれまで知られていなかった新しい概念である。光による原子や分子、固体における2準位間の電磁波の共鳴に関しても、様々なコヒーレント過渡現象が知られるようになった。これらが半古典領域における量子光学と考えられている。

3 粒子性と波動性、光の二重性

1807年に行われたヤングの干渉実験は、その後、光の波動性を示す最も重要な証拠とされてきた。光が波動であれば干渉の現象が起こることは簡単に説明できる。しかし、光が粒子であっても、また1個の粒子であっても干渉するだろうかという問題がよく議論されてきた（基礎編第7章）。

二つのスリットAとBに光が入射する問題を考える。光が波であればAを通る光路とBを通る光路に分かれて進むから、これらの光路差によって干渉縞ができる。

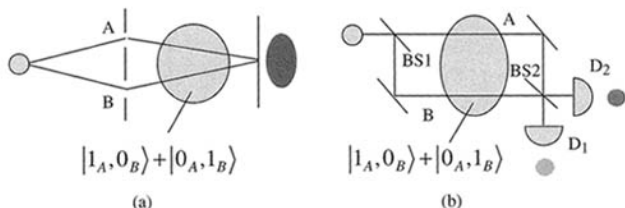


図2 ヤングの干渉

(a) 二つのスリットの場合 (b) ビームスプリッターで分ける場合

粒子であれば、一つの光子はAを通る光路（モード）とBを通る光路に同時には行けないのではない。干渉は光路の差があって起こるのだから、この場合には干渉は起こらないのではない。事実もし、Bの光路をシャッターで塞いだとすれば、検出器に到達した光子はAの光路を通ったことが確定する。このように、光路が一つに決まると光子が検出され、干渉するのをやめてしまう。

ところが、このシャッターが開いていれば、高感度CCDカメラで1光子の像をとったとして、長時間累積させると干渉縞をつくる。すなわち、波動であっても粒子であっても、光がA、Bどちらの光路から来たのかわからないときは干渉するのである。

それでは、同じ光源からの光なのに、それがいつどこで粒子になったり、あるいは波動になったりするのかを追求する必要がある。

4 重ね合わせ状態

4.1 重ね合わせ状態と波動関数の収縮

量子力学では重ね合わせ状態という古典力学にはない状態が許され、これがわれわれの直感と相容れない結果を生ずる。例えば、スピンの場合を思い出してみる。あるz軸に平行なスピン状態と反平行の状態をそれぞれ $|\alpha\rangle$ 、 $|\beta\rangle$ とする。ここで $|\dots\rangle$ は状態ベクトルと呼ばれ、その数学的実体は互いに直交するベクトルであって、

$|\alpha\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, $|\beta\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ と表される。これらは2次元ベクトル空間ではその基底であるから、任意のスピンの状態は、これらの重ね合わせ状態として

$$|\psi\rangle = c_1|\alpha\rangle + c_2|\beta\rangle, \quad |c_1|^2 + |c_2|^2 = 1 \quad (1)$$

とかける (図3)。ここで、 c_1 , c_2 は、 $|\alpha\rangle$, $|\beta\rangle$ の起こる確率振幅である。これらは一般に複素数であって、状態が一般に複素数で表されるのは量子力学に特有なことであり、重要な意味を持っている (古典的な情報の単位ビット0と1を考えて、1を $|\alpha\rangle$ に対応させると、0は $|\beta\rangle$ に対応する。しかし、

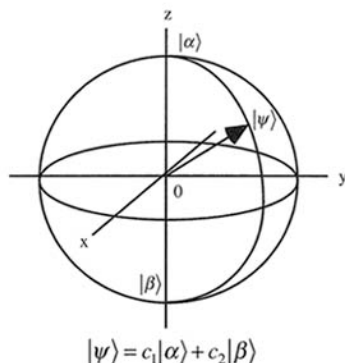


図3 スピンの重ね合わせ状態

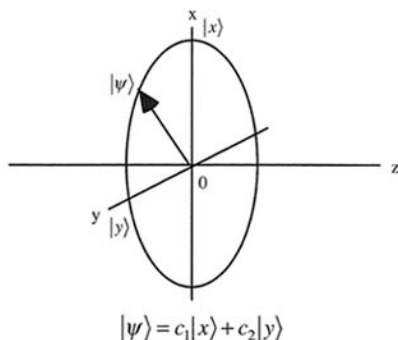


図4 偏光の重ね合わせ状態