

# 光量子コンピュータの 現状と展望

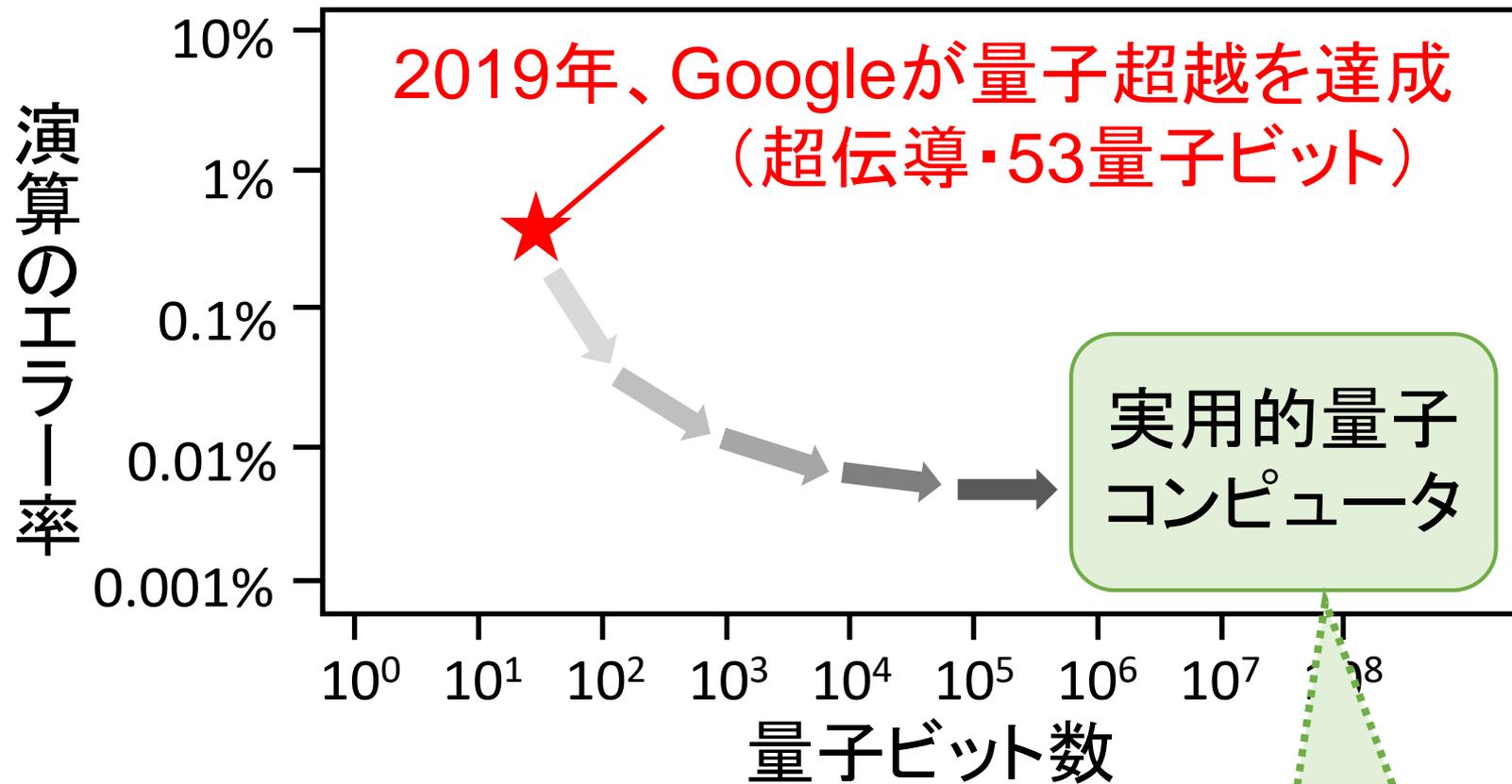
武田俊太郎

東京大学大学院工学系研究科

# 光量子コンピュータの 現状と展望

1. **イントロダクション**
2. 光量子コンピュータの原理と課題
3. 大規模光量子コンピュータへの展望

# 量子コンピュータ実現への道



**例：2048ビットの自然数の素因数分解** [arXiv:1905.09749](https://arxiv.org/abs/1905.09749)

- ・エラー0.1%、 $2 \times 10^7$ 量子ビット ( $\sim 10^4$ 個/1論理量子ビット)
- ・計算に8時間(クロック周波数 $1\mu\text{s}$ )

⇒ 実用化へは課題山積、ハードウェアもどれが本命か不明

# 量子コンピュータのハードウェア

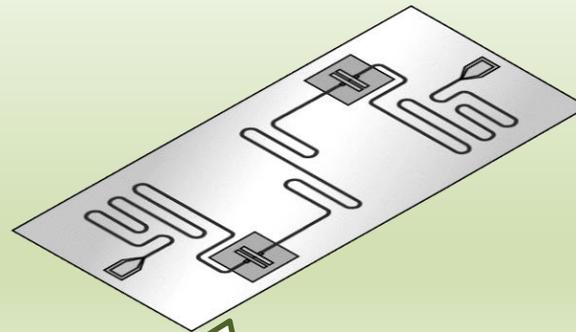
なぜ我々は光で量子コンピュータを作りたいか？

## イオン



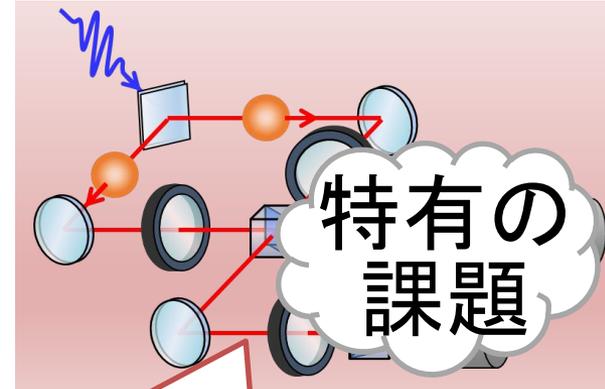
× 真空装置中

## 超伝導素子



× 冷却装置中

## 光



- ◎ 室温・大気中
- ◎ 光通信が可能
- ◎ 高クロック動作

## 本日の内容

2. 光量子コンピュータの原理と課題
3. 大規模光量子コンピュータへの展望

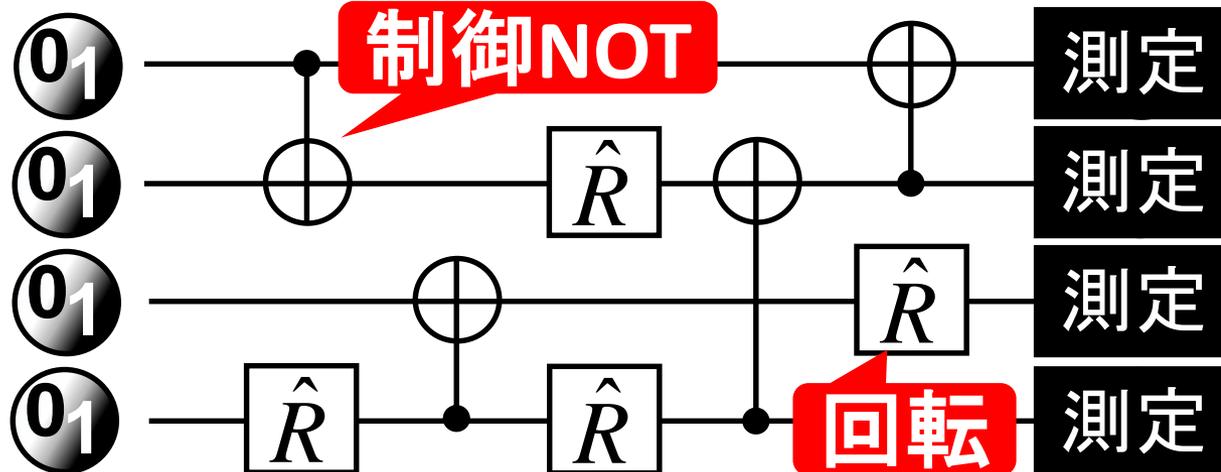
# 光量子コンピュータの 現状と展望

1. イントロダクション
2. **光量子コンピュータの原理と課題**
3. 大規模光量子コンピュータへの展望

光でどう実装するか？

1. 量子ビットを準備

2. 演算を組み合わせて計算



制御NOT

回転

3. 計算結果  
読み出し

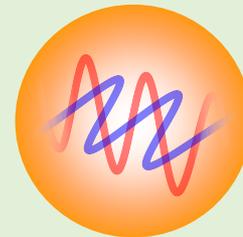
# 光量子コンピュータの構成要素

量子ビット

光の最小単位 = 光子



=



0・1の重ね合わせ

縦・横偏光の重ね合わせ

3次の非線形  
光学効果

光子A入射

屈折率変化

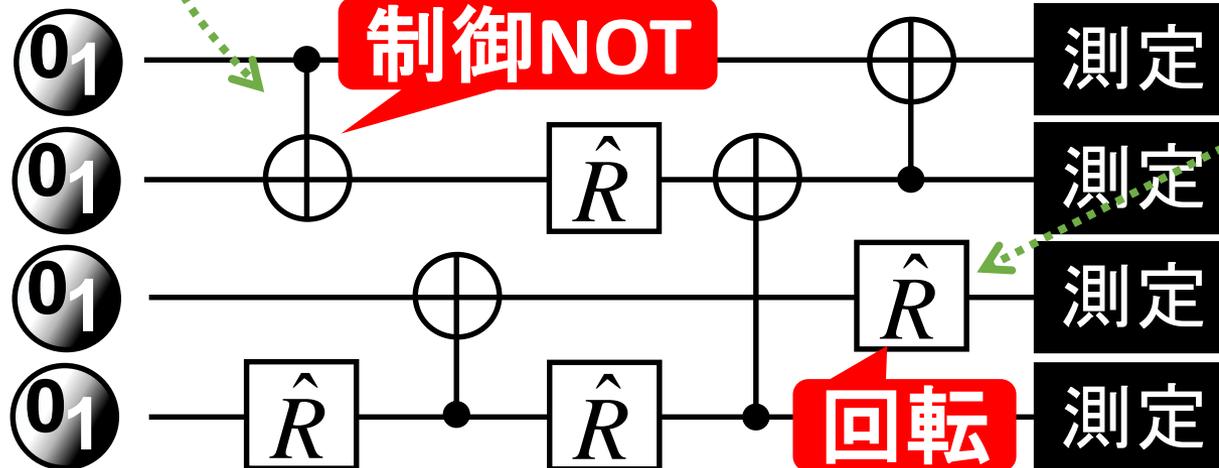
難

A  
B

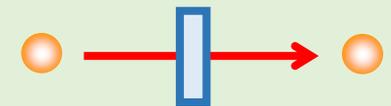
$\chi^{(3)}$

A  
B

光子B  
偏光が変化



波長板

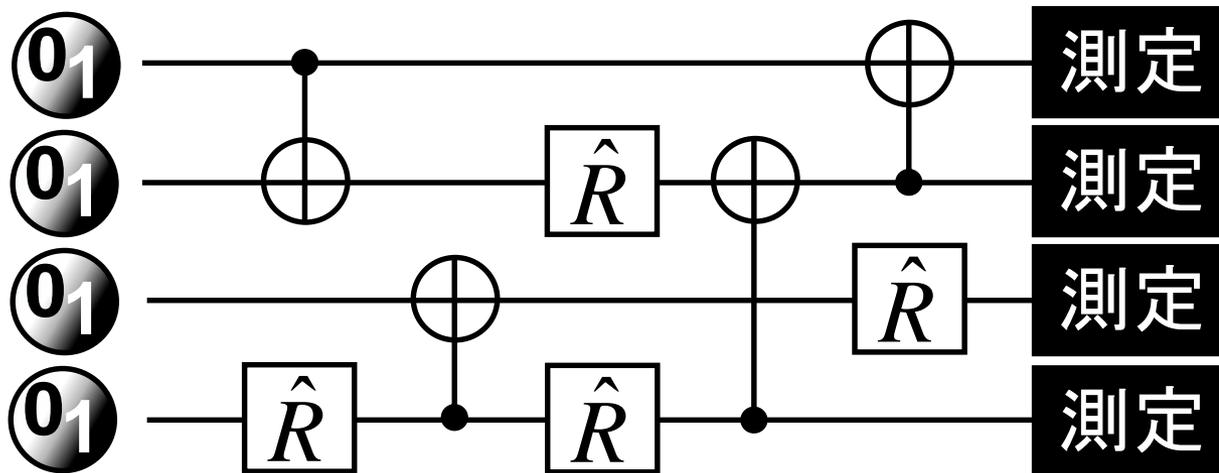


光子検出器



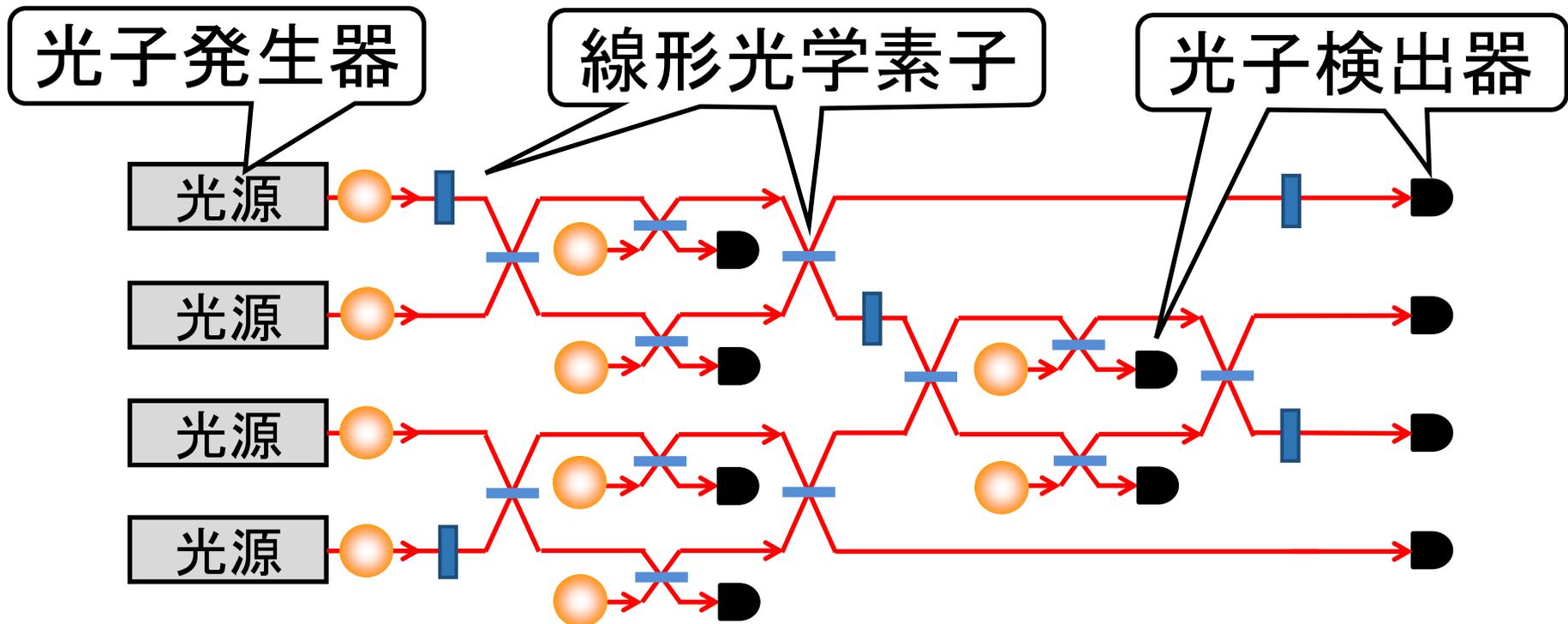
## 2001年 線形光学素子のみでの光量子計算の提案

E. Knill, R. Laflamme, G. Milburn, Nature 409, 46 (2001)



## 2001年 線形光学素子のみでの光量子計算の提案

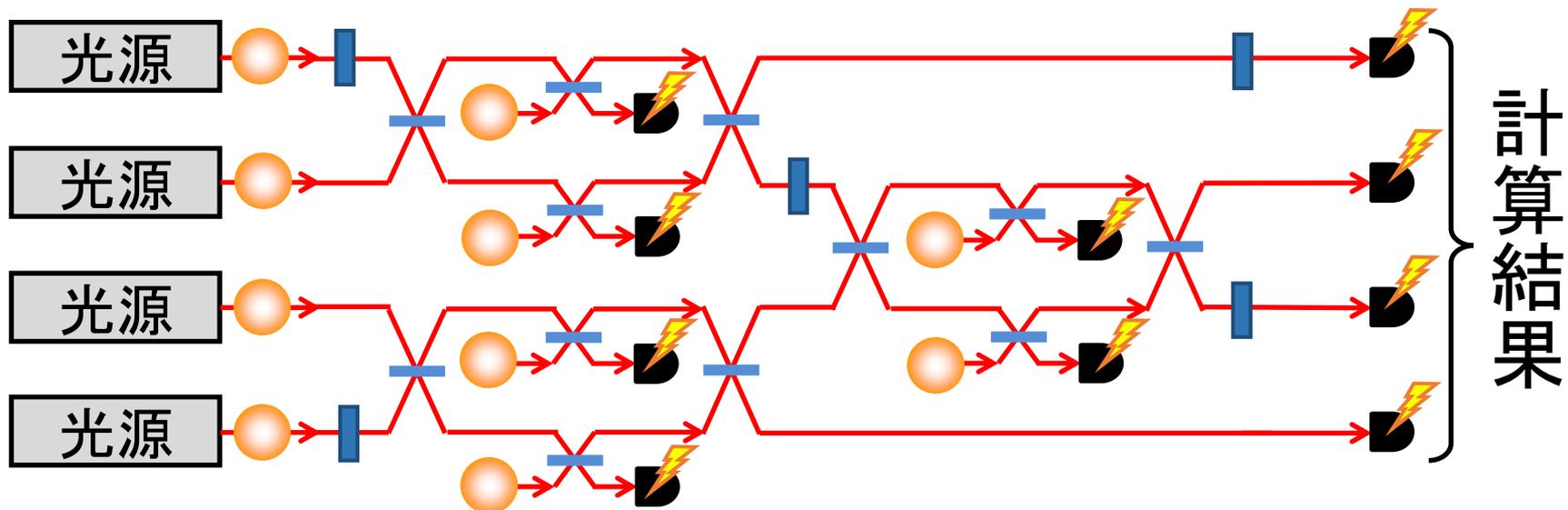
E. Knill, R. Laflamme, G. Milburn, Nature 409, 46 (2001)



## 2001年 線形光学素子のみでの光量子計算の提案

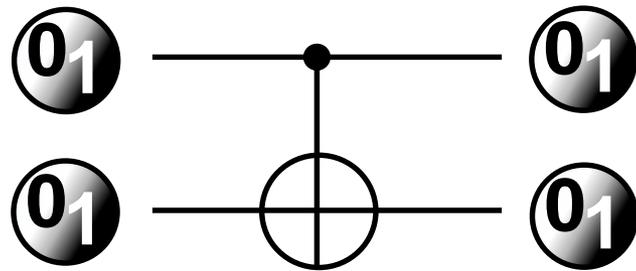
E. Knill, R. Laflamme, G. Milburn, Nature 409, 46 (2001)

光回路で計算

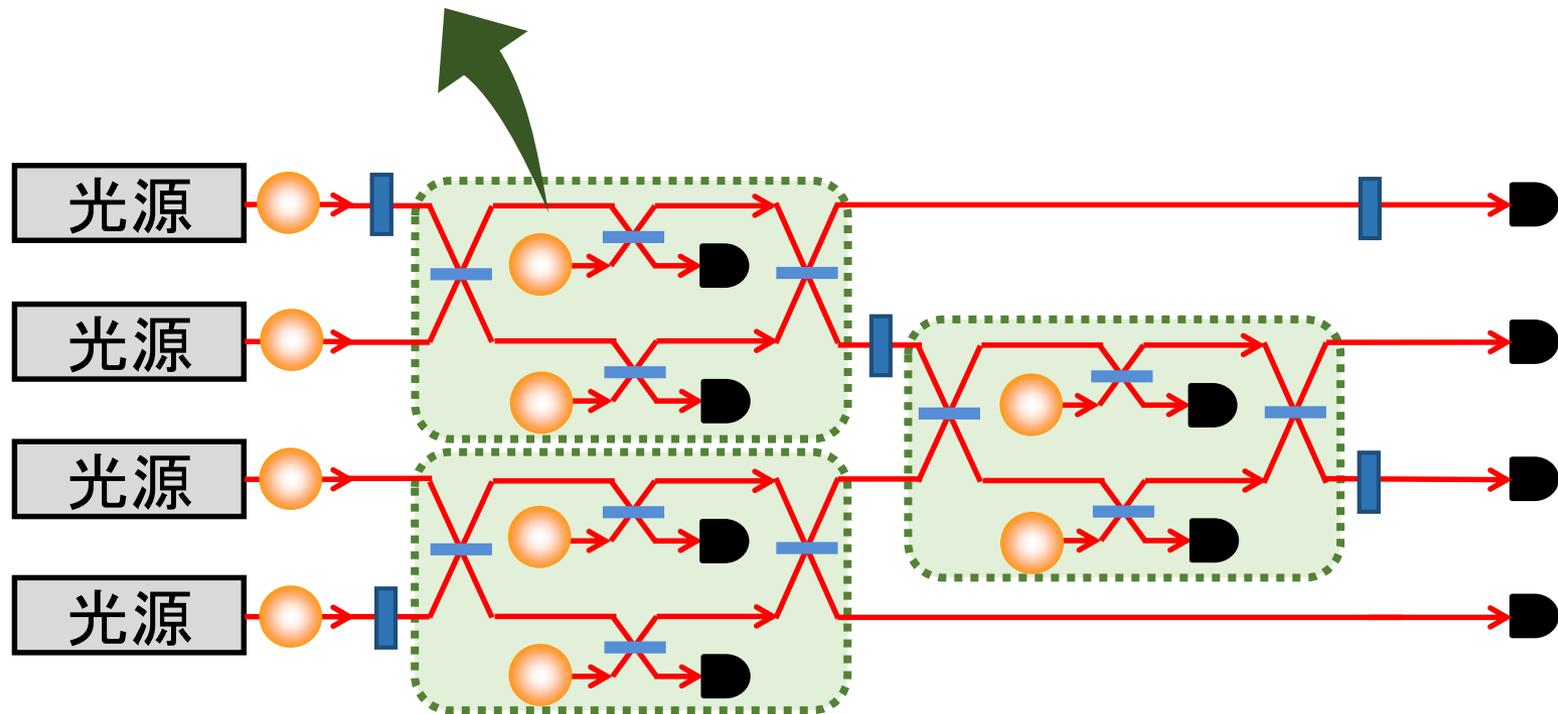


# 光量子コンピュータの典型的な作り方

## 2量子ビット演算



補助光子と光子検出で  
**確率的**に非線形性を誘起  
(大量のリソースで確率→1)  
**⇒大規模な計算は困難**



# 最近の研究動向

2量子ビット演算なしの  
量子計算で  
量子超越を目指す

小規模な光回路で  
量子アルゴリズム

光チップで大規模な光回路を目指す

# 最近の研究動向

## ボソンサンプリング

汎用の量子コンピュータには確実に  
実行できる2量子ビット演算が課題

スパコン6億年の計算を200秒で  
Science **370**, 1460 (2020)

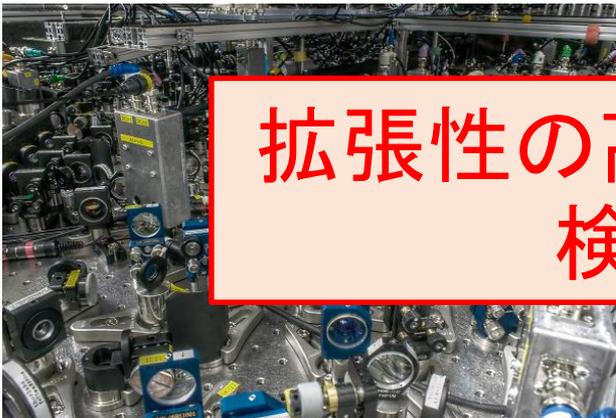
## 小規模アルゴリズム実装

量子化学計算 量子機械学習

Nat. Commun. **5**,  
4213 (2014)

Nat. Phys. **13**,  
551 (2017)

## バルク光学系



テーブル上に多数の光学素子

拡張性の高い光回路構造の  
検討が課題

## 光チップ化

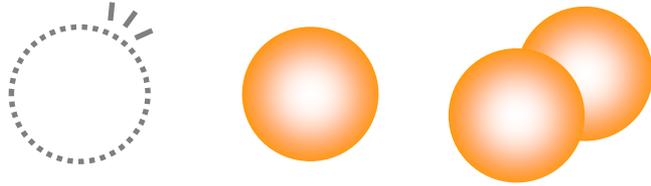
1チップに550個以上の素子  
Science **360**, 285 (2018)

# 光量子コンピュータの 現状と展望

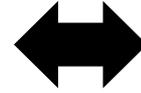
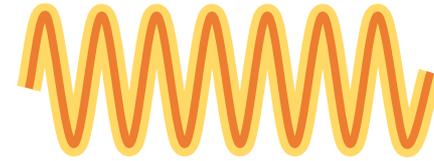
1. イントロダクション
2. 光量子コンピュータの原理と課題
3. **大規模光量子コンピュータへの展望**

# 展望1: 確率的な演算を克服する

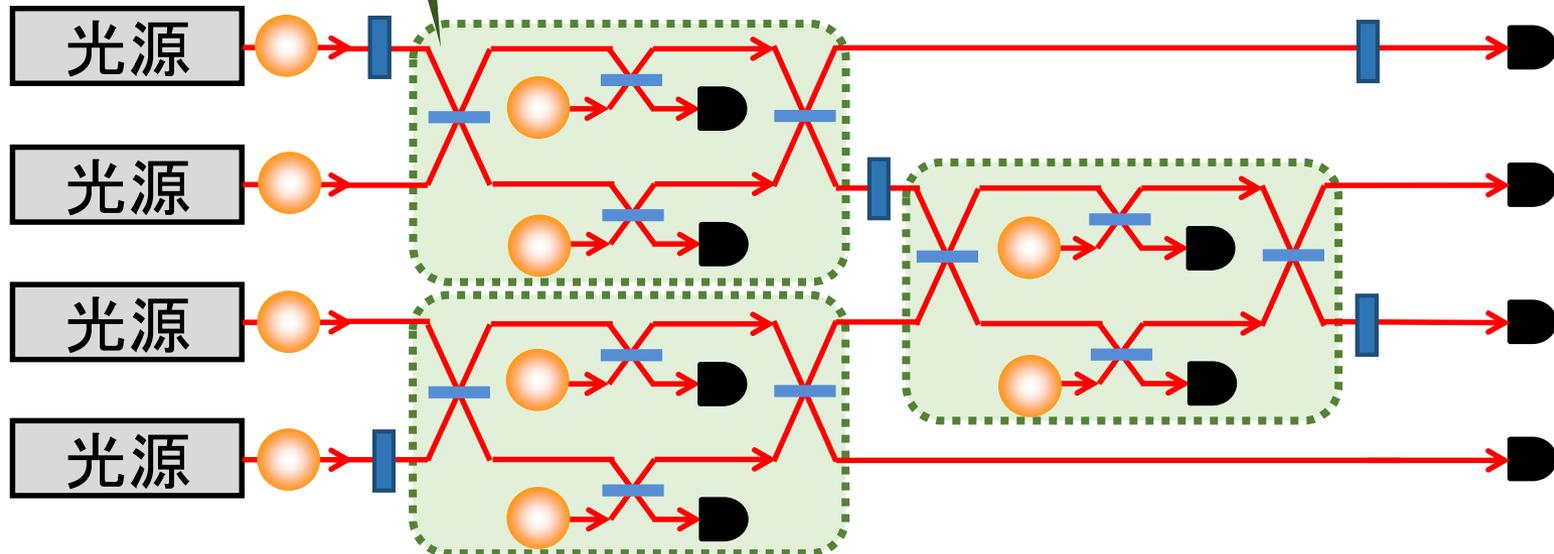
光の粒子性



光の波動性

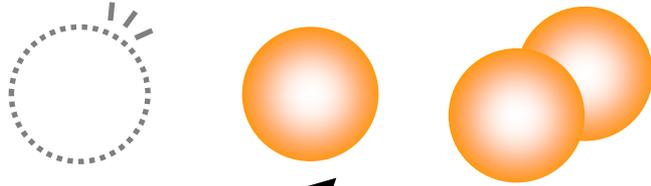


2量子ビット演算が確率的



# 展望1: 確率的な演算を克服する

## 光の粒子性



光子の数に着目  
(離散量)

・単一光子源

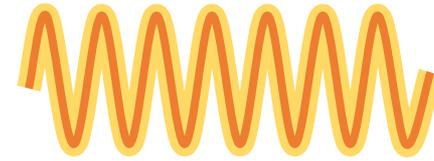
確率的

・光子検出器

光子数

低効率

## 光の波動性



振幅・位相に着目  
(連続量)

・スクイズド光源

確率1

・ホモダイン検出器

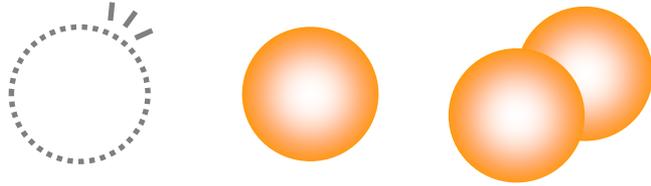
振幅

高効率

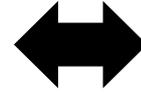
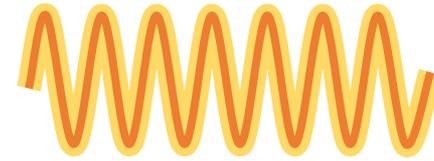
こちらの技術を駆使して高効率な演算回路を作ろう

# 展望1: 確率的な演算を克服する

## 光の粒子性



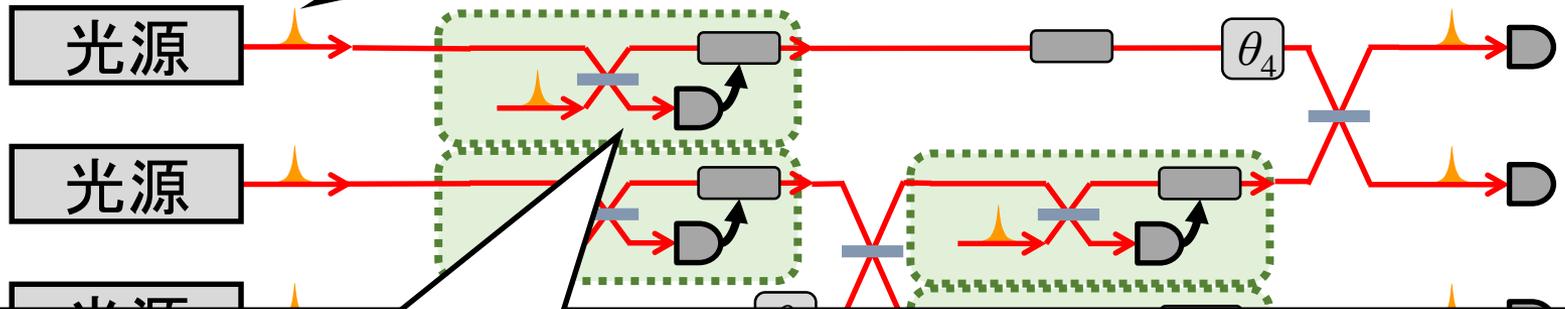
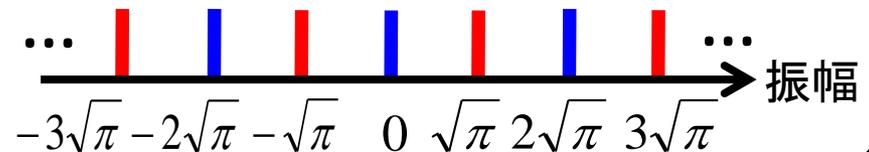
## 光の波動性



振幅成分(連続量)に量子ビットの  $|0\rangle$   $|1\rangle$  をコード

⇒ **量子誤り訂正も可能**

例: Phys. Rev. A **64**, 012310 (2001)



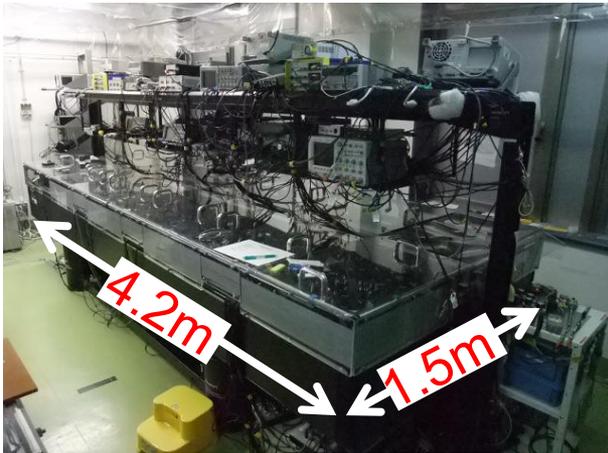
振幅・位相(連続量)の制御技術を用いた演算回路

⇒ 測定誘起の手法で**非線形な演算も確率1で可能**

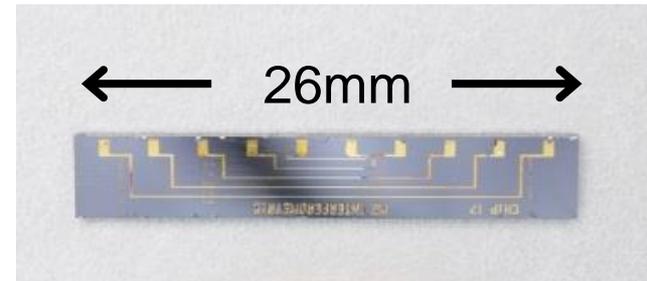
例: Phys. Rev. A **71**, 042308 (2005); Phys. Rev. A **93**, 022301 (2016)

# 展望2: 光回路の拡張性を高める

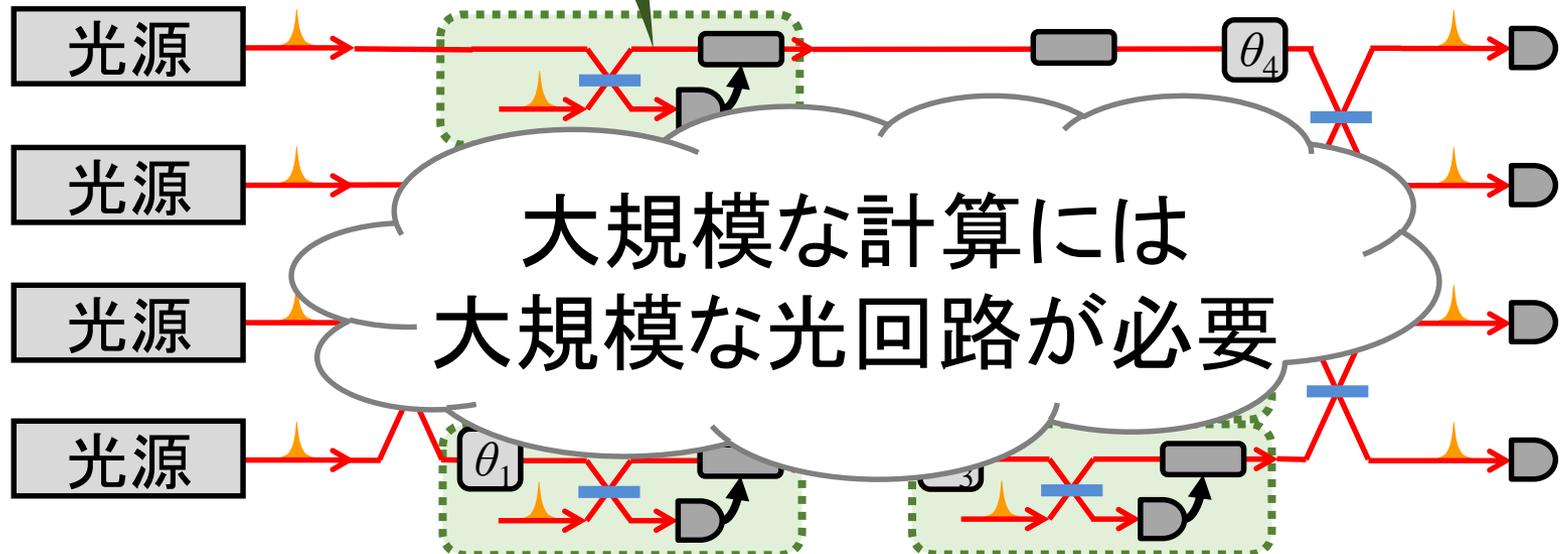
## 光学テーブル



## 光導波路チップ



Nat. Photon. 11, 447 (2017)

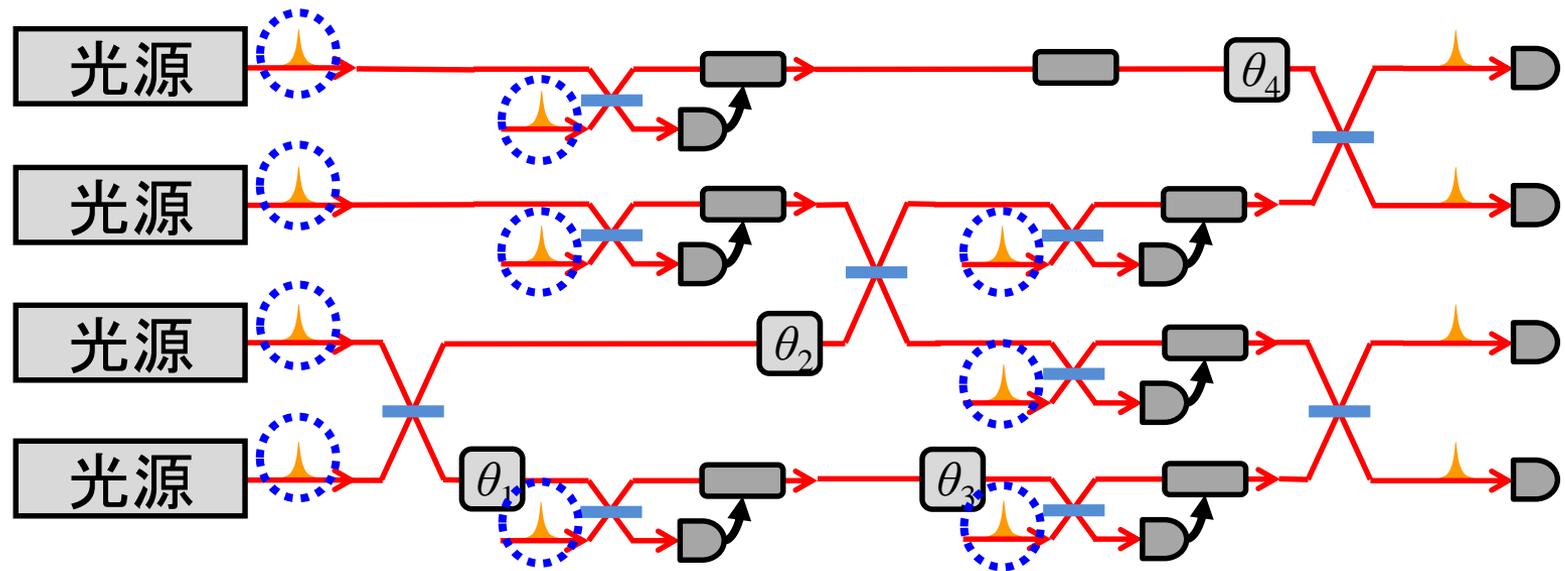
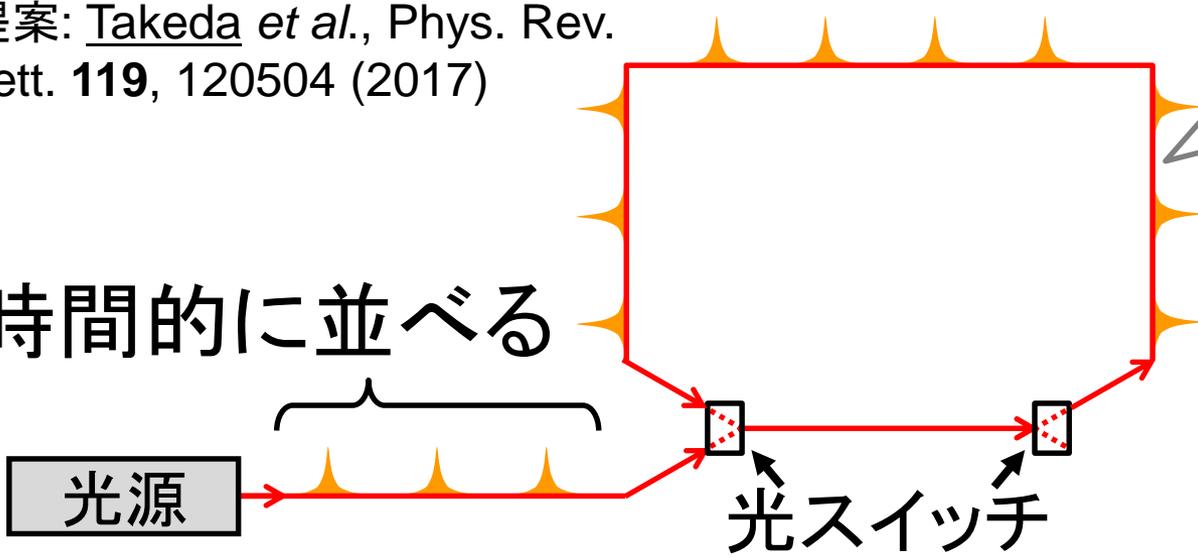


# 大規模化へのアプローチ(ループ方式)

提案: [Takeda et al., Phys. Rev. Lett. 119, 120504 \(2017\)](#)

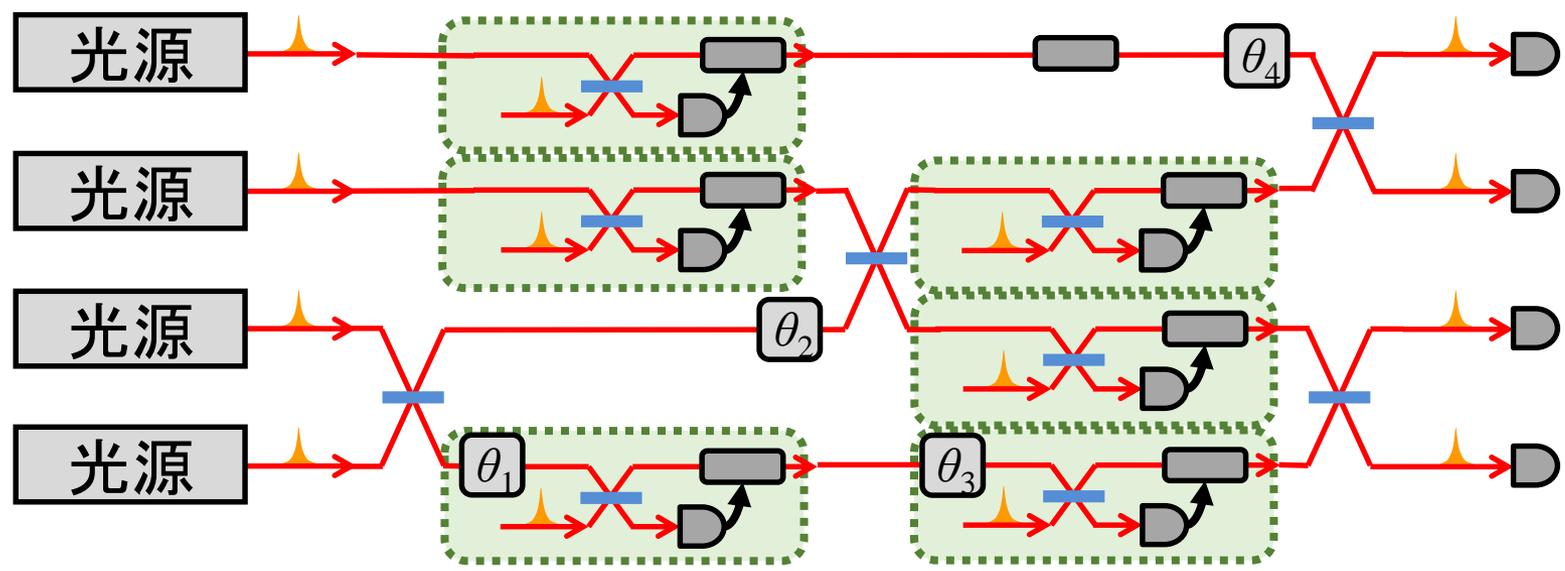
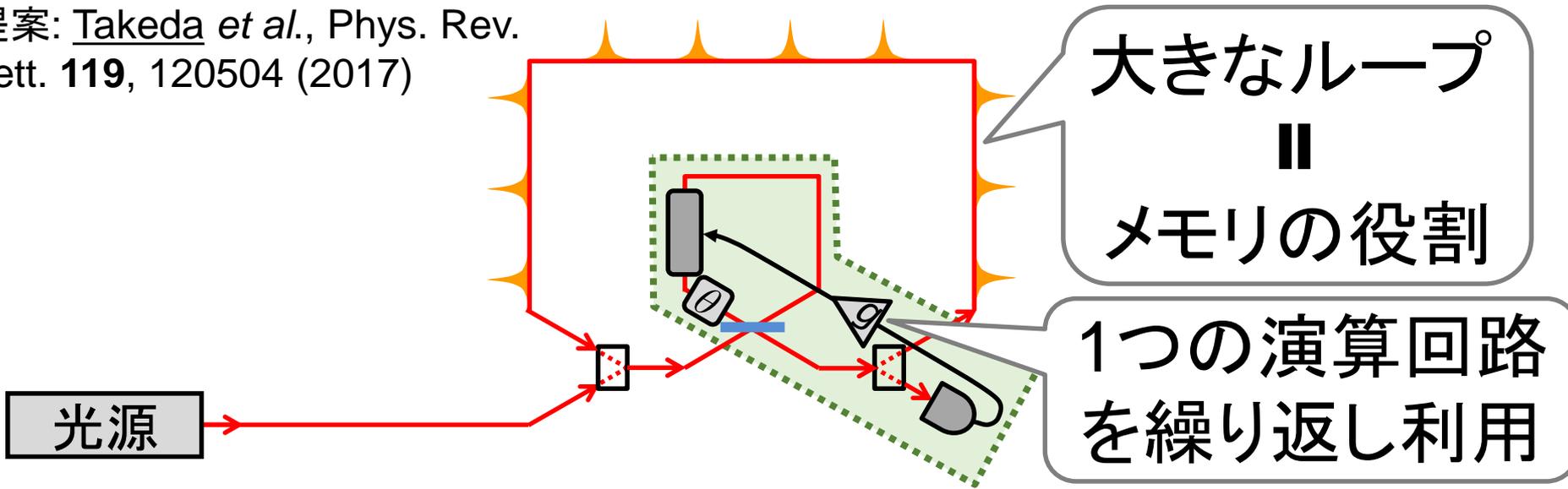
大きなループ  
||  
メモリの役割

時間的に並べる



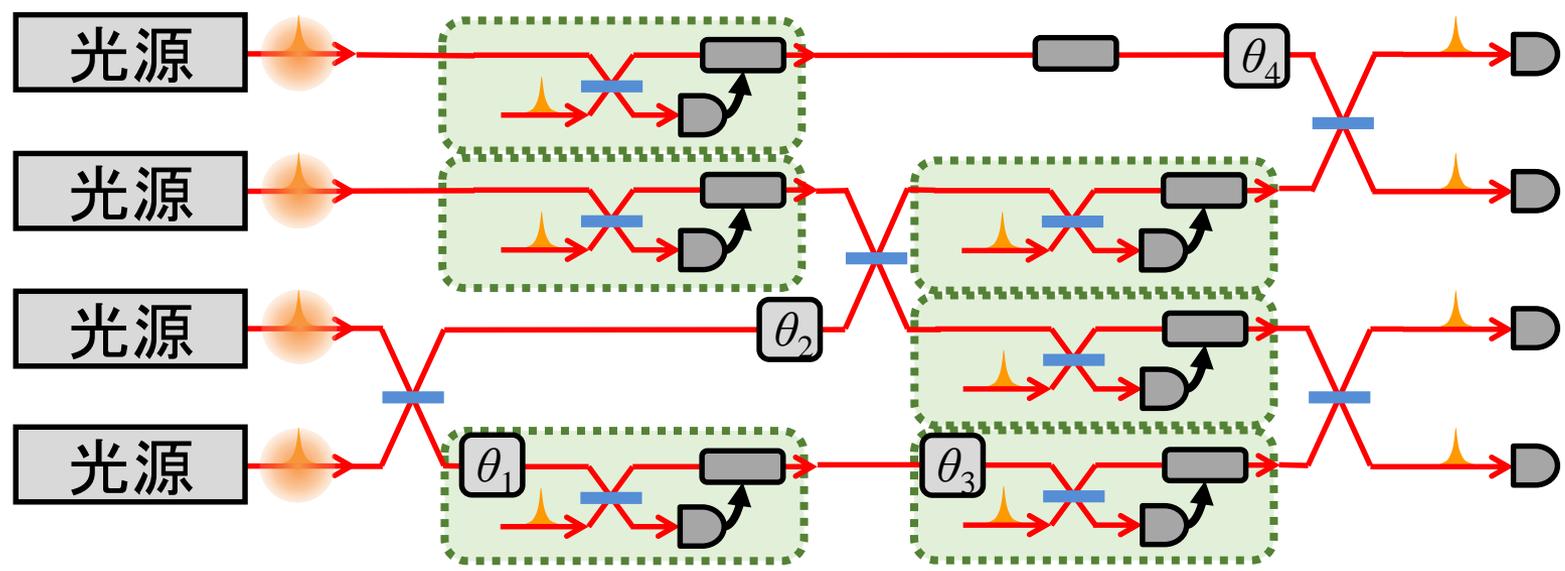
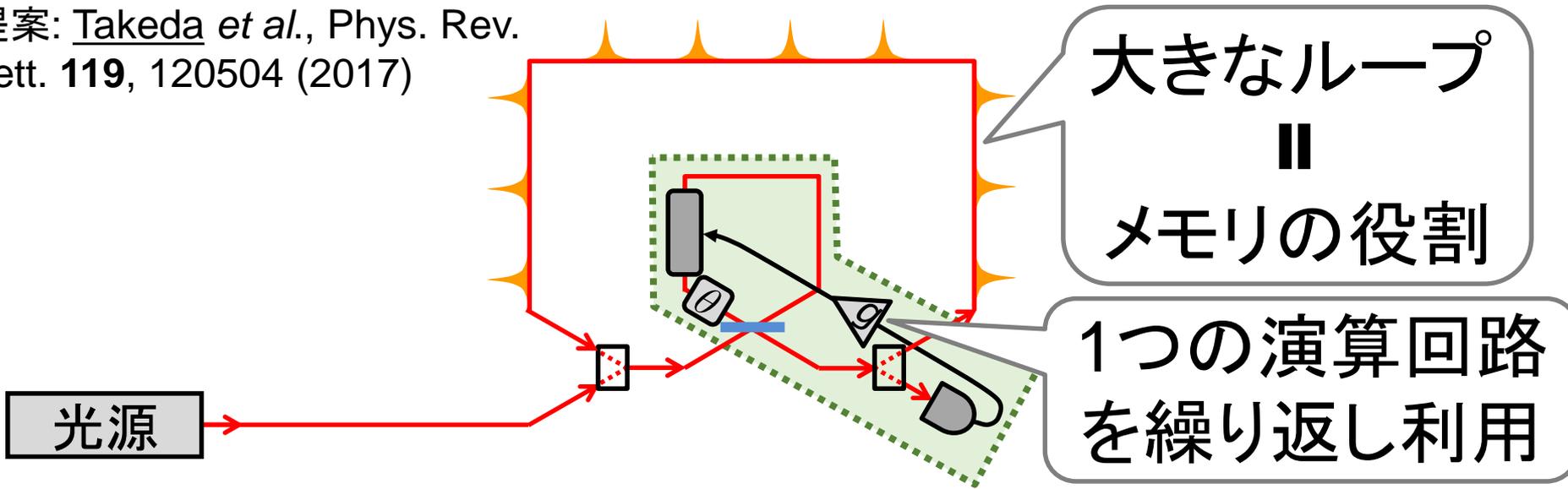
# 大規模化へのアプローチ(ループ方式)

提案: [Takeda et al., Phys. Rev. Lett. 119, 120504 \(2017\)](#)



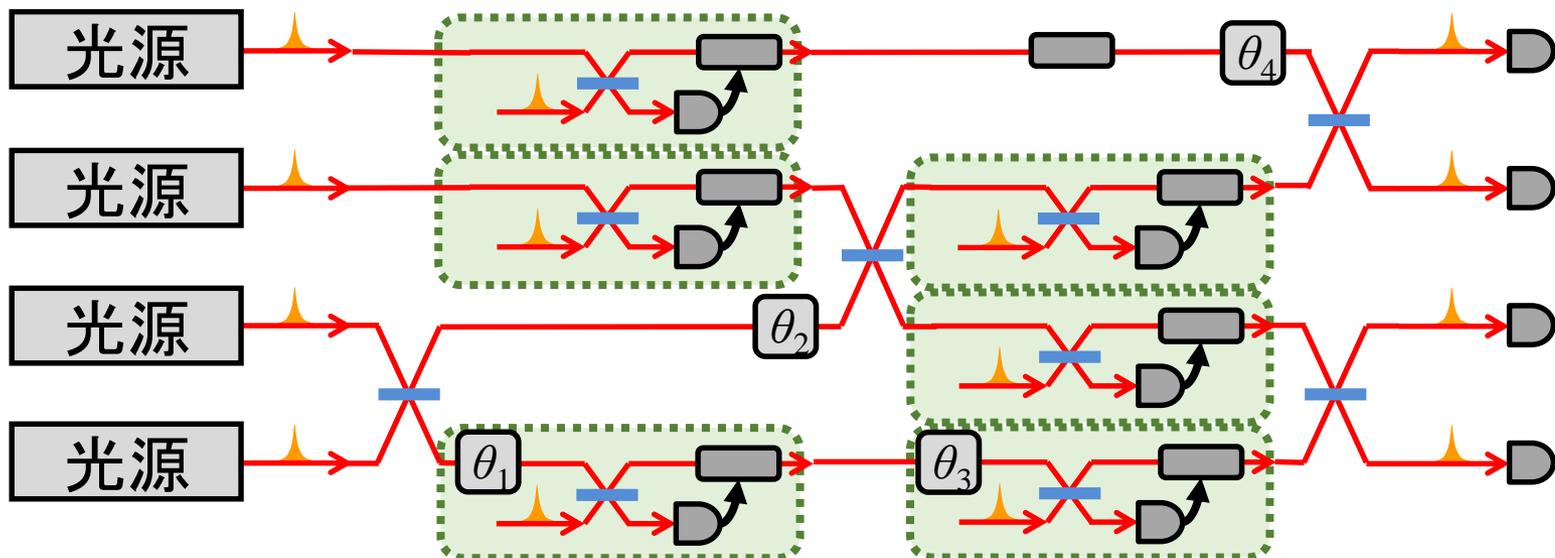
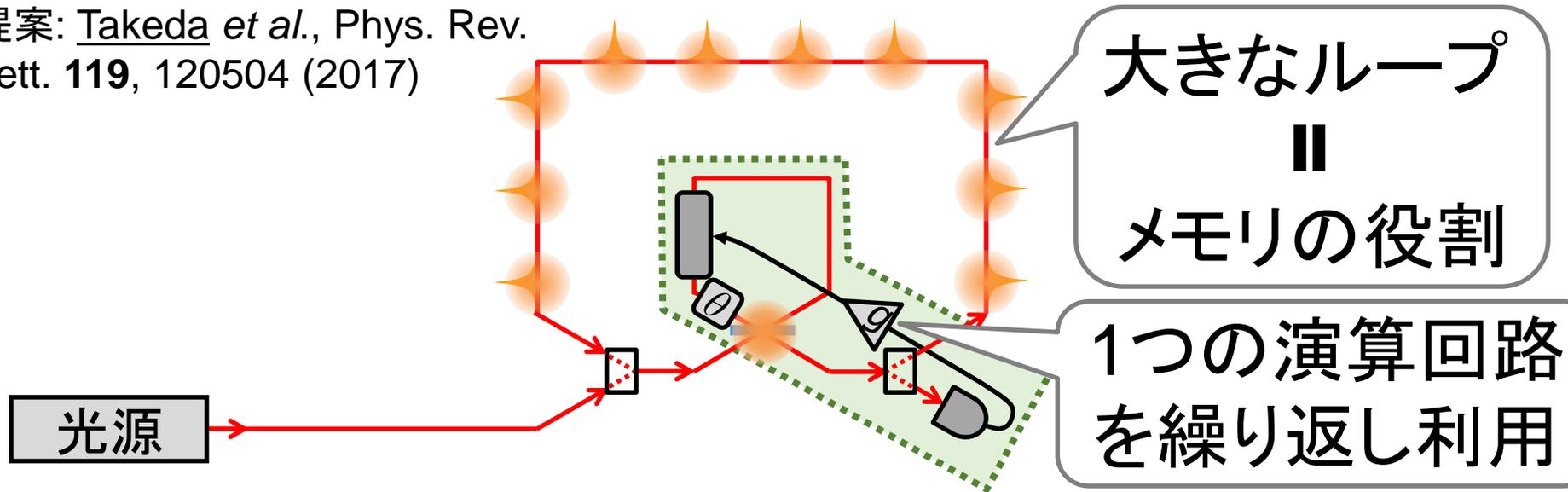
# 大規模化へのアプローチ(ループ方式)

提案: [Takeda et al., Phys. Rev. Lett. 119, 120504 \(2017\)](#)



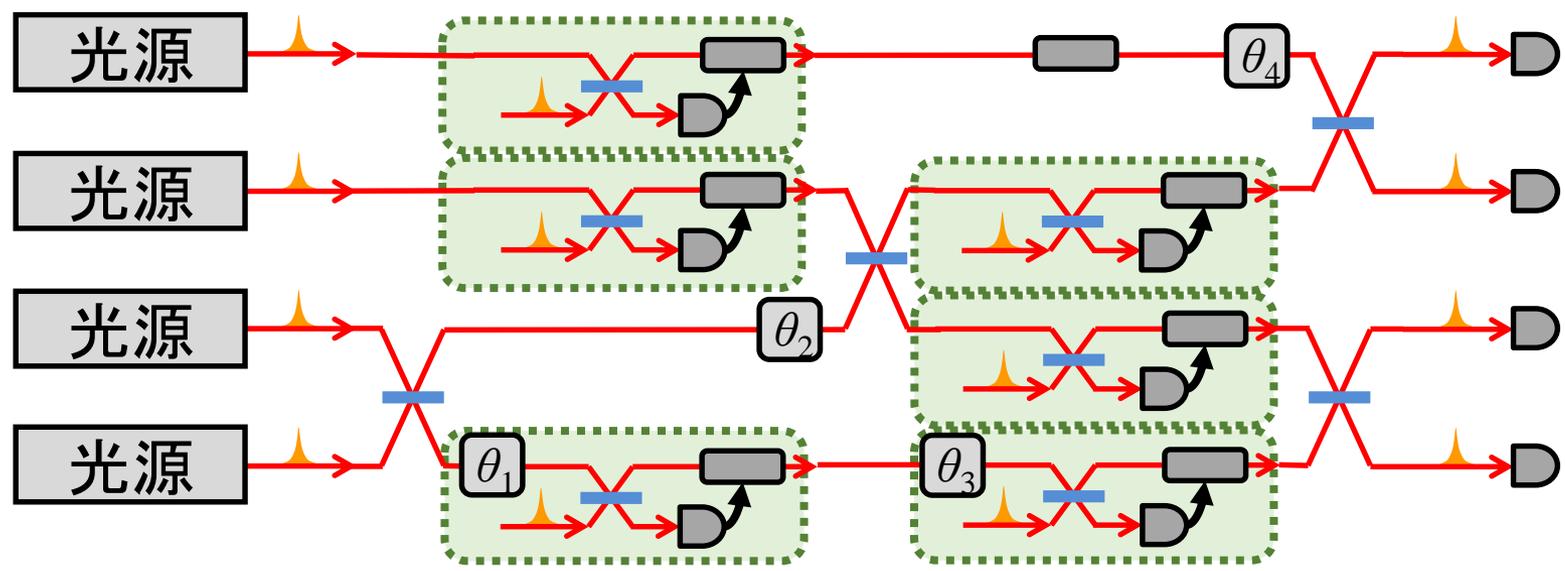
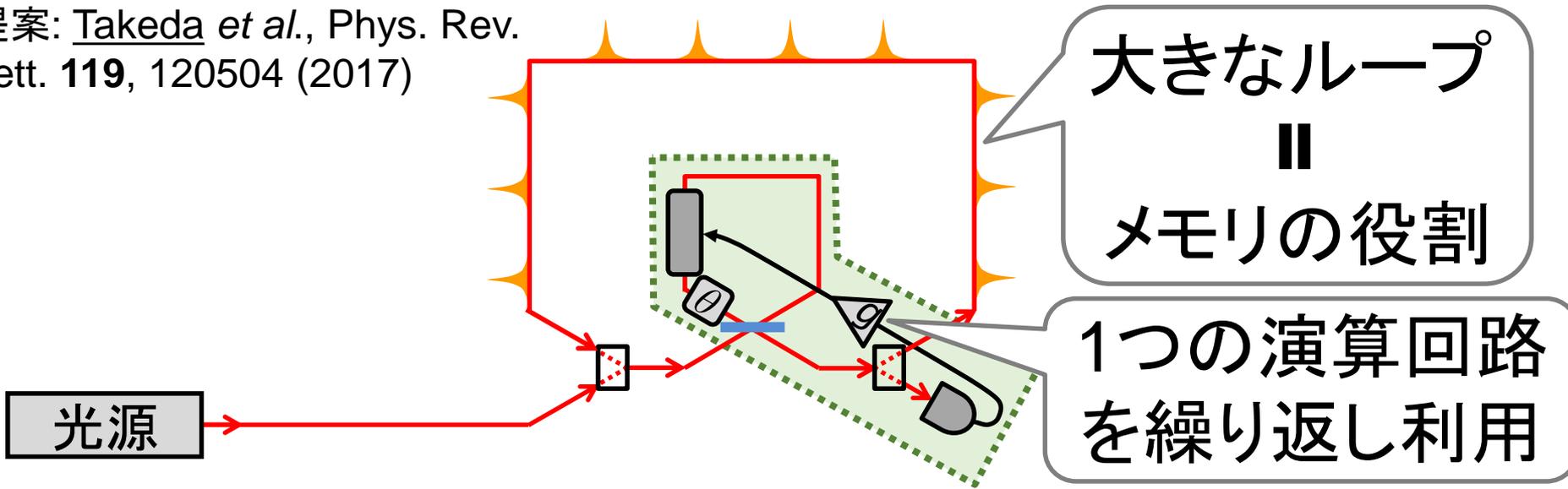
# 大規模化へのアプローチ(ループ方式)

提案: [Takeda et al., Phys. Rev. Lett. 119, 120504 \(2017\)](#)



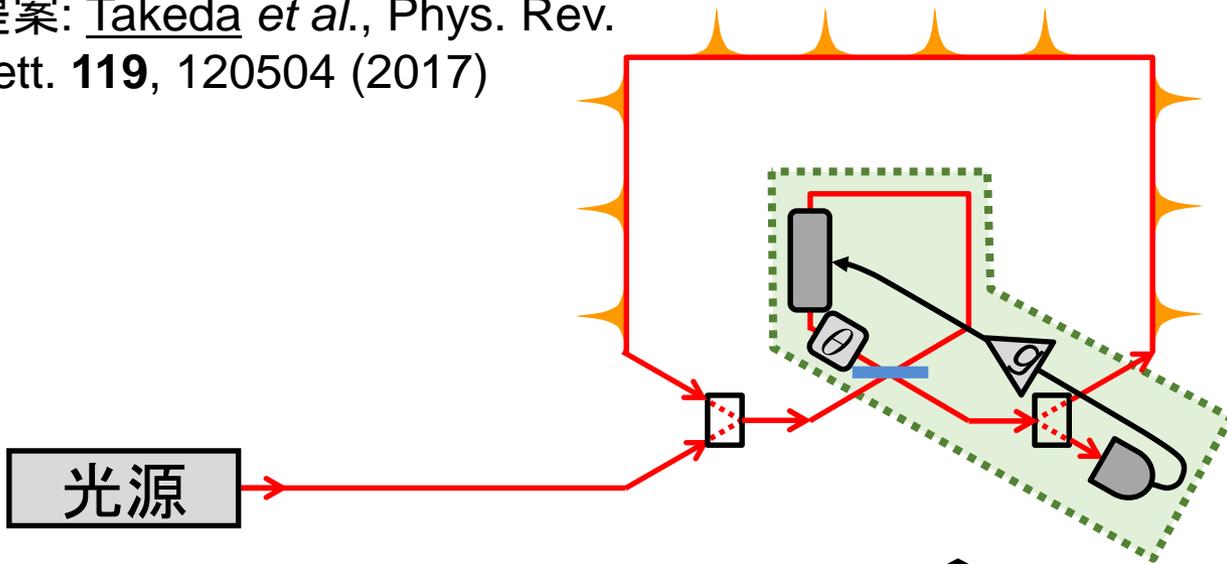
# 大規模化へのアプローチ(ループ方式)

提案: Takeda et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 120504 (2017)

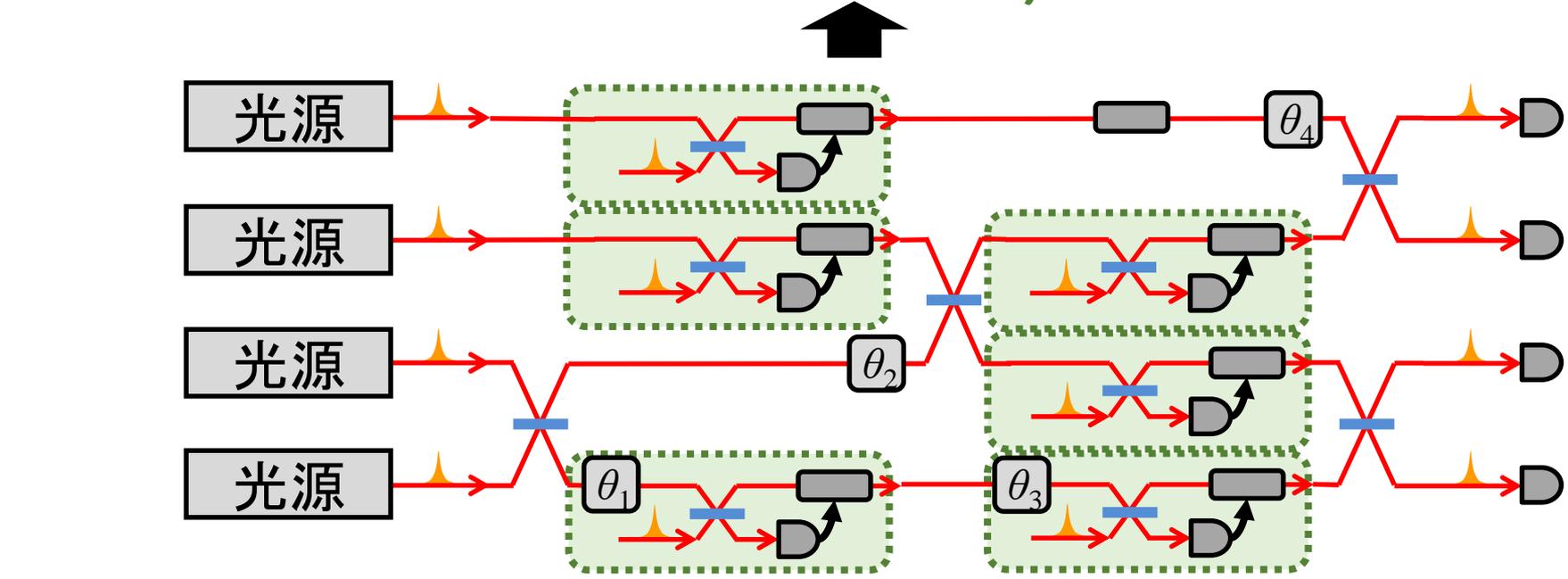


# 大規模化へのアプローチ(ループ方式)

提案: Takeda et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 120504 (2017)

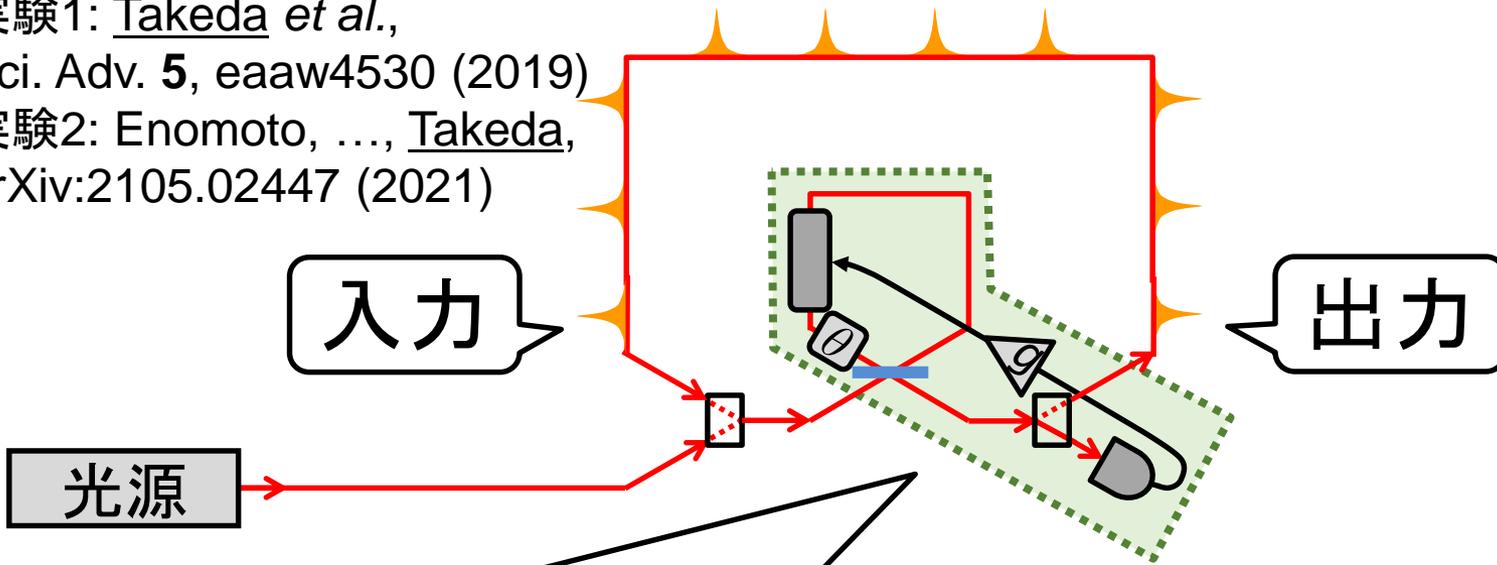


- ✓ 拡張可能性
- ✓ 汎用性
- ✓ 低開発コスト



# 大規模化へのアプローチ(ループ方式)

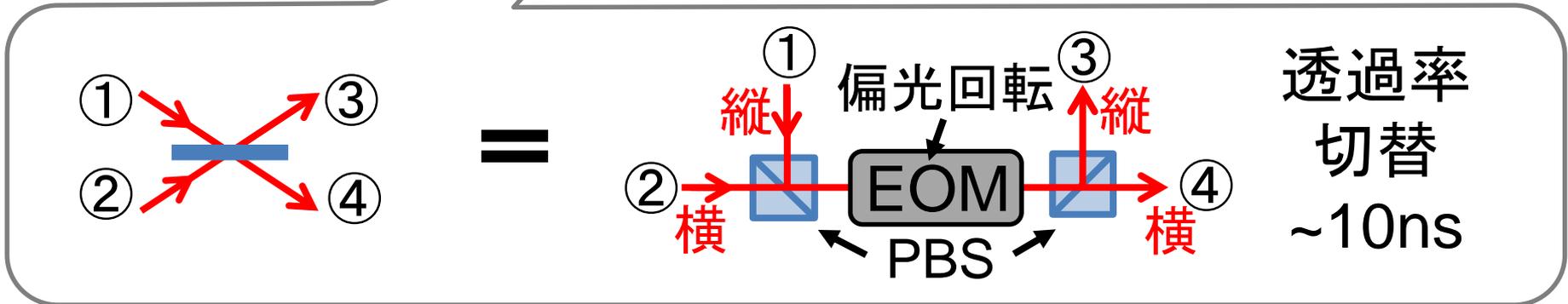
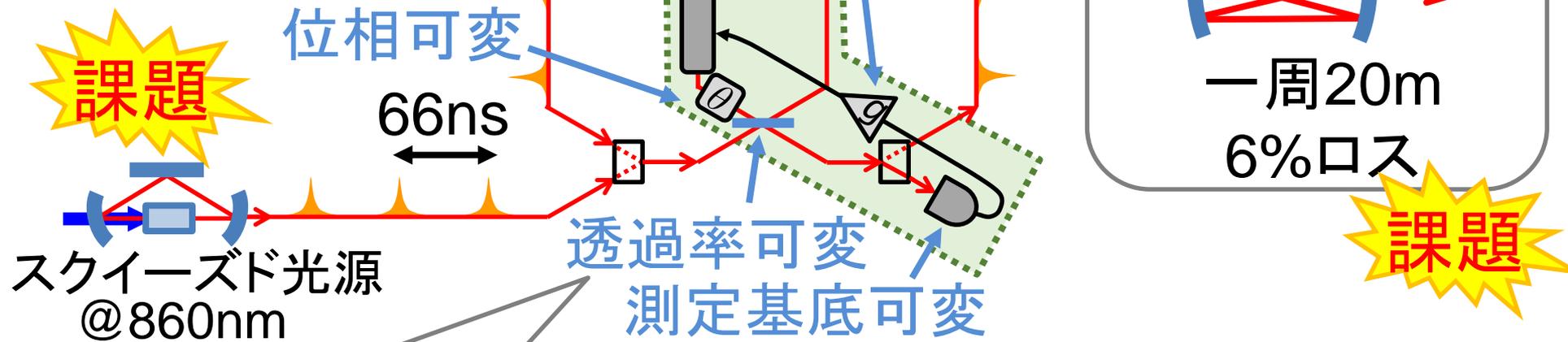
実験1: Takeda et al.,  
Sci. Adv. **5**, eaaw4530 (2019)  
実験2: Enomoto, ..., Takeda,  
arXiv:2105.02447 (2021)



最近、演算回路の**プロトタイプを開発**  
⇒ **複数種類**の演算を**何回も**繰り返せることを実証

# 大規模化へのアプローチ(ループ方式)

実験1: Takeda et al.,  
Sci. Adv. **5**, eaaw4530 (2019)  
実験2: Enomoto, ..., Takeda,  
arXiv:2105.02447 (2021)



計算に必要な演算5つのうち4つを実証(精度~90%)  
⇒ 今後ループ方式を完成させ、大規模化を目指す

# 大規模光量子コンピュータへの道のり

## 大規模光量子コンピュータ

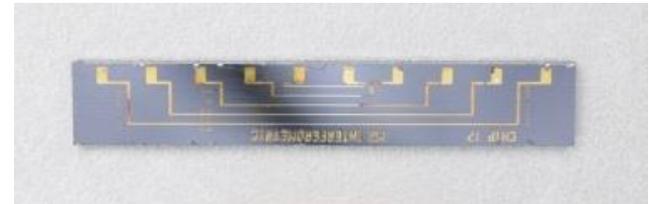
光回路高集積化・  
高クロック化による  
量子ビット数向上

効率の良い  
量子誤り訂正手法  
の考案・導入

様々な  
光の量子状態  
発生器



光回路の高品質化  
による演算精度向上



まだ1合目だが、拡張可能な道筋が見え始めた！

## 大規模光量子コンピュータ

### 量子センシング

Nature Photon.  
12, 724 (2018)

### 大容量光通信

Phys. Rev. A **58**, 146 (1998)

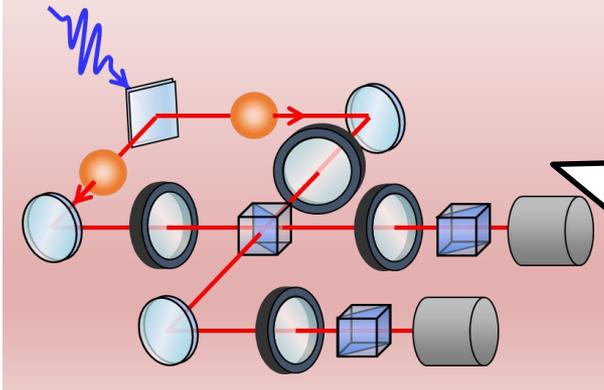
### 小規模光量子 コンピュータ向け アルゴリズム

Quantum Sci. Technol.  
5, 034010 (2020)

山登りの途中に実用的アプリケーションはないか？

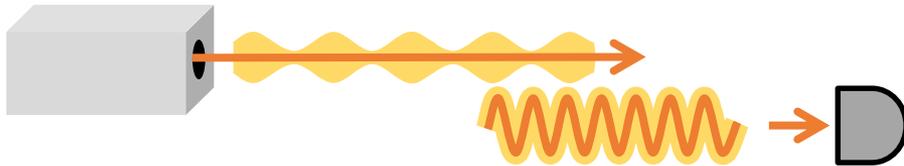
# まとめ

## 光



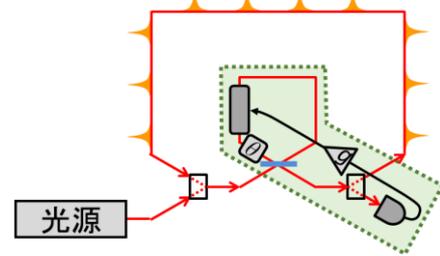
- ◎ 室温・大気中
- ◎ 光通信が可能
- ◎ 高クロック動作
- × 演算が確率的
- × 光回路の拡張性が低い

✓ 振幅・位相の自由度で  
量子ビット + 確率1の演算



Phys. Rev. A **64**, 012310 (2001)  
Phys. Rev. A **71**, 042308 (2005)  
Phys. Rev. A **93**, 022301 (2016)

✓ 拡張性の高い回路



Phys. Rev. Lett. **119**, 120504 (2017)  
Sci. Adv. **5**, eaaw4530 (2019)  
arXiv:2105.02447 (2021)

参考：東大武田研Webサイトで講義動画・書籍を紹介