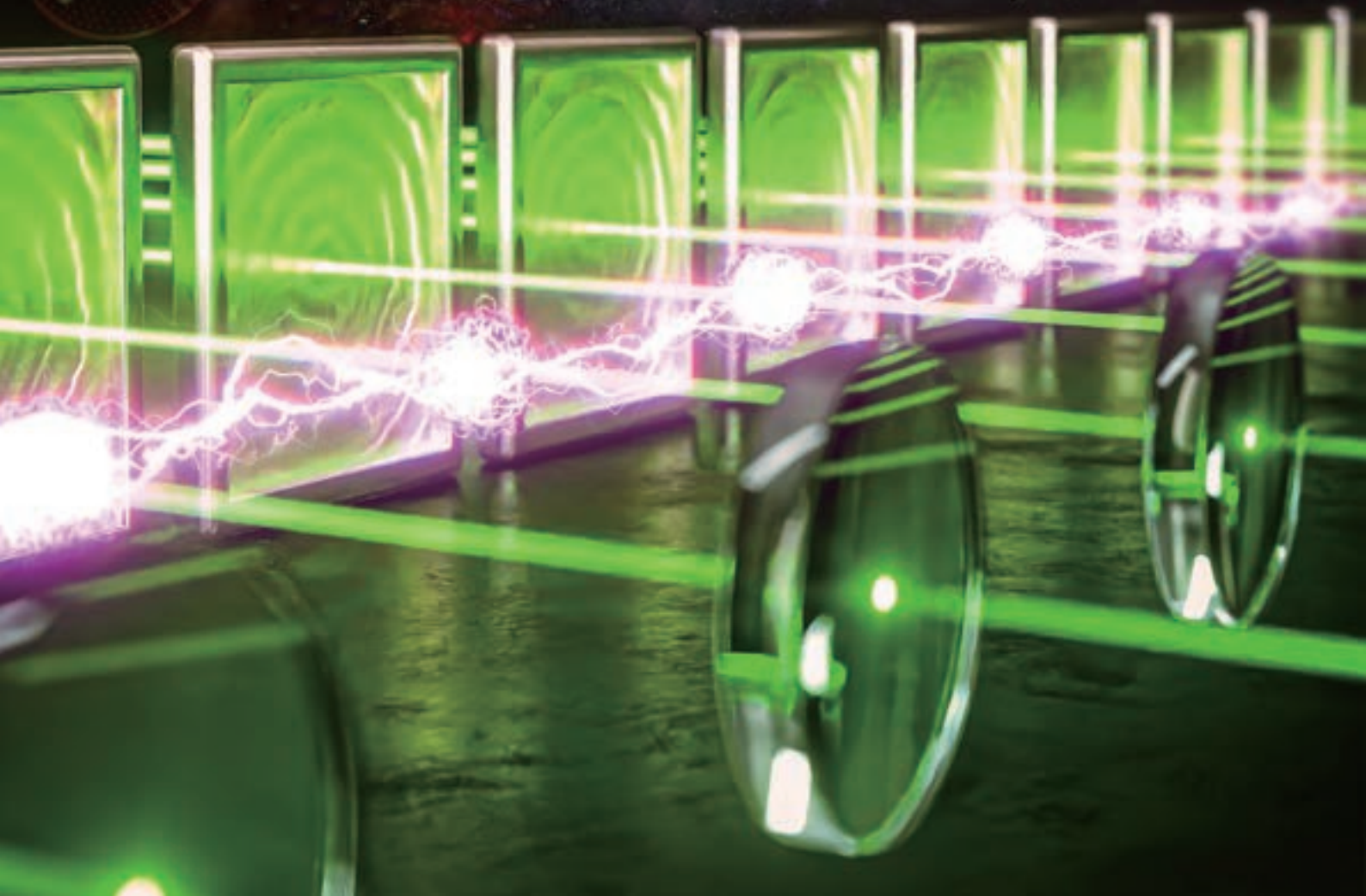


量子エンタングルメントで強化した オプトメカニカルセンサ



オプトメカニカルセンサに対して量子もつれを利用すると、常識を覆す精度向上率が得られ、根本的に新しいリソースとしてのもつれの力が明らかになる。

サリー・コール・ジョンソン

米ミシガン大 (University of Michigan) の電気およびコンピュータ工学の准教授ジェシェン・チャン氏 (Zheshen Zhang) 率いる研究者チームは、量子もつれを利用して、前例のない測定感度と速度を備えるオプトメカニカルセンサを開発している。もつれのない2つのビームと比べて、精度は40%、速度は60%高くなっている。

「もつれは、量子力学の枠組みの中の抜本的に新しい物理現象である。アルベルト・アインシュタイン、ボリス・ポドリスキー、ネイサン・ローゼンが、

量子力学の基礎に反論するための思考実験の中で、もつれを最初に使用したが、同氏らの試みは当然ながら、量子力学の崩壊には至らなかった。それにもかかわらず、より徹底的な理論および実験的研究がこの1世紀の間に行われて、もつれは現在、現代物理学の柱として認識されており、量子情報技術の開発に活用されている」と、チャン氏は述べた。

2022年のノーベル物理学賞は、量子もつれを物理的実体として立証した3人の先駆者に授与されている (www.

laserfocusworld.com/14283741)。

「私のチームは、もつれを利用してセンサの性能を強化するという次のステップに取り組んでいる。もつれは根本的に新しいリソースであるため、古典物理学の範囲を超えた前例のない測定精度の達成を可能にして、さまざまな領域を前進させる胸躍る機会を生み出す可能性がある」と、チャン氏は述べた。

オプトメカニカルセンシングにおいて、機械式発振器は、外力、磁気信号、音響信号に反応し、光プローブは、機

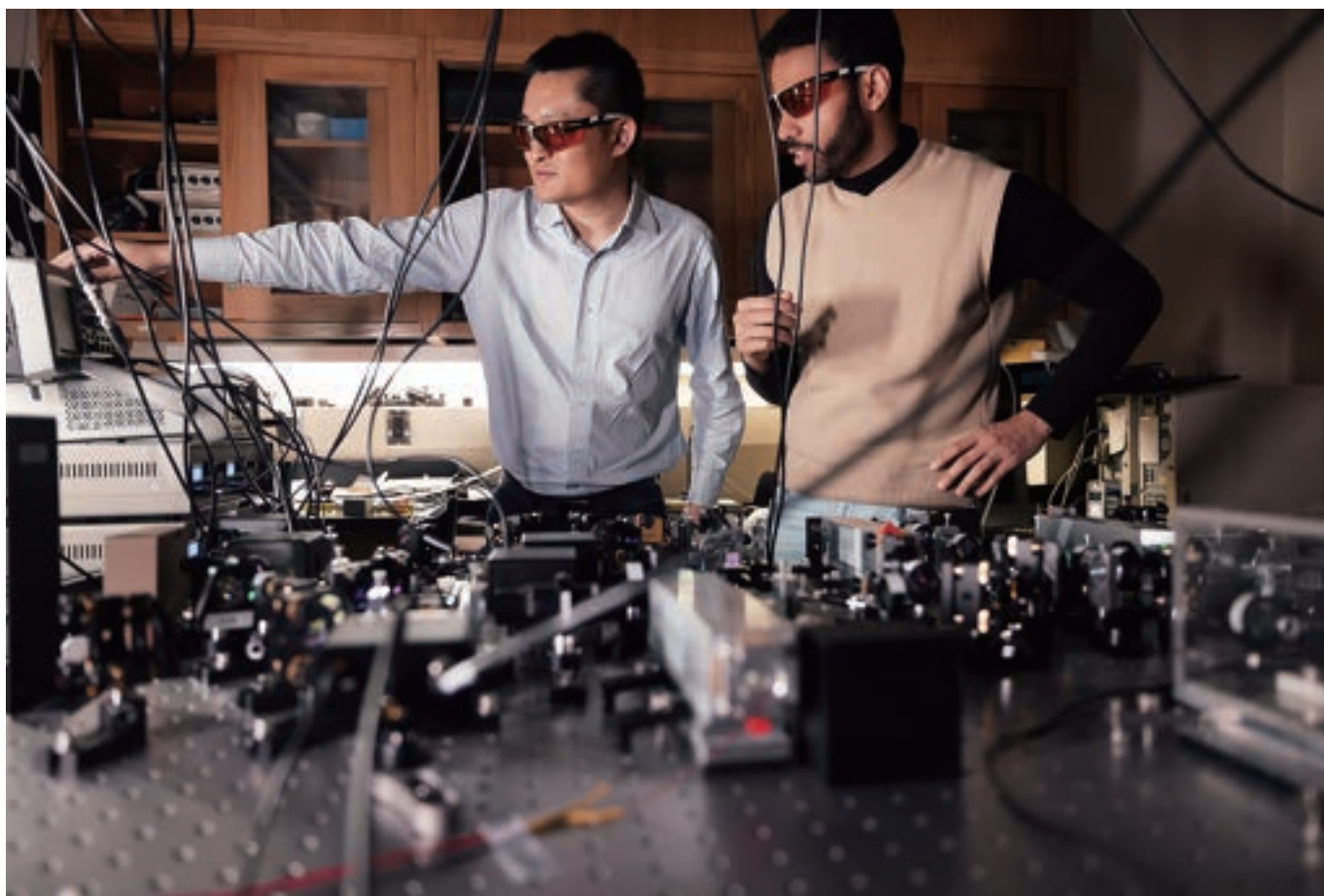


図1 もつれ光源に取り組むジェシェン・チャン氏(左)と、同氏の学生のカリーム・ハリリ氏(Kareem Hariri) (本稿の写真はすべて、ミシガン大のブレンダ・アハーン氏[Brenda Ahearn]提供)



図2 チームの実験用に光学系のアライメントを行うカリーム・ハリ氏

機械式発振器の動きを読み出して、外部信号を推測する。研究者らは、オプトメカニカルセンサのアレイを使用することによって、測定性能を高めることができるが、オプトメカニカルセンサの測定精度は、プローブ光の量子揺らぎと機械式発振器から生じる測定ノイズによって、基本的に制限される。

量子もつれセンサで、常識を覆す精度向上率を実現

チャン氏がミシガン大に移る前に米アリゾナ大(University of Arizona)で行われた実験において、同チームは、光プローブの間にもつれを生成することによって、基本的な測定ノイズを抑制し、測定性能を向上させた。

同チームの量子もつれセンサは、2つの同期したレーザービームと、センサから反射する1つのビームを切り所とする(図1)。センサ内の任意の動きによって、検出器までの光の伝送距離が変わり、その違いは、2つめの波が最初の波に重なるときに現れる。センサ

が動いていない場合、2つの波は完璧に同期した状態を保つが、センサが動く場合は、2つの波の山と谷が互いに打ち消し合って干渉パターンが生成される。そしてこのパターンは、センサ内の振動のサイズと速度を表す。

共同研究者であるアリゾナ大のディエル・ウィルソン氏(Dalziel Wilson)のチームが開発した、同氏らのデバイスは、振動するドラムヘッドに似た動作を示す薄膜をセンサとして利用する。そして、光を1回分割して、1つのセンサとミラーで反射させる代わりに、各ビームを2回分割して、2つのセンサとミラーで反射させる。このセンサの2倍化が、精度を向上させる。それによって薄膜が同期して振動するためである。

ここで、「スクイーズド状態」のレーザー光を介して、もつれが関与してくる。光をスクイーズすると不確かさが再分配される。そのスクイーズド位相は正確に既知だが、スクイーズドされていない位相は不確かさを含む。もつれの

おかげで、2つのセンサにおける位相測定の不確かさは相関可能で、もつれない2つのビームと比べて、測定の精度は40%、速度は60%高くなることを、同チームは発見した。

「われわれの研究は、光プローブによって共有されるもつれが、どれだけ正確に信号を検出して帯域幅を測定できるかなどを表す測定感度と、どれだけ高速に測定を繰り返せるか、の両方を向上させることを示している。われわれは、光プローブとしてのレーザー光に基づいて、従来のオプトメカニカルセンサと比べた場合のもつれによる向上効果を定量化するための性能指標を定義した」と、チャン氏は述べた。

1つの経験則として、「測定を複数回繰り返すか、複数のセンサを使用すると、全体的な測定性能は向上する」と、チャン氏は指摘した。「より定量的に述べると、測定をN回繰り返すか、N個のセンサを使用すると、精度(数値が小さいほど測定精度が高いことを意味する)は $1/\sqrt{N}$ 倍に向上する。もつ



図3 量子チップの試験を行う研究サイエンティストのシュアイ・リウ氏 (Shuai Liu)

れを使用することにより、われわれはこの限界を実際に超えることが可能で、理想的な状況においては、精度は $1/N$ 倍になる」(チャン氏)。

この精度向上率は、「常識に反しているが、根本的に新しいリソースとしてのもつれの力を示している。十分に確立された概念の一部を覆す、われわれの実験的立証は、新しい世界の扉を開いたことにほぼ等しいため、非常に胸躍るものだった」と、チャン氏は付け加えた。

想像がつくと思うが、同氏のチームはこの実験を行うにあたって、克服すべき数多くの課題に直面した(図2)。最も大きな課題の1つが、オプトメカニカルセンサを真空に近い環境に配置しつつ、すべての光学アライメントをチャンバの外側で行うことだった。また、光学パスを安定化させて実験の不完全性を最小化するための新しい実験方法を開発する必要もあった。

「学生のイ・シャ氏(Yi Xia)が、このプロジェクトの実験責任者で、もつれ

で強化したオプトメカニカルセンシングの基本原則を示すための、非常にうまく設計されたシステムを構築してくれた」と、チャン氏は述べた。

ダークマターと重力波の探求に、新たなツールを提供

同チームの取り組みの主な応用分野はおそらく、ダークマターや重力波などの新しい物理学の解明を探求するために必要な、超精密測定になる。

「ダークマターは、高精度測定装置がないために、その正体は未だ不明である。もつれを使用してオプトメカニカルセンサの精度を劇的に向上させることによって、長い間探求されてきたダークマター粒子の一部を観測して、自然に対する理解を深めるための領域に、足を踏み入れられるかもしれない。また、この手法は、GPSがない状態でのナビゲーションを促進して、トンネルや屋内駐車場の中を走行する自動運転車の安全性を強化する可能性もある」と、チャン氏は述べた。

チャン氏のチームは現在、もつれで強化したセンシング用の集積量子チップを開発している(図3)。すべてのコンポーネントをチップ上に集積すれば、光学アライメントが不要になり、センサの安定性が格段に高まって、同氏らの現行実験の2つの主な課題が克服される。

「われわれの継続的な取り組みは、米国立科学財団(National Science Foundation: NSF)のコンバージェンス・アクセラレータ(Convergence Accelerator)プログラムの助成を受けており、複数の大学や企業と連携している。われわれは、もつれで強化したオプトメカニカルセンシングの概念検証実験を、チップスケールのサイズに小型化することによって、これを量産可能にして、より手頃な価格でより広く利用できるものを目指す」と、同氏は述べた。

同氏らの目標は、量子センサチップのプロトタイプを1~2年以内に完成させることで、その後には、製造と商用化に向けた道のりが続く。