

大規模・汎用量子計算を実行できる量子もつれの生成に成功 —新しいアプローチで量子コンピューター実現に突破口—

1. 発表者:

古澤 明 (東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授)

アサバナント ワリット (同大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程 2 年生)

2. 発表のポイント

- ◆世界で初めて、どのような量子計算でも実行できる量子もつれ (2 次元クラスター状態) の生成に成功した。
- ◆5 入力 5,000 ステップ程度の計算に使える、25,000 個の光パルスから構成された大規模な 2 次元クラスター状態を生成し、そのサイズも原理的にはいくらかでも大きくできる。
- ◆現在主流のゲート方式の量子コンピューターの限界を克服できる新しいアプローチであり、量子コンピューターの実現への新たな可能性を拓いた。

3. 発表概要:

量子コンピューターは幅広い分野での応用が期待され、実現に向けて世界各国で開発が進められています。現在主流の開発方式はゲート方式 (注 1、図 1) と呼ばれ、まず量子ビット (注 2) を一個ずつ作製し、それらを組み合わせて計算するために量子ビットの間を配線した上で、量子操作を順に行いながら計算を実行します。実際に、ゲート方式に基づいて、超伝導回路やイオントラップを用いた量子コンピューター開発が進められています。しかし、この方式では量子ビットの数が増えれば増えるほど、量子ビット間の配線が複雑化されていくことがボトルネックとなっており、大規模化へ技術的な限界が見え始めつつあります。今回、東京大学大学院工学系研究科のアサバナント ワリット博士課程大学院生と古澤明教授らは、ゲート方式とは異なる一方向量子計算方式 (注 3、図 2) に着目し、あらゆる量子計算のパターンを重ねあわせた状態である汎用的な量子もつれ (2 次元クラスター状態) (注 4、注 5、図 3) を世界で初めて生成することに成功しました。2 次元クラスター状態を用意することができれば、それを構成する各量子ビットを測定するだけでどのような量子計算も行えるため、前述したゲート方式のような量子ビット間の配線は必要ありません。今回、大規模な 2 次元クラスター状態を実現するため、独自の時間領域多重方式 (注 6、図 4) を用いて大規模な 2 次元クラスター状態を少数の光学素子で生成する新しいシステム (図 5) をデザイン・構築し、実験的に状態の生成と検証を行いました。それに加えて、このシステムから生成された 2 次元クラスター状態 (図 6) を利用して効率的に計算を行う方法も理論的に考案しました。これにより、現在主流のゲート方式における配線の問題を回避し、量子計算の規模を従来よりも飛躍的に拡大できる突破口が明らかになり、実用的な量子コンピューターへの新たな道が開けました。

4. 発表内容:

研究背景

量子コンピューターとは、現在のコンピューター (古典コンピューター) と異なる原理で動作するコンピューターで、古典コンピューターでは解くことが難しい特定の問題を効率良く解くことができます。そのため、人工知能、医療、交通量の最適化などの分野への応用が期待さ

れています。現在さまざまな国や組織が量子コンピューターの研究に投資し、その主流のプラットフォームとして超伝導とイオントラップが注目されています。両プラットフォームとも、既に単体で動作する量子ビットやその精密な制御は実現されています。そこで、そのような量子ビットを多数製作した上で、複数の量子ビットを組み合わせて計算することができるように量子ビット間を配線し、量子ビットに対して順に量子操作を行えば、大規模な量子計算が実現できると考えられていました。このような量子コンピューターの実現方式はゲート方式とも呼ばれ、現在では 50 量子ビット程度を搭載した量子コンピューターまで開発が進んでいます。しかし、量子ビットの数が増えるにつれて、量子ビット間の配線が非常に複雑になり、実際の応用に使える量子ビットの数まで増やすのに技術的な限界に達しつつあります。

そこで我々は、大規模量子計算の実現に向け、現在主流であるゲート方式と異なるアプローチである一方向量子計算方式に着目しました。これは、初めに特定の量子もつれ状態となった大量の量子ビットを用意しておき、個々の量子ビットを測定することで計算を行う方式で、量子ビットの一個一個の作製と配線に頼るゲート方式とは全く異なります。一方向量子計算に必要な量子もつれ状態はクラスター状態と呼ばれます。クラスター状態はあらゆる量子計算のパターンを重ね合わせた状態となっており、個々の量子ビットを測定することで実行したい計算のパターンだけを選び抜くことで計算を実行するのです。この手法の強みは、はじめに十分な量子ビットの数かつ適切な量子もつれの構造を持つクラスター状態さえ用意できれば、後は比較的簡単である各量子ビットの測定によってどのような量子計算でも実現できることです。ここでいう「適切な構造のクラスター状態」とは、複数の入力を用いたどのような量子計算（日常的な計算で例えると、足し算や掛け算を行うには二つ以上の数＝入力を処理する必要がある）でも実現できる汎用的な量子もつれのことを指しており、それは「2次元クラスター状態」と呼ばれます。クラスター状態を用いた一方向量子計算が最初に提唱されたのはほぼ 20 年前でしたが、その心臓部たる 2次元クラスター状態は未だに実現に至っていませんでした。

研究内容

今回、東京大学大学院工学系研究科のアサバナント ワリット博士課程大学院生と古澤明教授ら、豪 University of New South Wales の米澤英宏博士のグループ、豪 RMIT University の Nicolas C. Menicucci 博士、米 University of New Mexico の Rafael N. Alexander 博士との共同研究により、2次元クラスター状態の生成に世界で初めて成功しました。この成功の鍵は現在主流の超伝導やイオントラップとは性質が異なる光を使った時間領域多重技術にあります。我々の研究グループではこれまでも時間領域多重技術の開発を進めおり、この技術を用いた量子もつれ状態生成の実験も行ってきました（例えば、S. Yokoyama *et al.*, Nat. Photonics **7**, 982 (2013). J. Yoshikawa *et al.*, APL Photonics **1**, 060801 (2016). S. Takeda *et al.*, Sci. Adv. **5**, eaaw4530 (2019).)。しかし、それらの実験で生成された量子もつれはいずれも一方向量子計算に使うには不十分でした。

今回、一方向量子計算の最重要要素である 2次元クラスター状態を生成するために、時間領域多重の技術を使った新しいセットアップを考案しました。さらに、この新しいセットアップによって生成された 2次元クラスター状態の構造を利用して効率的に計算を行う手法も理論的に考案しました。その結果、生成された 2次元クラスター状態は 25,000 光パルスの大規模量子もつれになっており、それを用いて 5 入力・5,000 計算ステップの任意の量子計算が実現可能であることが分かりました。

社会的な意義及び今後の予定

今回、世界で初めて大規模な 2 次元クラスター状態の生成に成功しました。今回の成果は、現行の主流の量子コンピューターのアプローチで見えてきた大規模化へ向けた課題を克服できる新たな方向性を示し、量子コンピューターの分野に大きな変革をもたらすことが期待されます。また、2 次元クラスター状態の生成は、一方向量子計算の最重要要素でありながらも、約 20 年もの間実現されていなかった難所でした。その実現によって、これまで長年にわたって開発されてきた光量子コンピューターの各々の要素技術の統合が促進され、量子コンピューターの実現を飛躍的に加速させる効果が期待されます。

今後は、クラスター状態を実際の計算に使うために必要な要素技術を開発し、それを本研究の成果と組み合わせることで、このクラスター状態を使った量子操作の原理実証を進めます。同時に、技術的なレベルを更に発展させ、クラスター状態の質と計算に使える入力数・ステップ数も増やしていきます。ステップ数は現在でも実質的に無限であり、入力数は最先端技術を使えば 1 万個程度までの増加が見込まれます。また、現状のクラスター状態の生成システム (図 7) をチップ化 (図 8) することも視野に入れて、常温で動作する量子コンピューターチップへの研究も進めていきます。

5. 発表雑誌:

雑誌名: 「*Science*」

論文タイトル: Generation of time-domain-multiplexed 2-dimensional cluster state

著者: (Warit Asavanant*, Yu Shiozawa, Shota Yokoyama, Baramee Charoensombutamon, Hiroki Emura, Rafael N. Alexander, Shuntaro Takeda, Jun-ichi Yoshikawa, Nicolas C. Menicucci, Hidehiro Yonezawa, Akira Furusawa)

6. 問い合わせ先:

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻
教授 古澤 明 (ふるさわ あきら)

7. 用語解説:

注 1: ゲート方式

量子コンピューターの実現方式の一つです。この方式では、情報を載せるために必要な量子ビットをたくさん用意しておき、それぞれの量子ビットに (または複数の量子ビットにまたがって) 順に量子操作 (量子ゲート) を行って量子計算を行うものです。ゲート方式は今のコンピューターの計算方法と類似性が高いですが、複数の量子ビットの間にゲートを直接掛ける必要があり、そのための配線が実用化に向けた大きな課題の一つです。(図 1 参考)

注 2: 量子ビット

現在のコンピューターの情報の最小単位がビットであると同様に、量子コンピューターの情報の最小単位が量子ビットです。コンピューターのビットの値は 0 か 1 かのどちらかの値しか取れませんが、量子ビットは両方の値が共存する、ある種の中間的な状態を取ることができます。この状態は重ね合わせと呼ばれており、重ね合わせをうまく利用することで、量子コンピューターは今のコンピューターよりも特定の問題を高速に解くことができます。

注 3: 一方向量子計算

量子コンピューターの実現方式の一つです。この方式は、はじめにクラスター状態と呼ばれる多数の量子ビットから構成された量子もつれ状態を用意し、行いたい量子計算に応じて各量子ビットを測定することによって量子計算を行います。この方式はクラスター状態の量子ビットの数と量子もつれの構造によって行える量子計算が決まります。即ち、どのような量子計算にも使える2次元クラスター状態さえ用意することができれば、後は比較的簡単な各々の量子ビットの測定で量子計算を実現できます。このため、一方向量子計算では、ゲート方式における配線の難しさの問題が、どのように大規模な2次元クラスター状態を生成するかという問題に置き換わります。(図2も参考)

注4: 量子もつれ

量子もつれというのは量子力学を使わなければ説明がつかない2つ以上の量子ビットの間の量子的な相関を指します。量子もつれは量子力学を応用した様々な情報処理技術に利用されており、その例として量子テレポーテーション、量子通信、量子計算などが挙げられます。クラスター状態も量子もつれの一種です。

注5: 2次元クラスター状態

一方向量子計算に使う量子もつれのことをクラスター状態と呼びます。このクラスター状態の量子もつれの様子を表すために、しばしば量子ビットは丸で表され、その量子ビット間の量子もつれが線で表されます。クラスター状態を使ってどのような量子計算ができるかはそのクラスター状態の構造で決まります。例えば、一本の鎖のクラスター状態(1次元クラスター状態)は一つの入力で一つの出力の計算しか行えません。多入力・多出力のどのような量子計算も行えるようにするには、網目状につながった構造を持つ2次元クラスター状態が必要です(図3)。多入力の計算が必要というのは、今のコンピューターで例えると、足し算や掛け算を計算するのに、複数の入力(つまり二つ以上の数)を扱える必要があるということと同じです。

注6: 時間領域多重

光を用いた量子計算の実験では、一本の光を一つの量子ビットとして扱うのが典型的な方法です。そのため、量子ビットの数を増やしたいときはその光の本数及びそれに関連する光学素子を増やす必要があり、大規模化することが困難です。一方、時間領域多重の基本的な考えは、一本の光を一つの量子ビットとして考えるのではなく、一本の光の上に時間的に局在した複数の光のパルス量子ビットとして考えるということです。時間領域多重を使えば、少数の素子で大規模な量子もつれを作ることが可能になり、この方法に基づいて、過去には100万個の光のパルスの量子もつれが生成されています。(図4参考)

8. 添付資料:

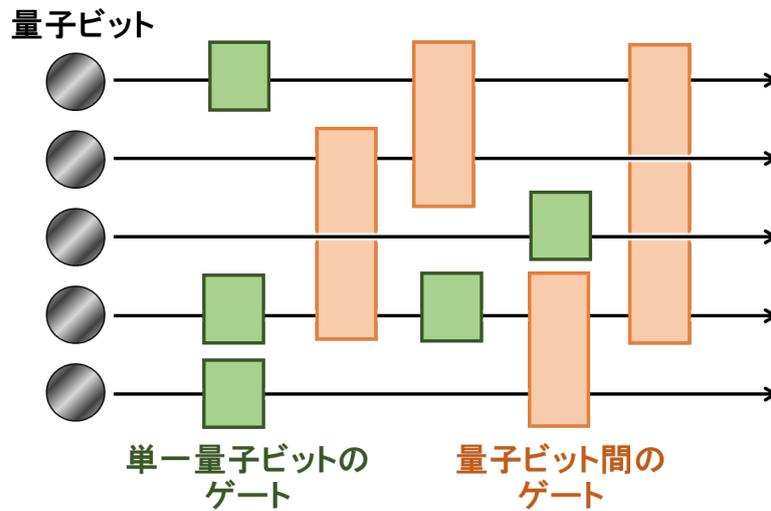


図 1: 量子回路モデルのイメージ図

入力の量子ビットを用意してから、量子操作（ゲート）を順番にかけていく量子回路モデルのイメージ図です。この図の回路は、1量子ビットに対する量子ゲートと2量子ビットに対する量子ゲートから構成された回路となっています。ある2つの量子ビットの間にゲートをかけたい場合は、その量子ビットの間に予めゲート掛けられるように物理的な配線が必要になります。

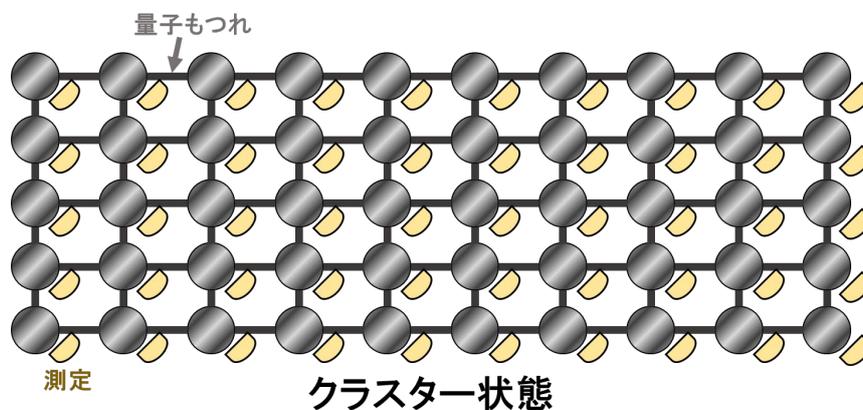
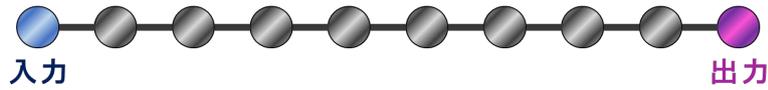


図 2: 一方向量子計算のイメージ図

図 1 と同様に灰色の丸は量子ビットを表し、紫の線は量子もつれを表しています。この丸と線で表せるような量子もつれのことをクラスター状態と呼びます。一方向量子計算ではこのようなクラスター状態を用意し、各量子ビットを測定することで量子計算が行えます。基本的に、一個一個の量子ビットの測定は、一個または複数の量子ビットに対するゲートよりは技術的に簡単です。このため、はじめに適切なクラスター状態さえ用意できれば、後の量子計算に必要な要素は比較的簡単なものになります。

1次元クラスター状態



2次元クラスター状態

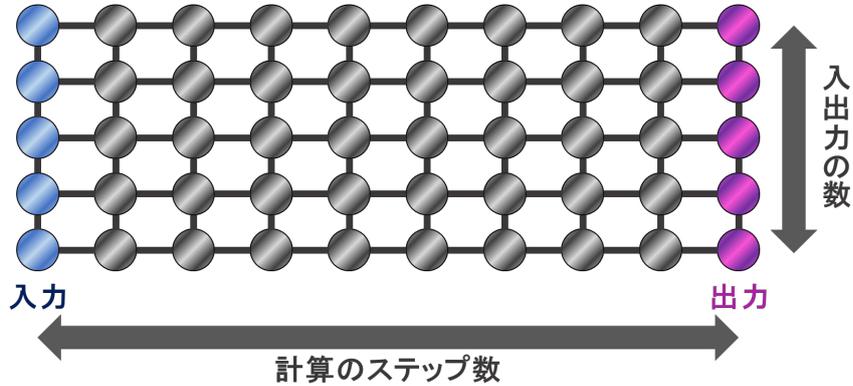


図 3: クラスター状態の構造のイメージ図

クラスター状態には量子ビットの間の繋ぎ方によって幾つかの構造が存在します。その最も簡単な例として1次元クラスター状態があります。このクラスター状態は一本の鎖のような量子もつれになっており、一つの入力が入り、一つの出力が出るような量子計算に利用できます。しかし、実際のほとんどの計算は複数の入力が必要になるため、1次元クラスター状態は量子計算には不十分なリソースです。それに対して、あらゆる量子計算に十分なリソースとして、2次元クラスター状態と呼ばれるものがあり、今回の成果で生成に成功したのはこちらのタイプです。この2次元クラスター状態では、量子ビットが2次元的に網目のように繋がっており、一つの辺の長さは入力と出力の数を決め、もう一つの辺の長さは計算のステップ数を決めます。

光の従来手法



時間領域多重

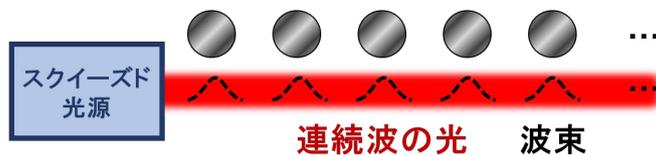


図 4: 時間領域多重のイメージ図

従来の光の量子もつれの生成実験では、一つの量子的な光源（スクイーズド光源）を一つの量子ビットとして扱ってきました。この方法の場合、大規模な量子もつれを作るためには、量子ビットの数に応じた個数の光源を用意する必要が生じるため、技術的に極めて困難でした。そこで、我々の研究グループでは時間領域多重という方式を開発しました。この手法では、一つの量子的な光源から連続的に出てきた光を時間的に区切り、区切った1つ1つの波束（パルス）を1つ1つの量子ビ

ットとして扱います。これによって、一つの光源から無数の量子ビットを生成することができ、大規模な量子もつれの生成を少ない光学素子の数で実現することができます。

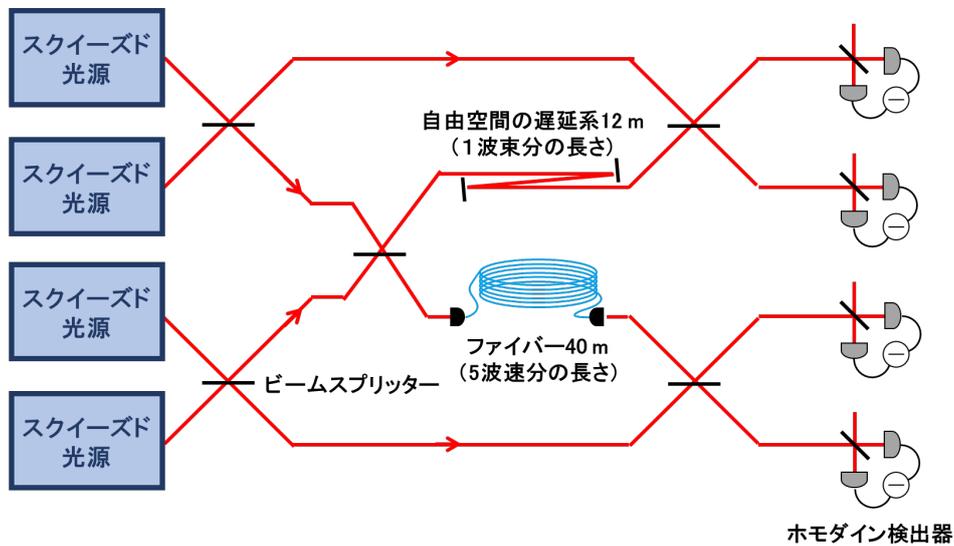


図 5: 今回の 2 次元クラスター状態の生成のシステム

今回の 2 次元クラスターの生成系の概要図です。必要な要素は 4 つのスクイーズド光源、5 つのビームスプリッター（部分透過ミラー）と二つの光学遅延系です。スクイーズド光源が動作している限り、2 次元クラスターの長辺（ステップ数）の長さはいくらでも長くすることができます。短辺（入力数）は 2 つの遅延系の長さの比で決まります。今回は短い方が 12 m、長い方がファイバーによる 40 m（空気中の 60 m に相当）であり、5 倍の違いがあるため、5 入力を扱える 2 次元クラスター状態となります。そのため、入力数を増やしたいときはこの比だけ増やせばよく、他の光学素子の配置を変更する必要はありません。このように、このシステムは大規模な 2 次元クラスター状態を容易に生成することができ、さらに 2 つの遅延系の長さの比さえ変えれば原理的にどれほど大きいクラスター状態でも作ることができます。

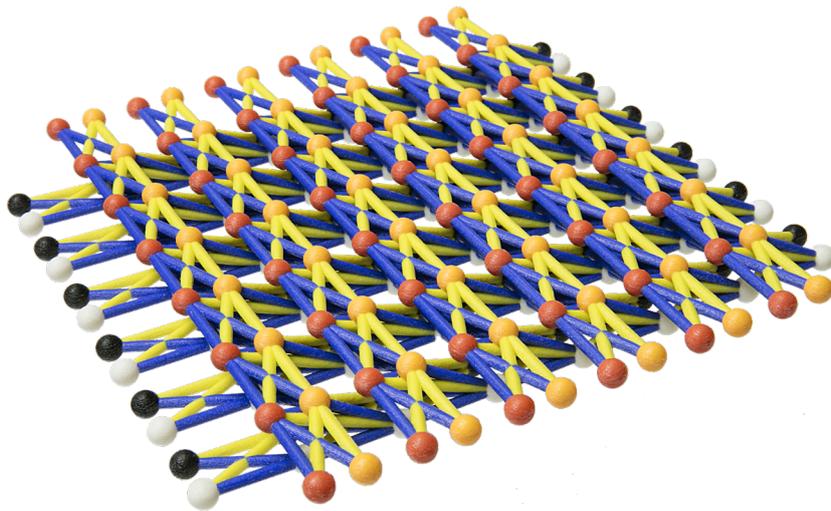


図 6: 2 次元クラスター状態の 3D モデル

今回の手法で生成できる 2 次元クラスター状態を 3D モデルにしたもの。

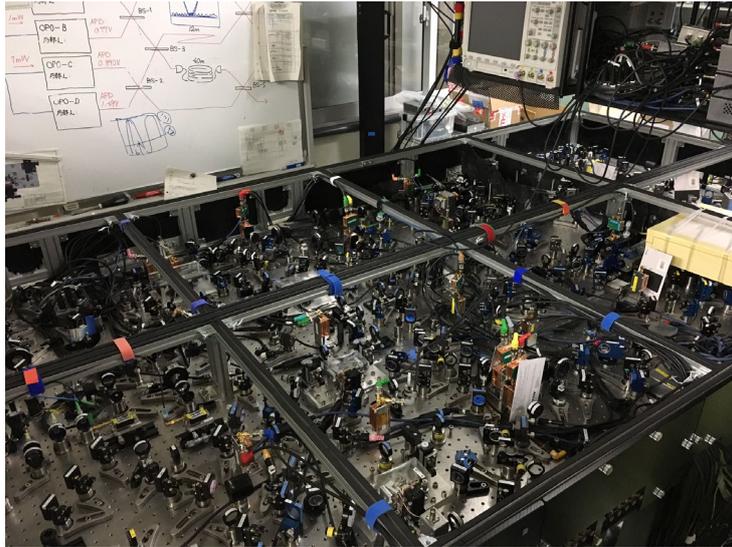


図 7: 実際の今回の系の写真
実験系の写真です。

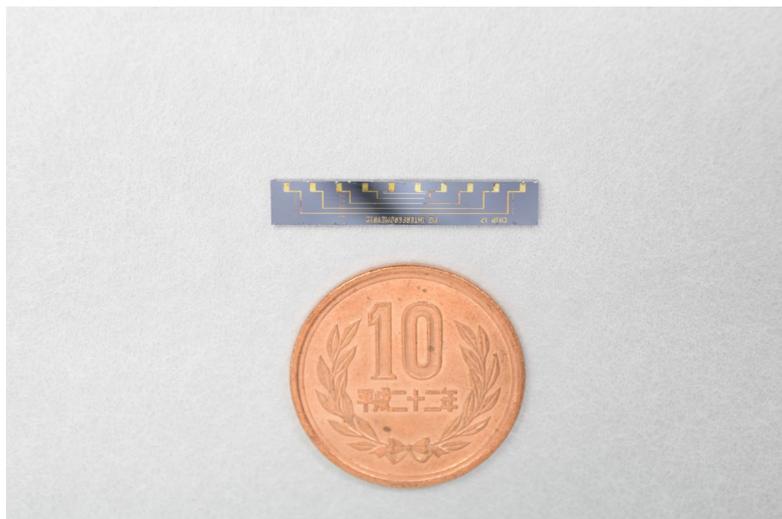


図 8: 光導波路チップ

この写真は過去の実験で用いられた、光の量子もつれ状態を作り出すためのチップの写真です。図 7 から分かるように、今回の実験で汎用的な量子もつれである 2 次元クラスター状態を生成するには大きな光学系が使われています。この光学系を、将来的にはこの写真と同様にチップ化する研究を進めることで、チップ上で大規模な量子計算が行える量子コンピューターを実現することを目指します。