

# マイクロレーザチップによる、量子通信のさらなる多次元化

サリー・コール・ジョンソン

キューディット (qudit) を使用して通信する超次元マイクロレーザチップは、これまでのオンチップレーザの量子情報空間を2倍にして、セキュリティと堅牢性を、既存の量子通信ハードウェアをはるかに上回るレベルに向上させる。

米ペンシルベニア大 (University of Pennsylvania) のリアン・フェン教授 (Liang Feng) の研究室が率いる研究者チームは、スピン角運動量と軌道角運動量で構成される、4レベル量子システム内の任意の状態を保有する光子を、非常に高い忠実度で放射する、超次元マイクロレーザチップを設計して構築した。

この取り組みは、大きな躍進である。同チームのマイクロレーザチップは、自由空間の量子鍵配送 (Quantum Key Distribution : QKD) とコヒーレントな

従来型通信、特に、衛星から地球への通信や電波塔間の通信における光源として、使用できるためである。

2進数 (ビット) に基づく従来の情報理論が、現代の情報処理および通信システムの根幹を成している。「従来の情報理論の成果から着想を得て、今日の量子情報処理は主に、量子ビット (キュービット : qubit) に基づいている。量子ビットは、0 または 1 の値を同時に処理できる。これは、量子機構において『重ね合わせ (superposition) 』として知られている」と、フェン教授は

述べた。

異なる2レベル量子システムを制御する能力の開発に伴って、複数の量子プロトコルやアルゴリズムが提案および実装され、それによって、セキュアな通信と、演算の指数的な高速化が可能になった。

## キュービットを上回る キューディットの使用

しかし、キュービットは量子情報を符号化するための理想的な選択肢ではない可能性がある。量子システムのキューディットは、2レベルを超える重ね合わせ状態にある量子ビットで、それ以上のメリットを情報処理に対して提供するためだ。

「例えば、光子による量子通信において、キュービットを使用するシステムは、完璧な量子チャンネルによって1光子あたり1ビットしか送信できない。しかし、Nレベルのキューディットならば、1光子あたり  $\log_2(N)$  ビットが送信可能である。キューディットに基づく通信システムはより堅牢で、未来の成熟した量子通信ネットワークに向けた道筋をつけることが可能であることが、実証されている」と、フェン教授は説明した。

高次元量子システムを制御するための複数の試みが既に行われている。「光通信システムにおいて、大規模なオン

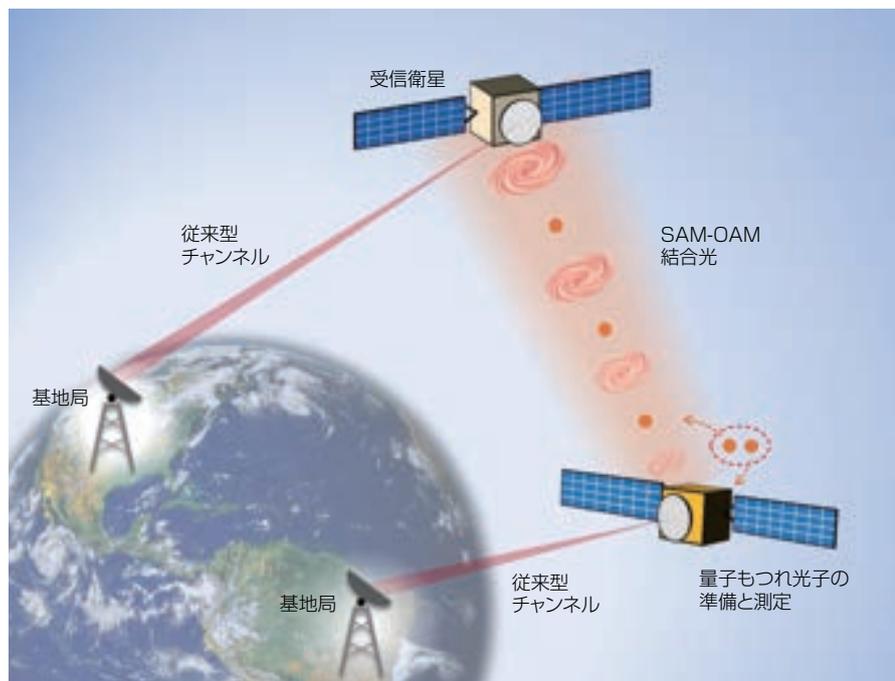


図1 超次元マイクロレーザチップの1つの潜在的応用分野は、衛星間の多次元量子リンクである (画像提供:ハオキ・ザオ氏)

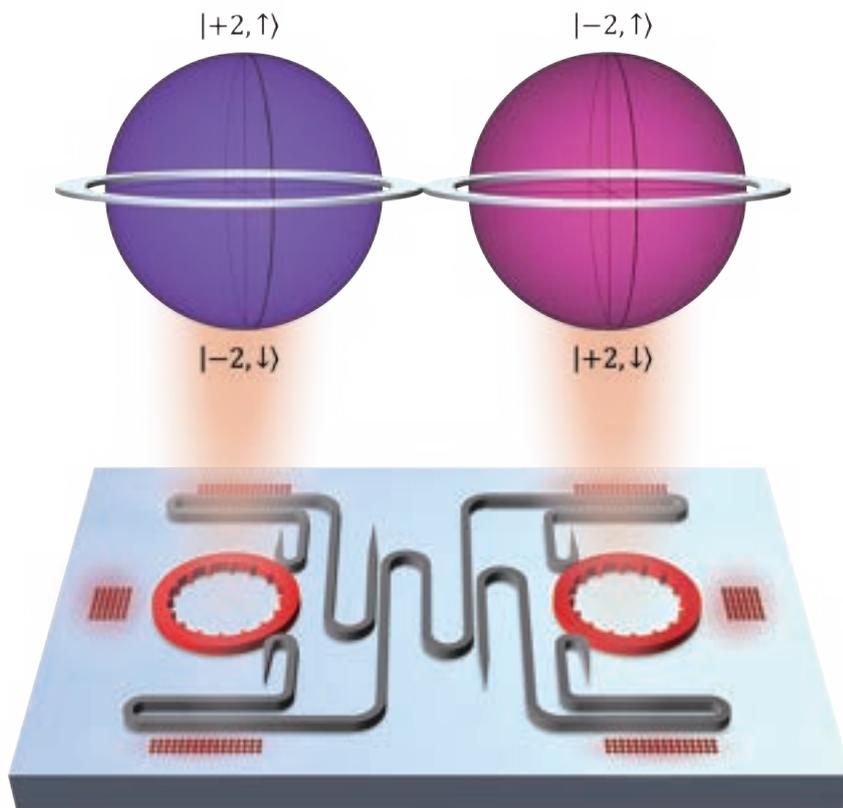


図2 4レベルの情報を同時に保有するキューディットまたは光子を生成する、同チームの超次元マイクロレーザチップの概念図(画像提供:ハオキ・ザオ氏)

チップのフォトニックプロセッサが、高次元の従来の情報処理と量子集積の情報処理の両方に対して開発されている。そこでは情報は、複数の『パス』、つまり、光子が入る導波路の中で、主に符号化される。この符号化方法は、オンチップの情報処理に対して適切だが、長距離の自由空間通信に使用するのには難しい可能性がある」と、フェン教授とともに研究に取り組む、博士課程の学生であるハオキ・ザオ氏(Haoqi Zhao)は述べた。

しかし、スピン角運動量を含む光子の角運動量は、長距離の多次元通信、特に、衛星から地球への通信と電波塔間の通信に対して、有望であるように見える(図1)。

これまでに、「複数の実験で、光の角運動量による高次元情報伝送の試験

が行われているが、そのすべてにおいて、波長板、偏光子、位相板、空間光変調器などの複数の大きな自由空間光学部品を使用して情報の符号化が行われており、それによって、角運動量に基づく通信システムの開発が大きく制限されている」と、ザオ氏は述べた。

この分野を前に進めるには、光子の高次元の角運動量状態の放射と操作を開発する必要がある。「われわれのこれまでの研究により、光子を放射する集積型レーザは、明確に定義された角運動量を持つことができることが示されている。そこで、4次元(4D)の角運動量空間内で、状態を任意に操作できる光子を放射する、レーザシステムを開発することにした」と、ザオ氏は続けた。

同チームのマイクロレーザチップは、

III-V族半導体プラットフォーム上の2つの同一サイズのマイクロリング共振器で構成される(図2)。各リング共振器は、時計回りの伝播モードと反時計回りの伝播モードという、2つの光学モードを生成できる。

「これらの4つのモードを、4Dシステム全体に広がる設計された散乱特性を持つ、異なるスピン角運動量と軌道角運動量を保有する、自由空間モードに転換することができる」と、ザオ氏は説明した。

### マイクロレーザチップの設計

この4レベルシステムは、3つの結合球によって表現可能で、制御対象となる6つの自由パラメータを持つ(図3)。各球が、地球の緯度と経度に似た、2つの自由パラメータを保有する。

「われわれの目標は、これら6つのパラメータを制御することである。そこで、光を一方のリング共振器からもう一方のリング共振器に導く光導波路を作製した。光が導波路内を伝播するときに、出力は外部光ポンプによって制御され、増幅または減衰が可能である。導波路の温度も変更可能で、それによって光の位相遅延を変えることができる」と、ザオ氏は説明した。

チームはこの方法で、6つすべてのパラメータを制御して、この4D空間内の任意の状態を放射できることを実証した。これは、このマイクロレーザが4Dキューディットの配送源として、また、コヒーレントな従来型通信の光源として、使用可能であることを意味する。

このマイクロレーザを開発していたときの同チームの最大の課題の1つは、線形モデルを使ってシステムを表現することだった。マイクロレーザは非線形システムで、最終的には非線形モデ

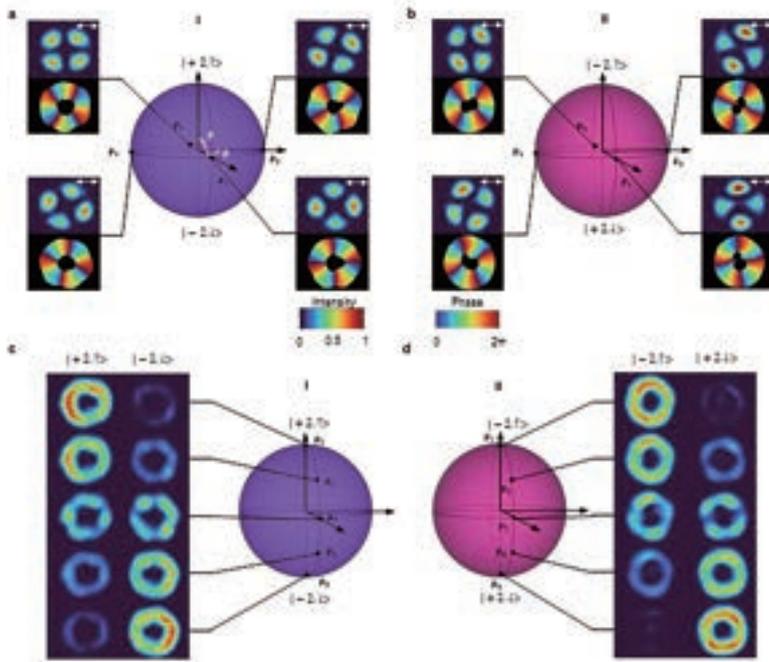


図3 著名なブロッホ球(2レベル量子機構システムの状態空間の幾何学的表現)に対する任意放射制御(画像提供:ジフェン・ザン[Zhifeng Zhang]氏)

ルでそれを表現する必要がある。「線形モデルは、このマイクロレーザシステムの設計に役立つが、そのすべての動作を予測することはできない。驚いたことに、われわれのマイクロレーザは、4D角運動量空間内のすべての状態を高い忠実度で放射することに成功し、線形モデルを上回る性能を達成した」と、ザオ氏は述べた。

同チームのこの取り組みの前は、角運動量空間内の光状態を生成するためのほぼすべての方法で、複雑で光学アライメントが必要な、非常に大きな卓上型の光学システムの使用が必要だった。それが今、マイクロレーザチップの光ポンプを制御することによって、4D角運動量空間内の任意の状態が簡単に生成できるようになった。

「スケラブルでコンパクトであることから、通信衛星や電波塔に簡単に実装可能で、衛星から地球への通信や電

波塔間の通信におけるソリューションとなり、次世代の高容量でノイズ耐性に優れた通信技術に向けた道筋をつける可能性がある」と、ザオ氏は述べた。

### 量子通信のマイクロレーザ

量子通信の目標は、非常に安全な方法で情報を送信することである。通常、送信側(Alice)は秘密鍵を複数の量子状態に符号化し、その量子状態を受信側(Bob)に送信する。その後、AliceとBobは、互いの準備体制について通信を交わし、従来型の通信チャンネルを使用することによって量子状態を測定する。

「この情報を基に、AliceとBobは共通秘密鍵のシーケンスを共有できる。最後に、両者は秘密鍵の一部を比較することが可能で、量子チャンネル内の情報を盗聴する者がいる場合は、このプロセスにおいてユーザーはそれに気

づくことになる」と、ザオ氏は述べた。これによって、この通信のセキュリティが保証される。

『『デコイ状態プロトコル』(decoy state protocol)により、われわれのマイクロレーザは単一光子レベルに減衰すると、QKDの光源として使用できる。また、4Dキューデットを放射して、1光子あたり2ビットを送信することが可能で、チャンネル容量はキュービットの2倍になる。QKDで4Dキューデットを使用すれば、量子チャンネル内のより高い擾乱が許容可能となり、通信システムの堅牢性が高まる」と、ザオ氏は述べた。

### 次なるステップ

チームは現在、このマイクロレーザシステムを改良するための3つの主要な領域に取り組んでいる。最初のステップは、より多くのリング共振器と導波路をオンチップに集積して、システムの次元を拡張することである。

2つ目のステップとして、電気励起のマイクロレーザを開発して、すべてのパラメータを電氣的に高速に制御したいと考えている。現行デバイスは光励起である。「このステップは、われわれのデバイスを実際の産業用途に向けて実用化するために不可欠だ」とザオ氏は述べた。

3つ目のステップは、このデバイスに基づく、成熟した量子通信システムを開発することである。「これは、光源としてのマイクロレーザや、集積レーザー回路を含む、複数のハードウェア部品で構成されることになる。実際の量子通信を行うために、これらのハードウェア部品に基づくソフトウェア部品も開発したいと考えている。その後、システムの堅牢性とビットレートを評価するつもりだ」とザオ氏は語った。