

超臨界結合手法による光の操作

サリー・コール・ジョンソン

イタリア、シンガポール、米国の研究者らは、ナノスケールで光を捕捉するための新たな方法を発見した。その潜在的な応用分野は非常に広範囲に及ぶ。

「超臨界結合」(supercritical coupling)によって光エネルギーを捕捉および変換するための新たな方法が最近、イタリア国立研究評議会(National Research Council: CNR)のISASI(Institute of Applied Sciences and Intelligent Systems)、シンガポール国立大(National University of Singapore)、米国カリフォルニア州のMolecular Foundryの研究者らによって、発見された。

同チームの超臨界結合手法は、光子のアップコンバージョン効率を大幅に向上させて、光放射の制御を可能にするもので、量子技術、高解像イメージング、フォトニックデバイス、光キャビティや共振器など、数多くの分野における進歩の加速化に役立つ可能性がある。

光子アップコンバージョンは、低いエネルギーの光子(不可視光)を高いエネルギーの光子(可視光)に変換するための非線形光学手法で、超解像イメージングから先進フォトニックデバイスに至るまでの幅広い用途に使われている(図1)。しかし、ランタノイドをドープしたナノ粒子の放射照度には本質的な限界があり、対象波長における吸収効率も低いいため、効率的な光子アップコンバージョンの追求は、進歩はしているものの、複数の課題に直面している。

イタリア国立研究評議会のシニア研究サイエンティストであるジャンルイジ・ジト氏(Gianluigi Zito)の研究グル

ープと、シンガポール国立大のシャオガン・リウ化学教授(Xiaogang Liu)が主導した、同チームの取り組みは、超臨界結合によってそれらの課題が解決可能であることを示している(図2)。

「光と物質の相互作用は、科学研究の基礎であり、先端技術における多くの課題の中心である。分子サイズに近いナノスケールの体積に光を閉じ込めることにより、そうした相互作用の強化が可能になる」と、リウ教授は述べた。

エネルギーを失うことなく光を捕捉できる特徴的な光構成が存在し、それは、材料特性の操作の可能性を増幅す



図1 指向性の超高輝度アップコンバージョン光を示す芸術的なレンダリング画像。一方は明るくもう一方は暗い、2つの異なる光子モードが、この現象が展開されるナノ粒子を保持するナノ構造の上にある、概念的なシェル構造の中でエネルギーを動的に交換する光線として描かれている(画像提供: Jiaye Chen氏)

る。「しかし、連続スペクトル中の束縛状態(bound state in the continuum: BIC)として知られるこれらの特殊なフォトニックモードを使いこなすのは大変な課題である。このモードの活性化は容易ではなく、それがボトルネックになるためだ」と、ジト氏は述べた。

BICの利用

同チームは、BICモード内の光エネルギーの閉じ込めに伴う限界の解消に乗り出した。そして、特異な光構成の形成を支配する数学的原理により、超臨界結合という最適条件が明らかになった。

低エネルギーの2つの赤外(IR)光子を、2倍のエネルギーを持つ、人間の目に見える単一光子に変換することができる。「これは光子のエネルギー変換の一例で、無数の用途がある。しかしこれは、材料の電子が変換プロセスを仲介する、材料プラットフォームを利用することによってのみ可能である」と、リウ教授は述べた。

1つの大きな課題は、入力光子と材料の電子の相互作用の物理的メカニズムが不十分であることだ。効率を高めるために、光子を物理的に閉じ込めることによって相互作用を強化する必要がある。光子は閉じ込められた空間の中で振動し、電子と接触する確率が増加する。これらの電子は、数千個の原子のサイズに分散するナノ粒子の特殊なクラスに属するため、望ましい可視光子の生成につながるエネルギーレベルを持つように改変されている。

「われわれの取り組みは、物理的なバリアなしで微小なオープンキャビティに

光を効率的に捕捉する方法を実証している。このキャビティの中で光子は振動し、実際のミラーがない状態で反射する。これは、光が特異な構成を達成したときに可能になる。われわれが示した物理学の新しい概念であるこの光構成は、効率的な方法で活性化することができる」と、ジト氏は説明した。

動作の仕組み

同チームの実験装置において、チタンサファイアフェムト秒レーザーの入力IR光子は、アップコンバージョンナノ粒子を持つナノ構造の内部に捕捉される(図3)。このナノデバイスホストは、光捕捉のための特異な条件を作り出し、捕捉された光子は何千回も振動して、最終的には電子との相互作用によって、より高いエネルギーを持つ新しい光子に変換される。

この捕捉メカニズムから解放されると、「より高いエネルギーを持つこれらの光子は、もはや制約を受けることなく、このシステムを出てさまざまな目的に利用できる状態になる。光子のスペクトル解析は、分光器を使用して行うことができる」と、ジト氏は述べた。

同チームのアップコンバージョンピームは、マイクロスケールのサイズにもかかわらず、指向性が高い。それは、多数のナノ粒子を同時に励起するナノ構造のBICによる結果である。この同期励起によって、変換された光子の集団干渉が引き起こされ、光子は強制的に正確かつ明確に定義された経路を進行することになる。

「要するに、われわれの取り組みは、これまで可能だったことの限界を押し広げるだけでなく、フォトニクス技術の進歩に広範囲に及ぶ実質的なメリットをもたらす。この取り組みの最大の焦点の中心にあるのは、フォトニック



図2 チーム一同。研究室にて装置とともに(左から順にジト氏、Aida Saifelinezhad氏、Silvia Romano氏、Bruno Miranda氏)(写真提供:Teresa Crisci氏)

ナノ構造内でのBICの利用という画期的な成果であり、それは光捕捉の魅力的なメカニズムである」と、ジト氏は述べた。

同チームの取り組みにより、アップコンバージョン光ルミネッセンスの発光が、これまでの限界を超えて著しく向上した。その意義は、単に効率が大幅に向上したことだけでなく、放射方向を正確に制御する能力が新たに発見されたことにもある。

放射方向が制御可能であることは、フォトニクスのパラダイムシフトを意味する。この機能により、かつては実現不可能だったレベルの精度と汎用性をもたらされ、イメージング、通信、センシング技術における、用途に合わせた応用が可能になる。

「特別な瞬間が訪れたのは、アップコンバージョン光ルミネッセンスの発光が、われわれの当初の予測を上回って大幅に増加することを観測し、それがわれわれの理論と一致することに気づいたときだった」と、ジト氏は述べた。

極少数のナノ粒子によって生成されるそのような顕微鏡レベルの光を肉眼

で見るのは、「とても信じられない」ことだったと、ジト氏は続けた。「放射方向が制御可能であることが、その瞬間をさらに盛り上げた。この制御の実用的な意味に気づいたときは、胸が高鳴った。それは、ナノスケールでの光操作における極めて重要な進歩であり、これまで見たことのない可能性の領域への扉を開けるようなものである」(ジト氏)。

今後克服すべき課題

同チームが遭遇した課題とまだその前に立ちはだかる課題を認識することが重要である。最大の課題は、フォトニックナノ構造内のBICを利用することのメカニズムの安定性と信頼性を確保することで、それは実用化に向けて不可欠である。

プロセス効率の最適化は、継続的な取り組みの1つであり、発光を最大化して、考え得る複数のシナリオのすべてでそれを制御するために、パラメータを微調整する必要がある。材料特性など、これらの状態の確実な利用に影響を及ぼす可能性のあるすべての要因

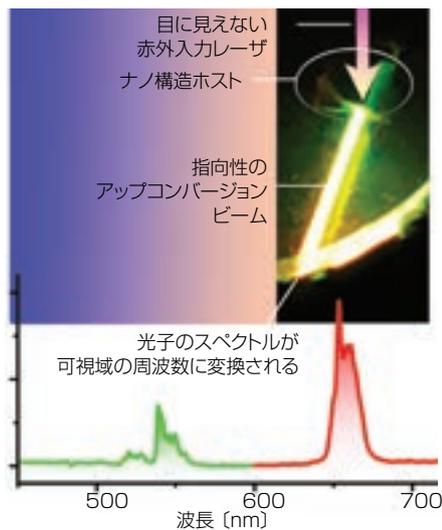


図3 同チームの実験装置において、チタンサファイアフェムト秒レーザーの入力IR光子は、アップコンバージョンナノ粒子を持つナノ構造の内部に捕捉される(これは実際のサンプルである)。このナノデバイスホストは、光捕捉のための特異な条件を作り出す(画像提供: Jiaye Chen氏)

に対処する必要があり、それは、われわれが取り組み続ける課題である」と、ジト氏は述べた。

この手法と実際の応用分野の範囲を拡大することは、潜在的な拡張性の問題の克服が必要となる、どちらも重大な課題である。

「性能を損なうことなく、より幅広い用途にわれわれの技術を適応させることが、現在進行中の研究領域である。さまざまな分野における互換性と実験的実証には、協調的で学際的なアプローチが必要である。これらのハードルを乗り越えることが、われわれの取り組みの可能性を検証するとともに、実用化への道を開くことになる」と、リュウ教授は述べた。

豊富な応用分野

同チームの光子アップコンバージョン手法は、より高感度で高解像度の診断用イメージングを可能にすることで、医療用イメージング技術を進歩させる準備が整った状態にある。放射指向性の正確な制御により、生体組織のイメージングの精度と深度を高めることができる。

また、放射方向が制御可能であることは、光通信に対しても意義がある。

「われわれの取り組みは、シグナルインテグリティが強化されて干渉が低減された、より効率的で安全な光通信システムの開発に寄与する可能性がある」と、ジト氏は述べた。

センシング技術、特に、さまざまな環境や生物医学の用途を対象とした高感度で高選択的なセンサの開発に対しても有望である。発光の増加と指向性の制御によって、特定の物質や状態を検出するセンサの能力を高めることができるためである。

光子放射の効率的な制御は、エネルギーハーベストデバイスにも応用できる。光ルミネッセンスの増加を、太陽電池やその他の光エネルギー変換技術の改良に利用することができる。

「また、ナノスケールで光子を操作して制御する能力は、量子技術の開発において重要である。われわれの取り組みは、より高度な量子計算および通信デバイスの構築に寄与する可能性がある」と、ジト氏は述べた。

LEDやディスプレイにも応用可能である。この手法を活用して、その発光特性を向上させて光を正確に導くことにより、より効率的でカスタマイズ可能な発光デバイス(LEDやディスプレ

イ)を開発することができる。

フォトニック集積回路にも応用可能である。「放射の指向性制御は、情報処理と伝送のためのコンパクトで効率的なデバイスの構築を可能にするため、フォトニック集積回路の設計において価値がある」と、ジト氏は述べた。

また、その強化された発光能力と指向性制御は、細胞プロセス、バイオイメージング、オプトジェネティクス(光遺伝学)の高度な研究を可能にする可能性があるため、バイオフォトリクス分野に対して有望と思われる。「これらの用途は、さまざまな分野におけるわれわれの取り組みの可能性のほんの一端にすぎない」と、ジト氏は述べた。

次なる目標

同チームの研究の現在の焦点は、「パラメータの微調整と、新規材料の開拓にある。われわれの目標は、われわれのフォトリクスプラットフォームをより汎用的なものにして複数の既存技術により容易に統合できるようにすることによって、応用分野の範囲を拡大し、プラットフォームの全般性能を高めることである」と、ジト氏は述べた。

同チームは、このアプローチが大きく貢献できる新たな領域を探求するつもりである。量子コンピューティングやエネルギー貯蔵をはじめとするさまざまな分野において、予期せぬ用途が見出される可能性がある。

「この研究成果を、科学コミュニティや、それよりも広い範囲の一般社会に共有することが非常に重要である。われわれの知識を今後も共有し続けるつもりで、それによって、新しい研究の方向性に関するひらめきが生まれ、この取り組みの潜在的な影響に関する理解が深まることを期待している」と、ジト氏は述べた。