OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	光と物質の超強結合 : 光子を量子とみなせるか?
Author(s)	馬場, 基彰
Citation	パリティ = Parity : physical science magazine. 2017, 32(11), p. 35-40
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/67777
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

articles

光と物質の超強結合
光子を量子とみなせるか？

馬場基彰

光の粒子である「光子」のダイナミクスから，本来の「電場と磁場」の量子論に立ちもどる。量子光学や量子情報技術が，その必要に迫られつつある。ほかの研究分野を巻き込みながら，未知なる科学技術が探索され始めている。

光子と量子

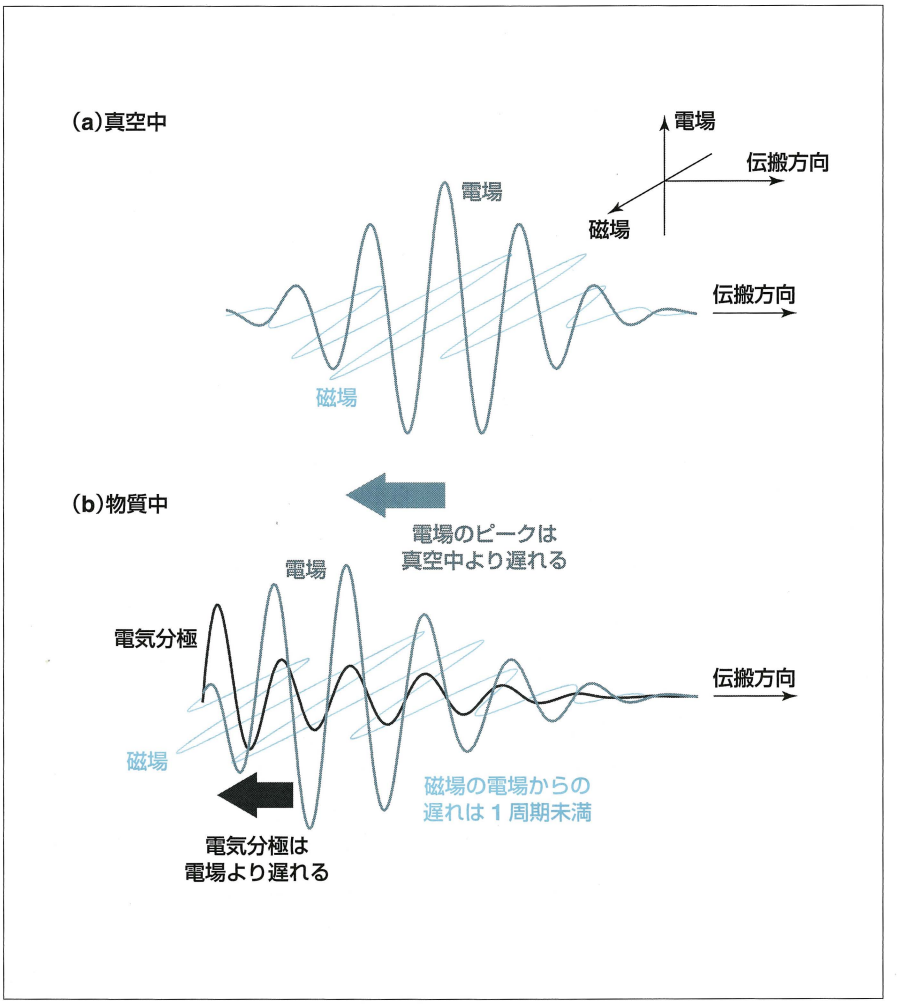
古典論から量子論に移行することで，連続的だと考えられてきたエネルギーは量子化される。また，粒子は重ね合わせ状態をとり得るようになる。光という波（電磁波）も光子という粒子として表現される。振動数νの光が量子化されたエネルギー（エネルギー量子）$h\nu$をもつ光子として解釈され，20世紀初頭における量子力学の確立に貢献してきた。光の量子論的な性質を議論する学問は，量子光学とよばれる。不確定性のある光の振幅と位相それぞれのゆらぎを制御することで，光による測定の精度を高めることができ，近年報告された重力波の検出に貢献している。また，光子の偏光などに関する重ね合わせ状態を情報（量子情報）に見立てることで，量子コンピューターや量子暗号通信などの量子情報技術が発展してきている。

エネルギー量子や量子情報を担う媒体は「量子」とよばれる。真空中を伝搬する光子は，そのエネルギー量子や量子情報を基本的に保つことから，量子とみなせる。伝搬の後に光子が物質に吸収されても，それらを物質に譲り渡すのであれば，やはり光子を量子とよんで差しつかえない。しかし，光子を量子とみなす描像は，実のところ，近似の産物でしかない。それは後述するように，量子光学の根幹である「光と物質の相互作用（物質による光の吸収と放出）」に関する近似である。光子を量子とみなす近似された描像のもとで，量子光学や量子情報技術は半世紀以上にわたり発展してきた。しかし，21世紀初頭のいま，量子情報技術などを実社会に応用[*1]しようとする世界的な流れのなかで，光や物質の量子論的な状態（量子状態）を高度に制御する技術が発達し，光子を量子とみなす従来の近似された描像が破綻しつつある。

たとえば，量子コンピューターの実用化のためにもっとも有望な系と現在みなされている超伝導回路では，回路を流れる電荷（電流）とそれにともなう磁束の運動が量子論に基づいて議論される。回路における電荷と磁束が，光の電場と磁場に相当する。電荷と磁束それぞれのノイズが注目され，それらをいかに抑制するかが研究の最前線でとり組まれている。これと同様に，本稿では，量子光学で従来議論されてきた光子のダイナミクスではなく，光を本来構成する電場と磁場の量子論に立ちもどって議論する。後述するように，光や物質の量子状態をいまよりも高精度に制御しようとすれば，その必要に迫られてしまう。

本稿ではまた，そのような近未来に直面する問題の解決のためだけでなく，光子を量子とみなさないこと，つまり近似せずに光と物質の相互作用を議論することで，未知なる科学技術を探索しようとする研究の流れについて紹介する。それは，光と物質とが非常に強く相互作用する「超強結合」とよばれる領域での物理であり，超強結合を示す多種多様な物理系が2009年頃から現在に至るまで盛んに報告されている[1)]。量子情報処理や高精度測定などの技術の発展だけでなく，電磁場が物質を巻き込んで相転移する現象や，電磁場環境の制御による化学反応の変化などが期待されており，熱力学・統計力学や化学など，ほかの分野を巻き込みながらさまざまな議論が展開され始めている。

＊1　世界中で量子情報技術の実社会への応用が近年盛んに研究され，日本では，革新的研究開発推進プログラムImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」，新学術領域「ハイブリッド量子科学」，CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」などのプロジェクトが展開されている。



〈図1〉真空中と物質中での光（電磁波）の伝搬
真空中（a）に比べて，物質中（b）では光の伝搬は遅くなり，電場のピークは遅れる。伝搬が遅くなる原因は，電場と電気分極との振幅のやりとりである。電気分極は光よりはるかに遅く伝搬するため，そのピークは電場のピークより遅れる。一方，電場に対する磁場の遅れは1周期未満である。

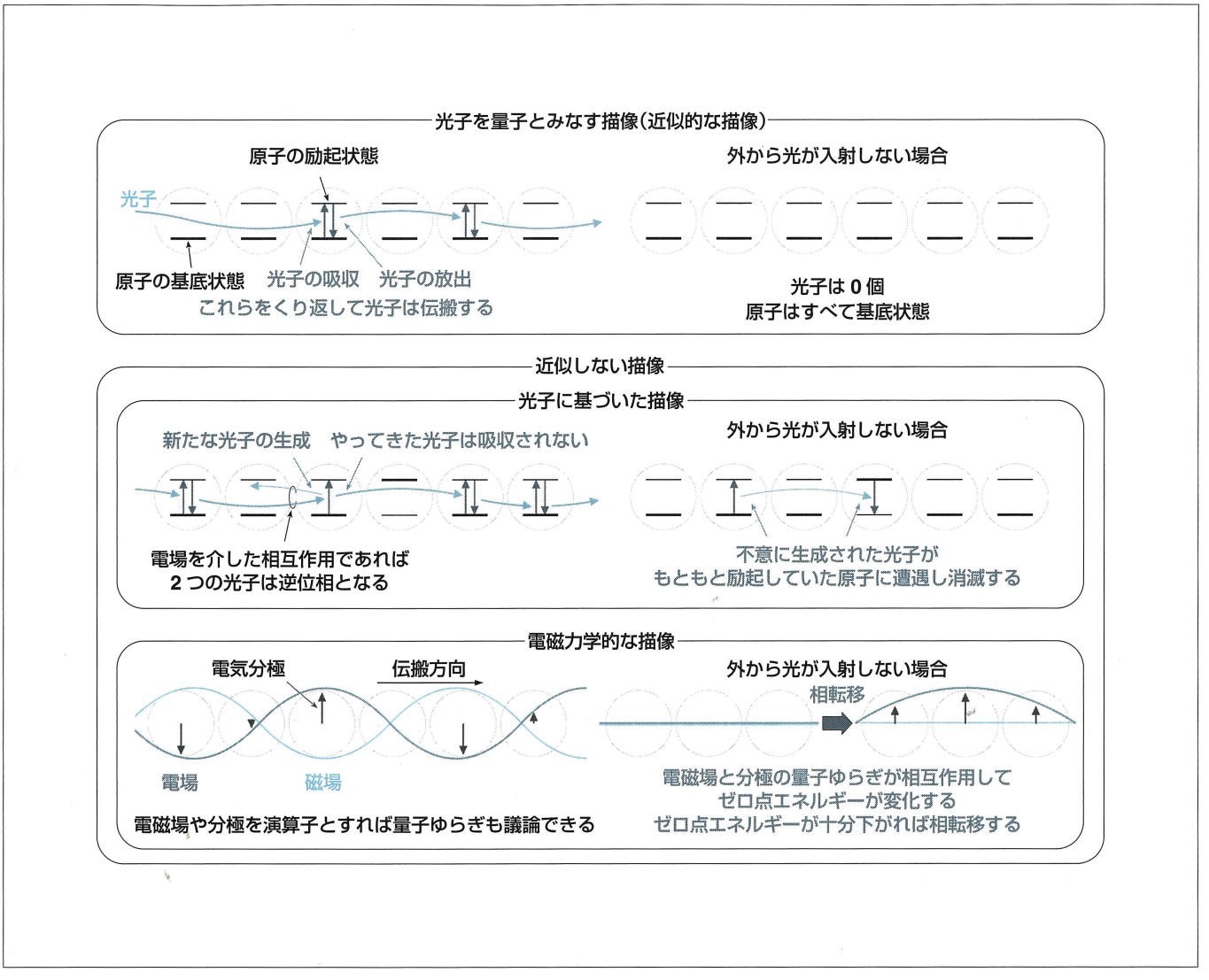
光子が量子でない物理

光つまり電磁波は，電場と磁場の時間的・空間的な振動である。光はさまざまな物理現象に顔を出し，地球上や宇宙にある物体の観測に用いられるだけでなく，通信やディスプレイ，太陽光発電など，われわれの日常に密着した存在である。読者の大半も，各自の目を受光器として，光を通じて本稿を目にしているかと思う。とはいえ，光だけで物事が完結するわけではなく，物質から光が放出され，光が物質に吸収されること，つまり光と物質とが相互に作用し合うことで，多彩な物理現象や多種多様な応用が得られる。

光と物質とが相互作用した結果の一例として，日常目にする光の反射や屈折が挙げられる。光が屈折することは，真空中（空気中）に比べ，物質中では光の伝搬が遅くなることから理解できる。では，なぜ光が遅くなるか？〈図1〉のように，物質中で光はその電場によって電気分極を誘起する。そして，誘起された電気分極は電場の振動を改めて誘起する。このように光は分極（以下，とくに指定しないかぎり電気分極をさす）と振幅をやりとりしながら物質中を伝搬する。分極自体の伝搬は光よりはるかに遅いため，物質中にて分極を引きずりながら伝搬する分，光は真空中に比べて基本的にゆっくりと伝搬していく。本稿で議論する光と物質の相互作用とは，この物質中における光と分極との振幅のやりとりをさす。

〈図1〉に示したように，電場の振幅のピークの伝搬は真空中より物質中のほうが遅れる。また，光より伝搬が遅い電気分極のピークは電場のピークよりもさらに遅れる。このように，分極は光よりも時間的・空間的に遅れて誘起される。ただし，光と物質の相互作用が強いほど，電場と分極との振幅のやりとりが頻繁に行われるため，分極の遅れは小さくなる。それは物質の誘電率（微視的には原子の遷移双極子モーメントや原子密度など）に依存するが，分極の遅れがどんどん小さくなり，光の波の周期や波長と同程度に，さらにはより小さくなること。これが上述の超強結合が意味するところである。

光と物質の相互作用の研究は，電磁



〈図2〉外から光が入射した場合としない場合について光子と電磁場に基づいた描像

(上左)光子を量子とみなす近似のもとでは，やってきた光子が原子に吸収され，再び放出される過程をくり返しながら物質中を伝搬する。(上右)外から光が入射しない場合，光子は0個，原子はすべて基底状態と近似的にみなされる。(中左)近似しない場合，やってきた光子が原子に吸収されず，新たな光子が後方に放出されたりする。電場を介して原子と相互作用する場合，やってきた光子と逆位相の光子が，磁場を介した場合は同位相の光子が後方に放出される。(中右)外から光が入射しなくても，光子が不意に生成され，もともと励起していた原子に遭遇して消滅する。(下左)〈図1〉と同様に電場・磁場・電気分極に基づいた光の物質中での伝搬を図示した。電磁場や分極を演算子として扱えば，それらの振幅や位相だけでなく，量子ゆらぎ(真空ゆらぎ)も議論できる。(下右)外から光が入射しない場合，電磁場や分極の期待値はゼロだが，それらの量子ゆらぎが相互作用し，ゼロ点エネルギーが変化する。ゼロ点エネルギーが十分下がれば，静的な電場と電気分極が自発的に現れるような相転移が起こる。

場と荷電粒子の運動を議論する電磁力学として，18世紀から19世紀にかけて発達した。荷電粒子の運動がマクスウェル方程式を通じて電磁場に影響する一方で，電磁場はローレンツ力としてニュートンの運動方程式を通じて荷電粒子に影響する。これらの方程式を連立して解くことで，光と物質との相互作用を議論できる。その後，19世紀末から20世紀初頭に，黒体輻射(物質の電磁場への作用，光の放出)や光電効果(光の物質への作用)の研究などから，量子力学が発展していった。そして，20世紀前半に量子電磁力学として，物質と電磁場がどちらも量子論に基づいて議論されるようになる。その後，素粒子物理学の発展とは別の方向性として，光の量子論的性質に着目した量子光学が発展していった。マクスウェル方程式では，光の電場や磁場の振幅と位相にのみ着目していたのに対し，量子論の概念を導入することで，不確定性のある電場と磁場の量子論的なゆらぎ(量子ゆらぎ，または真空ゆらぎとよばれる)など，マクスウェル方程式では表現できなかった光の性質まで議論できるようになった。この量子光学の研究が，現在の量子情報や高精度測定などの技術の発展につながっている。

光子を量子とみなす近似とその破綻

さて，先述した物質中での光の伝搬は，光子の描像に基づくと以下のように理解できる。〈図2〉上左のように，入射

＊2　ファラデーの法則やアンペールの法則に従って，電場と磁場は時間的・空間的にそれぞれ四半周期ずれる。結果，〈図2〉下左のように，電場と磁場は同位相または逆位相にみえる。

した光子を1つの原子（中の電子）が吸収し，基底状態（エネルギーがもっとも低く安定な状態）から励起状態（エネルギーが高く不安定な状態）に遷移する。その原子が励起状態からもとの基底状態にもどる（原子の緩和とよぶ）さいに，同じ振動数の光子を放出する。光子が原子に吸収され，再び放出される過程をくり返しながら，光子は物質中を伝搬していく。エネルギー量子$h\nu$が光子から原子に渡され，光子が再放出されるまで物質中にエネルギーが留まるため，光子の伝搬は真空中よりも遅くなる。エネルギー量子だけでなく，光子がもつ量子情報（状態）も原子に渡され，その原子の状態が乱されない限り，同じ量子情報をもつ光子が再放出される。光子を量子とみなすこのような明快な描像のもとで，量子光学や量子情報技術は発展してきた。

この描像は一見すると正しいように思える。しかし，これは冒頭で述べたように，回転波近似（rotating-wave approximation）とよばれる近似の産物である。どのような近似を用いたのか説明する。〈図1〉の描像では，電場と電気分極との振幅のやりとりとして光の伝搬が表現されたのに対し，光子に基づいた〈図2〉上左の描像では，光が電場と磁場のどちらを介して物質と相互作用するのかが忘れ去られている。光は本来，電場と磁場とがお互いに影響を与え合うことで成り立っている。電場と電気分極とが振幅をやりとりしたさい，それにともなう電場の変調は，光の振動の1周期未満ではあるが，磁場に遅れて伝わる。分極も電場より遅れるが，その遅れが光の周期より十分大きければ，磁場の遅れは近似的にゼロとみなせる。〈図1〉も，まさにそのような状況である。そこで，光を電場と磁場の運動としてわざわざ分けて考えず，「光」や「光子」として物質と相互作用するとみなすことにする。これが回転波近似であり，そのもとでの描像が〈図2〉上左である。1周期未満の非常に小さい磁場の遅れは，光の周期より速い振動の成分である。その速い振動（複素平面での回転）を無視することから，回転波近似とよばれると理解すればよい。

一方，光と物質の超強結合領域では，電気分極が光の波の周期・波長と同程度もしくはより短い時間・距離で電場に追随する。そのような短い時間・距離で電場と振幅をやりとりする場合，1周期未満といえども磁場の遅れをゼロとみなすことはできない。つまり，回転波近似が破綻する。

電場と磁場，どちらで物質と相互作用しても同じではないかと思うかもしれない。物質中での光の伝搬速度を議論するだけならば，たしかにどちらでもかまわない。物質の比誘電率ε_rと比透磁率μ_rのどちらが変わっても，光の伝搬速度は屈折率$n=(\varepsilon_r\mu_r)^{1/2}$を通してしか変化しない。しかし，光と物質の状態をプランク定数や光子1個の精度で制御するためには，光の電場と磁場それぞれの量子ゆらぎまで制御しなければいけない。それぞれのノイズの抑制を研究している量子情報技術の最前線ではもはや，どちらでも同じとはみなすことはできない。

光の電場成分と磁場成分は，光子の位相に関係する。その位相は光の波の周期・波長に基づいて時間的・空間的に振動する。その意味を込めて，〈図2〉の上中段では光子を振動するように描いた。一方，〈図2〉下左では電場と磁場として光の伝搬を描いた。光子の振動の節と腹（複素平面での虚部と実部）が，それぞれ電場と磁場の振幅に対応する。つまり，電場と磁場には時間的に四半周期のずれがある＊2。物質との相互作用を通じて，光の電場と磁場それぞれの量子ゆらぎをプランク定数の精度で制御するには，この四半周期の時間差を無視できない。つまり，光と物質の状態の高精度な制御においては，回転波近似を用いることができない。

では，回転波近似せずに，つまり電場と磁場を区別して，光と物質の相互作用を量子論的に議論するにはどうすればよいか？　電場と磁場を区別して光の伝搬を示した〈図1〉や〈図2〉下左の描像に立ちもどればよい。マクスウェル方程式の電場と磁場，電荷密度と電流密度をすべて演算子として記述し，荷電粒子の運動をシュレーディンガー方程式などで記述すればよい。電場と磁場の量子ゆらぎは，それらを演算子として記述することで議論できる。

このように電場と磁場それぞれの運動を議論することは1つの方法ではあるが，光子に基づいて，光と物質の相互作用を回転波近似せずに議論することも可能である。しかしながら，その場合，光子に基づいた描像は以下のように煩雑になってしまう。まず，〈図2〉中左のように，やってきた光子を原子が吸収せず，励起状態に遷移しながら光子を後方にもう1個放出することがある。光子を新しく生成するには$h\nu$のエネルギーが，また原子を励起するのにもエネルギーが必要であるが，回転波近似せずに計算すると，このような過程が現れる。これらエネルギー的な損は，光と物質とが相互作用することでのエネルギー的な得によって補わ

＊3　熱による原子の励起や光子の生成はノイズの源となるため，$h\nu/k_B$よりも十分に低い温度で通常は議論される（k_Bはボルツマン定数）。

れる（〈図2〉下左のように電場と電気分極が同じ向きの状態は逆向きの状態よりも安定であり，エネルギー的な得が生じる）。相互作用が強いほどエネルギー的な得が増え，新たな光子が生成される確率も高まる。その確率が有意な値となるのが，超強結合領域である。

物質との相互作用が電場を介したものであれば，やってきた光子とは逆位相の光子が，磁場を介したものであれば同位相の光子が後方に放出される。このように，〈図2〉中左の描像では，やってきた光子と後方に放出された新たな光子との位相差を通じて，電場と磁場とが区別される。一方，〈図2〉上左の描像では，量子力学において波動関数の全体位相が物理量に影響しないのと同様，光子が1個しかおらず，位相を比較する相手がいないため，電場と磁場は区別されていないに等しい。

外から光が入射しない場合は，〈図2〉中右のように，原子が不意に光子を生成しながら励起状態に遷移したり，もともと励起していた原子がその光子を消滅させながら緩和したりする。これらも従来の描像ではエネルギーを要する過程であり，回転波近似のもとでは無視されてきた。つまり，〈図2〉上右のように，外から光が入射しなければ，光子は0個，原子はすべて基底状態と従来みなされてきた[*3]。しかし，回転波近似せずに計算してみると，〈図2〉中右のように，外から光が入射しなくても，物質中を光子が飛び回っていると考える必要に迫られる。これは，荷電粒子のあいだのクーロン力を光子のやりとりとみなすことに似ているが，クーロン力を媒介するのが縦波の光子なのに対し，ここで飛び回っているのは横波の光子である。

〈図2〉中段のように原子の励起とともに光子が新たに生成されたり，原子の緩和とともに光子が消滅したりすると，光子と原子とでエネルギー量子$h\nu$をやりとりするという〈図2〉上左の描像が破綻してしまう。光子がもっていた量子情報も，〈図2〉中左での新たに生成された光子に一部もって行かれたり，〈図2〉中右のように原子の緩和とともに消滅したりするので，そのゆくえを追うのが難しくなる。これらの過程を踏まえて光と物質を操作しないと，量子状態の制御が不完全なものとなってしまう。これらが，光子を量子とはみなせなくなる理由である。

原子の励起（あるいは緩和）にともない光子が生成される（消滅する）確率は，光と物質の相互作用が弱いほど，つまり分極の遅れが大きいほど，小さくなる。その確率が十分に小さいとして，そのような光子の生成・消滅を無視することが回転波近似である（磁場の遅れを無視することに等しい）。しかし，光と物質の相互作用が超強結合の領域にある場合や，ごく微小であっても確率を考慮せざるを得ない高精度な量子状態の制御が要求される場合，これらの過程を無視できない。つまり，原子の励起（緩和）にともなう光子の生成（消滅）を認めながら，物理を議論していかねばならない。

光子が量子でなくなったら

さて，光子に代わって量子となるものを考えることも可能ではあるが，真空中を光が伝搬するだけでは本稿を目にできないのと同様，その量子もほかの何か（受光器など）と相互作用しないかぎり，科学技術の発展にはつながりにくい。ここでは，光子を量子とみなさずに，つまり回転波近似せずに，光と物質の相互作用を議論することで，どのような未知の現象が期待できるのか，超強結合の研究の最近の動向について述べ，本稿を閉じようと思う。

光と物質の超強結合が2005年頃から理論的に研究されだした当初[2]，〈図2〉中右に示した内因的に存在する光子，つまりエネルギー量子を担わない光子の存在が注目された。〈図2〉中左で生成された新たな光子は最終的に原子に吸収されることもあれば，物質外に放出されることもある。一方，外から光が入射しない〈図2〉中右の場合，物質中を飛び回る光子は外には飛び出さない。外に出ると物質と相互作用できず，相互作用によるエネルギー的な得がなくなってしまうからである。

さて，光子に基づいて〈図2〉中右の状態を解析すると，光子と物質の分極とが量子論的にもつれ合った状態（量子もつれ状態）として表現されることが知られている[3]。従来，量子もつれ状態などの量子状態は，物質の内外を行き来できる光子や物質の励起状態などの「量子」を媒体として生成・制御される。不安定でノイズの影響を受けるそのような量子のかわりに，〈図2〉中右のように内因的な光と物質の相互作用によって量子もつれを安定に（光を照射せずに）形成し，自由自在に制御することができれば，量子情報技術での本質的な問題であるノイズ対策を根本的に解消できる可能性がある。ただし，その光子と物質とがもつれ合った安定状態を自在に制御することは非常に難しい。制御どころか，どのような光子の状態になっているのか，理論的には解析できるものの，実験による

観測はいまだ報告されておらず，物質中を飛び回っていると考えられる光子の存在すら実証されていない。さまざまな観測手段が提案されているものの，何らかのブレイクスルーが求められている。

また，光と物質の超強結合によって，系全体のゼロ点エネルギーが変調されるという特徴がある。相互作用によってエネルギー準位が変わるのは当たり前ではあるが，回転波近似を多用してきた量子光学の研究では，相互作用の有無にかかわらず，光と物質それぞれの系のゼロ点エネルギーの和が，系全体のゼロ点エネルギーになると近似的にみなされてきた。そのようななか，可視光との超強結合を示す色素分子の系で，ゼロ点エネルギー（自由エネルギー）の変調を通じて，熱平衡状態が変化することが注目されている。検証の必要が残されているものの，光を照射せずとも，分子を光の共振器に閉じ込めて電磁場の量子ゆらぎを変調させるだけで，化学反応が変化するという実験が報告されている[4]。このように，量子光学（光と物質の相互作用の量子論）は，これまで研究されてきた量子情報処理や高精度測定だけでなく，化学反応の新たな制御方法などにも発展していく可能性を秘めている。

一方，光と物質の超強結合によって，電磁場が物質を巻き込んで相転移する可能性が1970年前後から現在に至るまで議論されている。これは超放射相転移とよばれ，静的な電場と電気分極（あるいは静的な磁場と磁気分極）が自発的に現れる相転移現象である。それらが相互作用したほうが系のエネルギーが下がるというのが相転移のしくみだが，残念ながら静電磁場や静的な電磁分極が現れたさいのエネルギー的な損のほうが大半の物理系では大きいため，いまだ実験では観測されていない[5]。一方，理論的にではあるが，超伝導回路における永久電流（永続的に流れる電流）を静電磁場に見立てることで類似の相転移を起こせることが，2016年に筆者と共同研究者らによって提案された[6]。今後，実験検証を進めていく必要があるものの，光子と原子の量子状態のダイナミクスを議論してきた量子光学において，このように熱や相転移の概念が導入されつつある。超放射相転移の可能性を磁性体や強誘電体などの固体で改めて議論することで未知の相転移を発見したり，超放射相転移とレーザー発振との移り変わりを解析することで非平衡統計力学の理解を深めたり，熱・光・電流・磁性が絡む未知の物理現象の発見やエネルギー変換の技術革新を模索したりする研究が期待される。

以上，光と物質の量子状態の制御技術が発達してきたことで，従来用いられてきた回転波近似が破綻し，もはや光子を量子とはみなせなくなりつつある。これは画期的なことであり，量子情報や測定の技術をただ研究するという段階が終わり，それらの実社会への応用や，上記のような未知なる科学技術を探索する時代に移行しつつある。量子でなくなった光子が明るい未来を照らしていくと筆者はみている。

★ ★ ★

本稿を執筆するにあたり，浅野拓也氏，猪股邦宏氏，井邊昂志氏，井元信之氏，岩切秀一氏，加藤洋生氏，川原遼馬氏，玄地真悟氏，河野淳一郎氏，関本謙氏，竹内勇貴氏，中村泰信氏，布施智子氏，吉原文樹氏，四橋聡史氏から助言をいただいた。この場を借りて感謝申し上げる。

参考文献

1) 超強結合を示す系として，たとえば，電子のサイクロトロン運動とテラヘルツ波，Q. Zhang *et al.*: Nat. Phys. **12**, 1005(2016)や，超伝導回路，F. Yoshihara *et al.*: Nat. Phys. **13**, 44(2017)などが知られている．
2) C. Ciuti, G. Bastard and I. Carusotto: Phys. Rev. B **72**, 115303(2005).
3) S. Ashhab and F. Nori: Phys. Rev. A **81**, 042311(2010).
4) A. Canaguier-Durand *et al.*: Angew. Chem. Int. Ed. **52**, 10533(2013).
5) 冷却原子にレーザー光を照射した非平衡系での“量子相転移”としてなら実験報告がある．K. Baumann *et al.*: Nature **464**, 1301(2010).
6) M. Bamba, K. Inomata and Y. Nakamura: Phys. Rev. Lett. **117**, 173601(2016).