

# 光量子の 100 年：レーザーと量子光学の発展

霜 田 光 一

## One Hundred Years of Light Quantum: Evolution of Lasers and Quantum Optics

Koichi SHIMODA

One hundred years ago Albert Einstein proposed the idea of light quantum. In 1916 he created a quantum theory of radiation and introduced the concepts of spontaneous emission and stimulated emission. The idea of population inversion led to the invention of the maser in 1954 and the laser in 1960. Advent of the laser revolutionized optics. Nonlinear optics of harmonic generation, four-wave mixing etc. have been developed. Optical transients such as the photon echo, electromagnetically induced transparency, and multi-photon absorption were studied. Quantum optics was originally concerned with quantum noise, the coherent state, and photon statistics. It has now become a challenging field of science and technology including quantum cryptography and Bose-Einstein condensation.

**Key words:** light quantum, photon, laser, nonlinear optics, quantum optics

### 1. 「光量子」の誕生

光量子という意味のドイツ語 Lichtquants (複数は Lichtquanten) が産声をあげたのは、アインシュタイン (Einstein) の有名な 1905 年の論文<sup>1)</sup>の中であった。この論文はしばしば、光電効果の論文であるとか光量子理論の論文であるとよばれているが、表題は「光の発生と変脱 (ドイツ語 Verwandlung は変換と訳されることもある) に関する 1 つの発見的観点について」となっていて、光電効果が主題ではない。光電効果が論じられているのは、ページ数にすると全体の 6 分の 1 ほどの §8 「光照射された固体による陰極線の発生について」である。そして、「光量子」という用語は、蛍光に関するストークスの法則を議論する §7 ではじめて現れた。この論文では主として、黒体放射について熱力学的エントロピーが論じられており、プランクの仮定したエネルギー量子を光量子とみなしたのは翌年の論文<sup>2)</sup>であった。この第 2 論文で、光電効果における光量子の概念も明確になったが、両論文とも周波数  $\nu$  の光量子は  $h\nu$  ではなくて、 $(R/N) \beta\nu$  と表されている。ここで  $R$  は気体定数、 $N$  はアボガドロ数、 $\beta = h/k$  であっ

て、アインシュタインはなかなかプランク定数  $h$  を使わなかった。

光量子はいまでは光子 (photon) とよばれることが多いが、ラム (Lamb) によれば最初に光子という用語を使ったのは 1926 年、化学結合を研究していたルイス (Lewis) であった<sup>3)</sup>。しかし、彼は光子をアインシュタインの光量子とは明らかに違う意味で使っていた<sup>4)</sup>。それが、いつの間にか光量子と同じ意味で通用するようになった。

### 2. 自然放出と誘導放出の理論

アインシュタインは 1905 年の論文で、黒体放射の熱力学的統計的議論を行ったが、1909 年には、黒体放射のゆらぎには粒子的ゆらぎと波動的ゆらぎの両方が存在することを示している。そして、一般相対性理論の仕事が一段落した 1915 年、物質と放射の相互作用を考察し、統計的ゆらぎの議論に基づいて、光の放出と吸収の量子論をつくった<sup>5,6)</sup>。1913 年にボーア (Bohr) が原子構造のモデルを提出し、離散的な定常状態のエネルギー準位間の遷移として水素原子のスペクトル系列を説明した。アインシュタイ

ンはこれを受けて、遷移がどのように起こるか、すなわち光と物質の相互作用の理論を考えたのである。彼は黒体放射において、物質と光とがどのようにして熱平衡状態になるのかという問題に取り組み、ブラウン運動の理論も応用して、物質と光の相互作用を物質の分子による光量子放出の確率過程として記述した。その確率過程は、外放射（ドイツ語 Ausstrahlung）と内放射（ドイツ語 Einstrahlung）の2種類であった。前者は現在の学術用語では自然放出であって、それが起こる確率は  $A$  で表された。後者は誘導放射であって、正の誘導放射が誘導放出、負の誘導放射が誘導吸収または吸収であって、係数  $B$  を用いてその確率が表された。これらはその後、アインシュタインの  $A$  係数および  $B$  係数とよばれている。

原子も分子も多数のエネルギー準位をもっているが、上の準位  $W_2$  にある原子が下の準位  $W_1$  に遷移するときには周波数  $\nu = (W_2 - W_1)/h$  の光を放出する。時間  $dt$  の間に遷移する確率は  $(A + B\rho)dt$  と表され、 $A dt$  は自然放出、 $B\rho dt$  は誘導放出の確率である。ただし、 $\rho$  は周波数  $\nu$  の光のエネルギー密度を表す。他方、下の準位  $W_1$  にある原子が光を吸収して上の準位  $W_2$  に遷移する確率は  $B\rho dt$  である。

そこで、下の準位に  $N_1$  個の原子があり、上の準位に  $N_2$  個の原子があるとき、これらの原子から単位時間に放出される光のエネルギーは

$$P_e = (A + B\rho)N_2$$

となる。そして、単位時間に吸収される光のエネルギーは

$$P_a = B\rho N_1$$

である。

光と原子とが平衡状態にあるときには、 $P_e = P_a$  であるから、平衡状態の光のエネルギー密度は

$$\rho = \frac{A}{B} \cdot \frac{N_2}{N_1 - N_2}$$

となる。

原子が温度  $T$  で熱平衡状態にあるときには、ボルツマン分布

$$N_2 = N_1 \exp(-h\nu/kT)$$

が成り立つので、このとき光のエネルギー密度は

$$\rho = \frac{A}{B} \cdot \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

となる。ウィーンの変位則から  $A/B = \alpha\nu^3$  であるから ( $\alpha$  は定数)、この式はまさにプランクの熱放射式になる。

黒体にはすべての周波数の光に共鳴するエネルギー準位の対があるので、上式で黒体放射のスペクトル分布が与えられる。

### 3. メーザーの発明

メーザーは、誘導放出によるマイクロ波増幅という意味の英語 Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation の頭字語 maser である。したがって、アインシュタインの理論を基礎にしてメーザーが生まれたということが出来る。しかし、ヘルツ (Hertz) の実験を基礎にして数年後に無線電信が実現し、あるいはファラデー (Faraday) の電磁誘導の発見からまもなく発電機が作られたのに比べると、アインシュタインの理論から1954年の最初のメーザーまで37年、1960年のレーザーまで43年の期間がある。これは、メーザーとレーザーがアインシュタインの基礎研究に直結する応用研究でなかったことを意味している。

熱平衡状態の物質では、常に上のエネルギー準位の分子数  $N_2$  は下の状態の分子数  $N_1$  より小さいので、誘導放出は誘導吸収より小さく、差し引きでは常に吸収になる。もしも反転分布を作って  $N_2 > N_1$  になれば、誘導放出が吸収を上まわって光の増幅が可能になる。これがレーザーの原理であるが、反転分布は負の温度に相当するから、熱力学的に不可能であると信じられていた。

それでも1920年代と1930年代に、部分的または過渡的な誘導放出によって負の吸収や負の分散を観測する研究が行われていた。しかし、当時だれもメーザーまたはレーザーを提案して具体的な研究をしてはいなかった。

そして1940年代には、第二次世界大戦で電波兵器としてのレーダーの開発に多数の物理学者と電子工学者が動員され、マイクロ波の発振器、検波器、および導波管のマイクロ波回路などの技術が著しく進歩した。戦後、これらのマイクロ波技術を利用して、マイクロ波分光学、すなわち原子や分子のマイクロ波スペクトルの研究が大学でも会社の研究所でも盛んになった。液体や固体を試料とするラジオ波の核磁気共鳴の研究も始まった。

このとき、大学の物理や化学の研究室にマグネトロンやクライストロンとともに、真空管増幅器やシンクロスコープが導入された。そして、エレクトロニクスが多能な実験道具になっただけでなく、自然科学研究の姿勢にも変革をもたらした。それまで、自然科学としての分光学では、原子や分子などの自然現象としての発光や光の吸収・散乱などをありのままに研究しようとしていた。しかし、電波分光学の実験では、人工の発振器を用いて、原子、分子、あ

るいは原子核をゆり動かして、その応答を測定し、電場や磁場で試料を変調する実験が普通になった。これは、工学的概念を取り入れて生まれた新しいタイプの研究だった。

他方、戦前の無線技術者や電気工学者は量子物理学とは無縁で、古典電磁気学で事足りていた。しかし、マイクロ波の伝搬には水分子の共鳴吸収が著しく影響し、検波には半導体ダイオードが用いられ、導波管回路のアイソレータなどにフェライトが利用されるようになったので、次第に工学技術者も量子現象に無関心ではいられなくなった。

電波分光測定によって、多数の分子や原子のマイクロ波スペクトルが見いだされるにつれて、研究者の間で、なぜマイクロ波の発光スペクトルが観測できないのか、反転分布をつくれれば誘導放出によって負の吸収が実験できないかなどと、しきりに論じられるようになった。そして、いろいろの提案が討議され実験されて、もしも反転分布が実現すれば、その誘導放出は入射マイクロ波の強度を増すだけでなく、コヒーレント増幅ができると考えられるようになった。

1950年代のはじめ、反転分布した分子に正のフィードバックをかければ、分子発振器ができそうだという着想が生まれた。コロンビア大学のタウンズ (Townes) らとモスコウ大学のバソフ (Basov) らが分子発振器の実験を始め、1954年にタウンズらが最初にアンモニア分子発振器で波長1.25 cmの発振に成功した<sup>7,8)</sup>。このような装置は発振器だけでなく、増幅器にも分光器にも検波器にもなるので、総称してメーザーとよばれるようになった。

分子に電氣的フィードバックをかけて分子発振器を作ろうというような発想は、古典的分光学者にはできなかったことである。反転分布で光の増強ができるとは考えても、分子をコヒーレントに制御できるとは考えなかった。そして、理論物理学者は、反転分布は負の温度に相当し、熱力学の原理に反するので、メーザーを作ることは不可能であるときえ主張していた。また、電気工学者には、原子や分子を使って人工的な発振器を作ろうという発想は不可能だった。

電波分光学者がマイクロ波の誘導放出の実験方法を考えたとき、通常分光測定装置で負の吸収を観測しようとしたのではなく、空洞共振器の中に反転分布した分子を入れる実験装置を最初から計画した。このようなマイクロ波の空洞共振器と、分子の量子遷移とのコヒーレント相互作用によってフィードバック発振器ができるだろうという発想は、分子の振る舞いを考える分光学者と、信号の増幅とかフィードバックを考えるエレクトロニクスとが融合したことによってはじめて生まれたのだということが出来る。

#### 4. メーザーからレーザーへ

メーザーができると、すぐにそれは高感度の分光器にも、低雑音増幅器にも高精度の周波数標準にもなることが示された。しかし、メーザーは分子のスペクトルとしては例外的に長波長のマイクロ波スペクトルを利用したものであって、分子や原子には、短波長の赤外や可視域、さらに紫外域に多数のスペクトル線があるので、メーザーの原理で光(赤外線、可視光線、紫外線)の発振器もできるはずである。

そこで、いろいろの分子を使って、メーザーの発振波長を短くする努力がなされたが、3 mm程度が限界であった。波長を短くするには、それに比例して空洞共振器を小さくしなければならないので、共振器の損失が大きくなり、しかも共振器の中に入れられる分子数が減る。そして、励起分子を作るのに必要なパワーは周波数の3~4乗に比例して増大するからである。

共振器を波長に比例して小さくしないと、共振モード密度は周波数の3乗に比例して大きくなるので、光の周波数ではスペクトル線幅の中に何兆もの多数のモードがあつて、とてもコヒーレントな発振器はできそうもない。しかし、1958年にショーロウ (Schawlow) とタウンズは、2枚の反射鏡を向かい合わせて側面を開放した光共振器では、少数のモードだけを選択することができ、また必要な励起パワーもあまり大きくなならないという考察を発表した。これについても疑問視する者が多く、光のメーザーすなわちレーザーは不可能でないにしても、非常に困難だろうと考えられていた。しかし、それ以来レーザーの開発競争は加速され、1960年にメイマン (Maiman) がルビーレーザーのパルス発振に成功し、引き続きジャバン (Javan) らはヘリウムネオンレーザーの連続発振に成功した<sup>7,8)</sup>。

これらは当初、光メーザー (optical maser) とよばれていたが、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiationの頭字語でレーザー (laser) とよばれるようになった。

すぐにレーザーの鋭い指向性、高い輝度と単色性が注目されて、魔法の光ともよばれた。安定化した2台のレーザー光を混合すると、きれいなビートができることも観測された。レーザーはそれまでの他の光源と違って、空間的にも時間的にも、ほとんど完全にコヒーレントな光を発生することがわかった。

1960年代は各種のレーザーの開発がブームになった。ルビーのほかにも多種類の結晶でレーザーが作られた。そして1962年には半導体レーザー、1966年には色素(溶

液) レーザーも現れた。気体レーザーは中性原子のほか、分子、イオンなどのレーザーも現れ、発振波長域も遠赤外から真空紫外にまで広がった。

そして、レーザーの種類や発振波長がふえただけでなく、安定度やビームの性能も年々向上した。単一モード発振と発振周波数の安定化はまず気体レーザーで、次に固体レーザーで実現された。半導体レーザーは1970年代になってから量子コヒーレンスを制御する技術が進み、面発光レーザーや量子井戸レーザーが作られるようになり、1980年代には量子細線および量子ドットレーザーもできるようになった。そして、単一光子発生器など、光量子制御装置が半導体レーザーで作られるようになってきている。

超短パルスレーザーの進歩の跡をたどってみると、まず1961年にQスイッチレーザーによってパルス幅は1 $\mu$ s以下になり、次にモード同期によって1ns以下に狭められ、さらにパルス圧縮技術で1ps以下に、そして最近のチャープパルス増幅とパルス圧縮技術の進歩によって、数fsまで狭められ、パルスの尖頭出力は1960年のkWレベルからPWのレベルまで12桁も上昇した。

## 5. 非線形光学

レーザー光の作る電磁場は従来の光に比べると非常に強いので、ルビーレーザーが現れた翌年の1961年には光の第二高調波発生が観測された。その後はQスイッチレーザーにより1MW以上の尖頭出力も容易に得られるようになり、各種の非線形光学効果が研究されるようになった。水素の原子核からボーア半径の距離での電場は $5 \times 10^{11}$  V/mであるが、尖頭出力1~100 MWのレーザー光を1 $\mu$ m<sup>2</sup>に集束したときの光電場は、それと同程度の $0.6 \sim 6 \times 10^{11}$  V/mになる。そこで、各種の原子の中の束縛電子は大振幅で非線形に振動し、イオン化も起こる。

光高調波発生のほか、和周波・差周波の発生、光整流、四光波混合、光パラメトリック効果、誘導ラマン効果、誘導ブリュアン効果、光の自己集束、自己位相変調、フォトレフラクティブ効果(光誘起屈折率)、レーザープラズマ発生、レーザー誘起蛍光、多光子吸収、飽和吸収などがある。その他、フォトンエコー、自己誘導透過または電磁誘導透過、量子ビートなどの過渡的現象も非線形光学に含まれる。その中にはラマン効果や蛍光のように量子効果を含むものもあるが、大部分は光を古典的な電磁波として説明できる現象である。そして、これらは光変調器や光周波数変換器などの光エレクトロニクス素子、ホログラフィーなどの画像技術、光計測、分光測定などに応用されている。

1980年代には、フェムト秒技術とチャープパルス増幅

技術が進歩して、1990年代には、パルス幅30 fs以下で尖頭出力1 TW以上の光による相対論的非線形光学が研究されている。100次以上の高次高調波発生、X線レーザー、アト秒計測、分子の光解離のダイナミクス、波形と位相の制御、周波数測定などに発展している。

## 6. 量子光学の発展

「量子光学」または「量子光学の…」というタイトルの和書がすでに10冊以上も出版されているが、その内容はかなりまちまちである。量子光学とは非古典的光学であるという点では一致しているが、その内容はどの方面を重視するか、著者によって異なる。広義の量子効果には、光電効果やコンプトン効果も含まれるが、通常は光の粒子性と波動性とが絡んでくる量子論的效果を指している。「量子光学」という用語は1960年代の中ごろから使われるようになったが、初期にはレーザーの線幅や光子統計、コヒーレント状態の研究が中心であった。

レーザー以前には、量子光学の研究はほとんどなかった。先駆的研究は、前述のアインシュタインによる熱放射の量子ゆらぎと1935年のEPRパラドックス<sup>9)</sup>である。その後、重力波検出など高感度レーザー計測の目的で、標準量子限界、量子非破壊測定(quantum non-demolition)、スクイズド状態(squeezed state)、光子反集群(anti-bunching)など、量子ゆらぎを制御する研究が発展している。

EPRパラドックスはもともと、量子論が不完全であることを指摘する意図でアインシュタインが提出したパラドックスであった。ところが長い論争の後、1980年代になってレーザー実験技術の進歩により、2個の光子の間の古典論的相関と量子論的相関との相違がベルの不等式を使って実証された。その後、相関二光子、エンタングルメントまたは量子もつれの基礎的および応用研究が進んでいる。

その応用は、量子暗号、量子テレポーテーション、あるいは量子コンピューターなど、魅力的な研究に発展している。それには量子状態の重ね合わせ、いわゆるシュレーディンガーの猫状態が利用されるので、量子コヒーレンスの生成と操作だけでなく、量子コヒーレンスの長寿命化が重要な研究課題になっている。

アインシュタインの1917年の論文ではじめて議論された原子の発光と吸収におけるドップラー効果と光量子の反跳効果を利用して、1980年代にはレーザー冷却の研究が進み、1995年にはルビジウム原子とナトリウム原子でボース・アインシュタイン凝縮の実験が成功した。引き続いて、他の原子のボース・アインシュタイン凝縮も実験さ

れ、凝縮体の特性の研究は、密度と速度分布の測定に始まり、原子波レーザー、原子波光学が研究されている。ボース・アインシュタイン凝縮体の超流動渦、凝縮体の励起、凝縮体と他の原子系との相互作用など、いまでは最も活発な研究分野になっている。

光量子の100年の歴史の前半では、量子力学の基礎的概念、例えば不確定性原理や観測の理論などを検証するための思考実験に光量子は重要な役割を演じた。そして、光の量子論が確立され、レーザー・レーザーの発明を導いた。レーザーは光の物理と技術を一新し、非線形光学と量子光学という肥沃で広大な光学を開拓した。その範囲は非常に広いので、本文ではキーワードを並べただけのような記述になってしまった。非線形光学と量子光学に関する文献は重要なものだけでも100編を超え、一切引用文献のリストから省くことにしたので、既刊書やインターネットで検索していただきたい。

光量子は、レーザー誘起化学反応、反応機構の解明と制御など光化学にも革新をもたらしている。また、材料科

学、光加工、生物学、医学にもインパクトを与えているが、紙数の制限もあり、「光学」との距離も離れてくるので省略したが、今後の発展がますます期待される。

## 文 献

- 1) A. Einstein: "Über einen Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt," Ann. d. Physik, **17** (1905) 132-148.
- 2) A. Einstein: "Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption," Ann. d. Physik, **20** (1906) 199-206.
- 3) W. E. Lamb: "Anti-photon," Appl. Phys. B, **60** (1995) 77-84.
- 4) G. N. Lewis: "The conservation of photons," Nature, **118** (1926) 874
- 5) A. Einstein: "Strahlung-Emission und -Absorption nach der Quantentheorie," Verh. d. Deutsche Physik. Ges., **18** (1916) 318-328.
- 6) A. Einstein: "Zur Quantentheorie der Strahlung," Physik. Zeits., **18** (1917) 121-128.
- 7) 霜田光一: 歴史をかえた物理実験 (丸善, 1996) pp. 143-209.
- 8) C. H. タウンズ著, 霜田光一訳: レーザーはこうして生まれた (岩波書店, 1999).
- 9) A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen: "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?" Phys. Rev., **47** (1935) 777-780.

(2005年7月8日受理)