

光量子コンピュータの 現状と展望

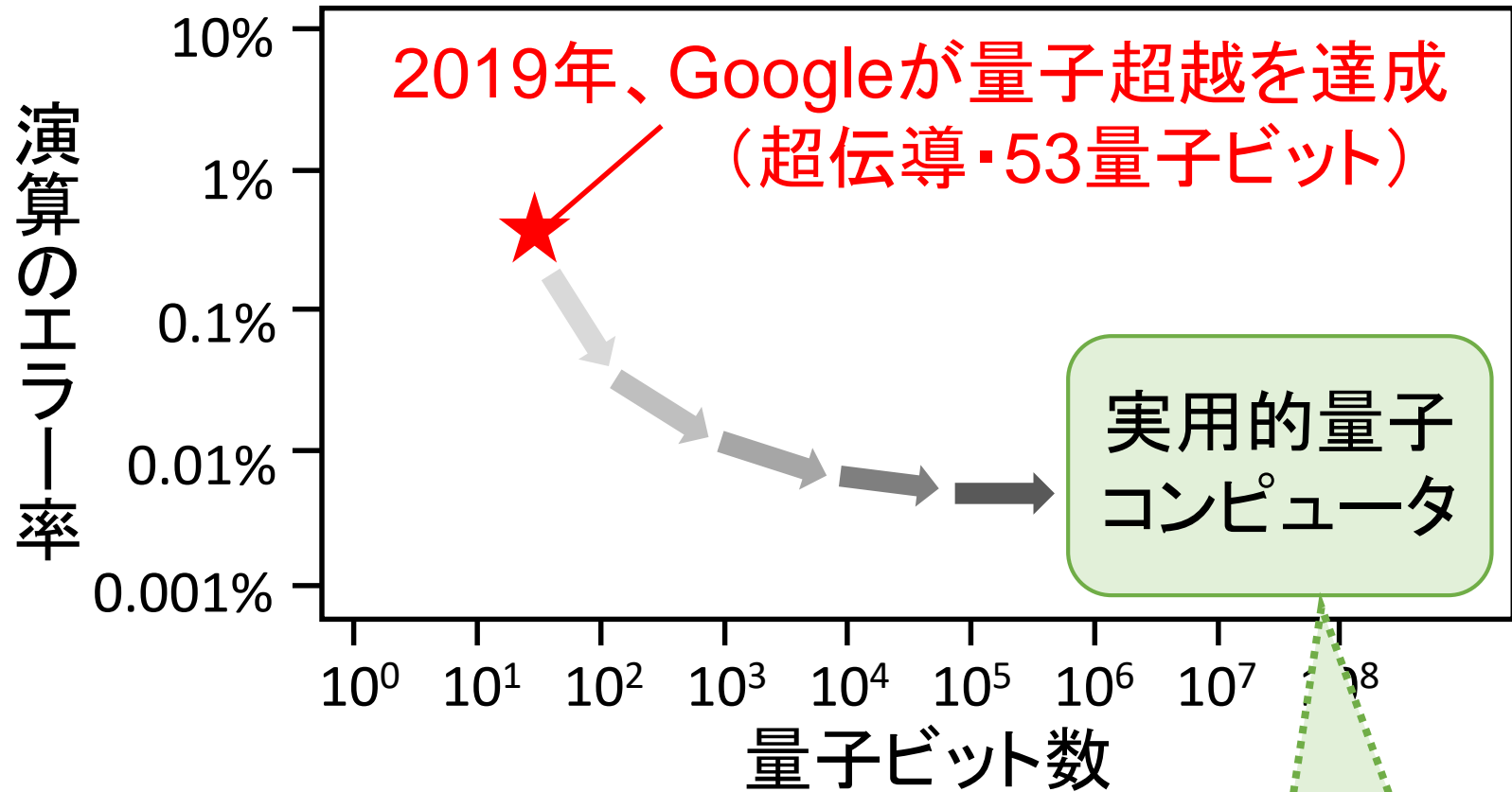
武田俊太郎

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



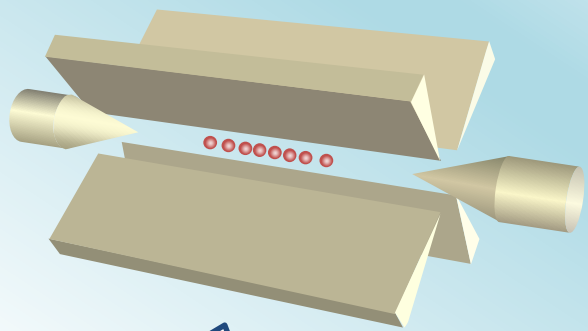
例：2048ビットの自然数の素因数分解 [arXiv:1905.09749](https://arxiv.org/abs/1905.09749)

- ・エラー0.1%、 2×10^7 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

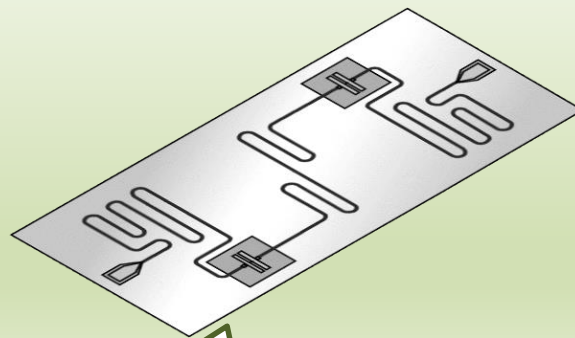
なぜ我々は光で量子コンピュータを作りたいか？

イオン



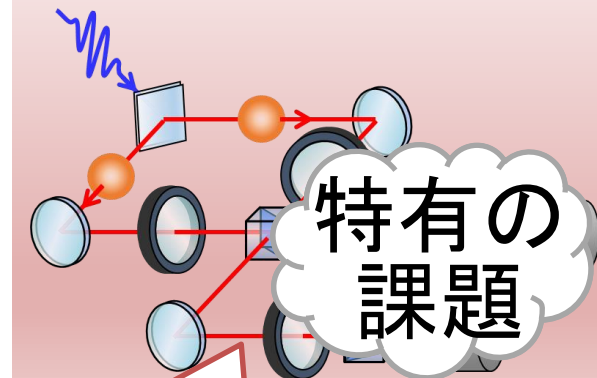
× 真空装置中

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

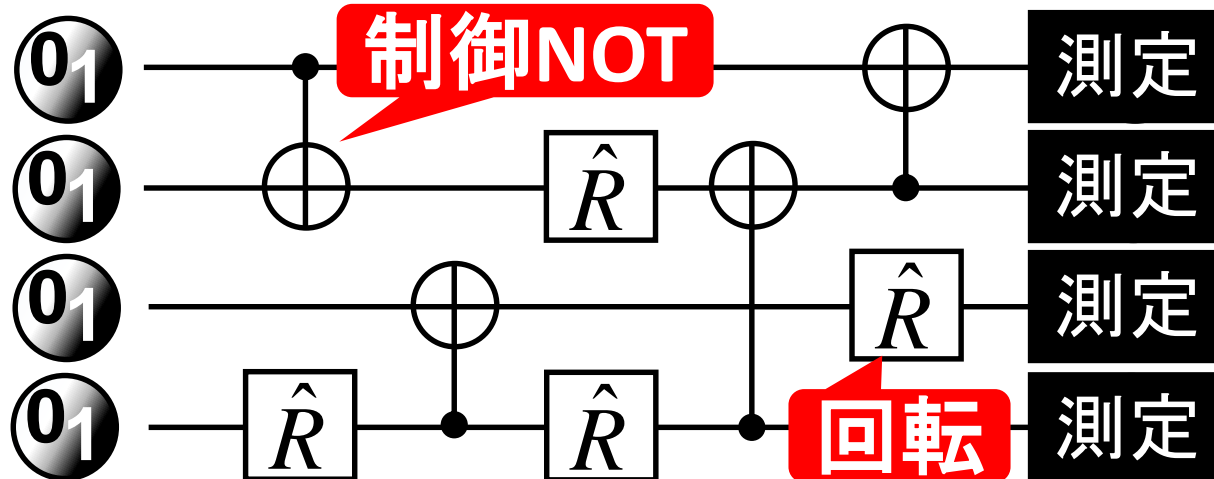
光量子コンピュータの 現状と展望

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

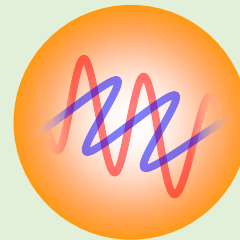
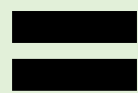


3. 計算結果読み出し

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



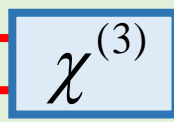
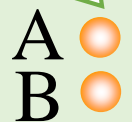
0・1の重ね合わせ

縦・横偏光の重ね合わせ

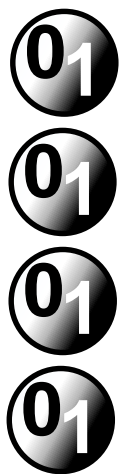
3次の非線形光学効果

光子A入射

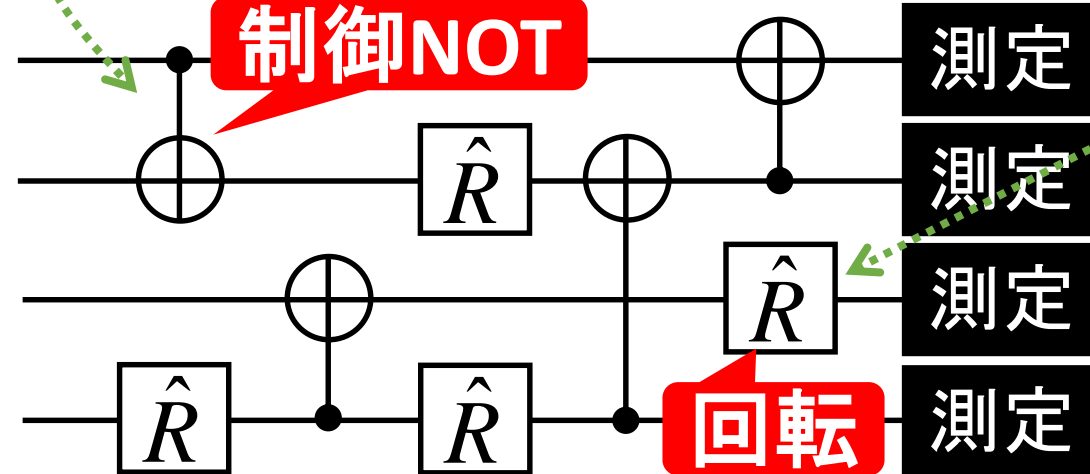
屈折率変化



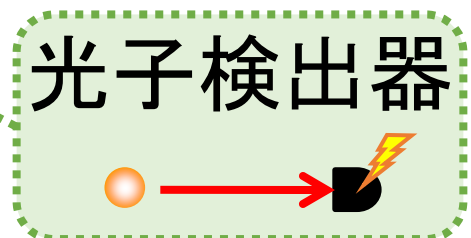
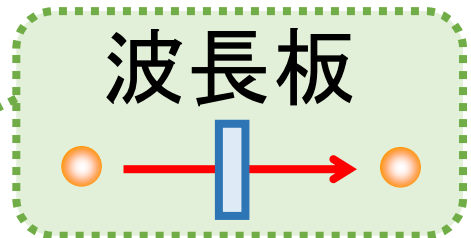
光子B偏光が変化



制御NOT



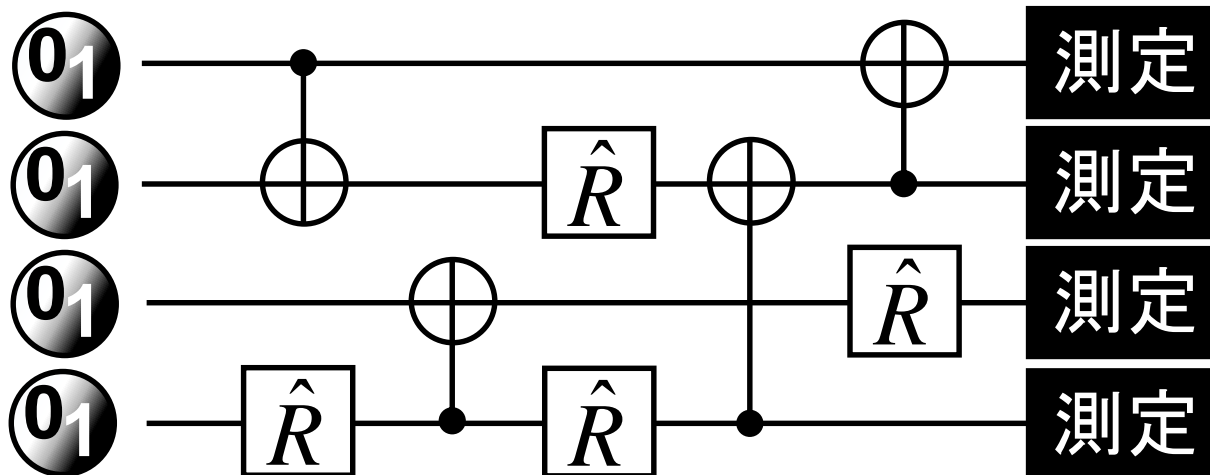
回転



光量子コンピュータの典型的な作り方

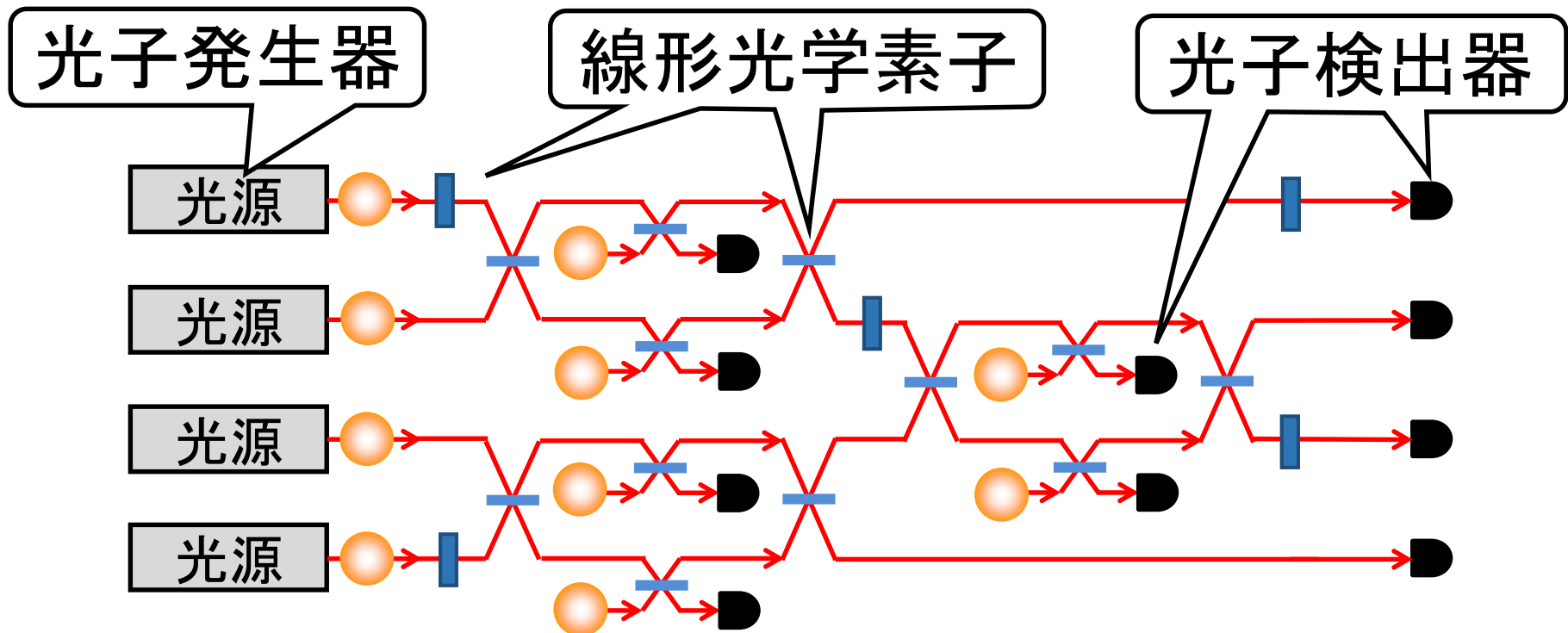
2001年 線形光学素子のみでの光量子計算の提案

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

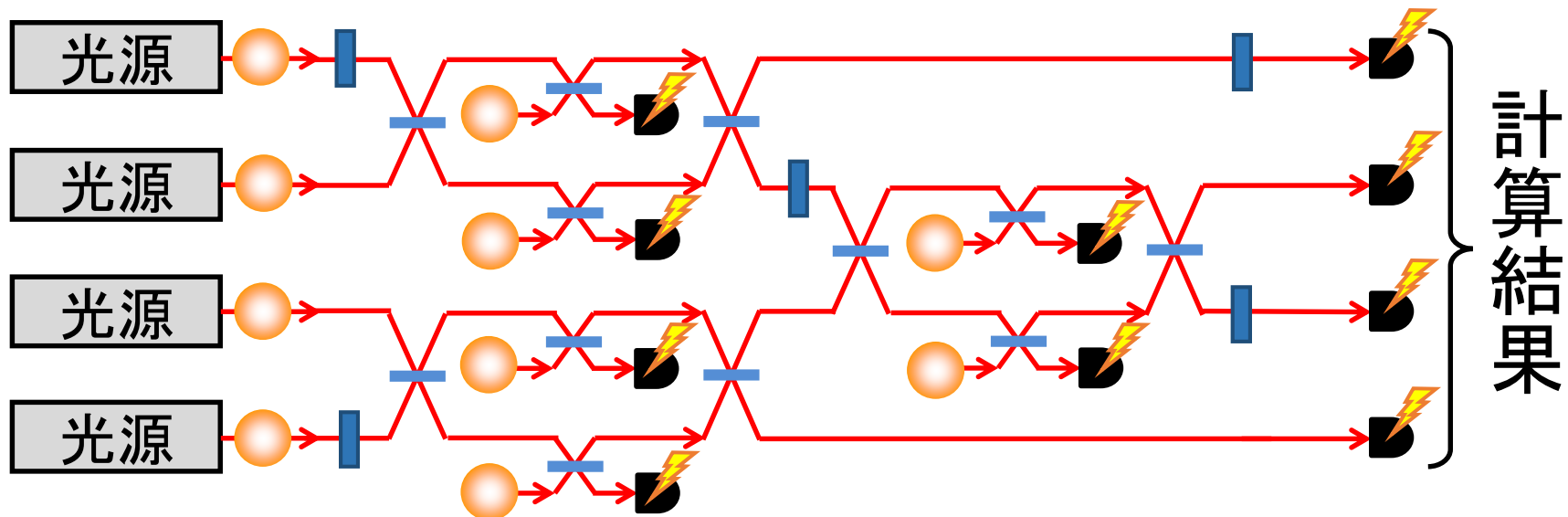
E. Knill, R. Laflamme, G. Milburn, Nature 409, 46 (2001)



2001年 線形光学素子のみでの光量子計算の提案

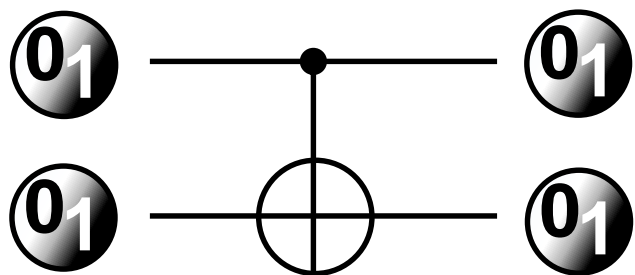
E. Knill, R. Laflamme, G. Milburn, Nature 409, 46 (2001)

光回路で計算

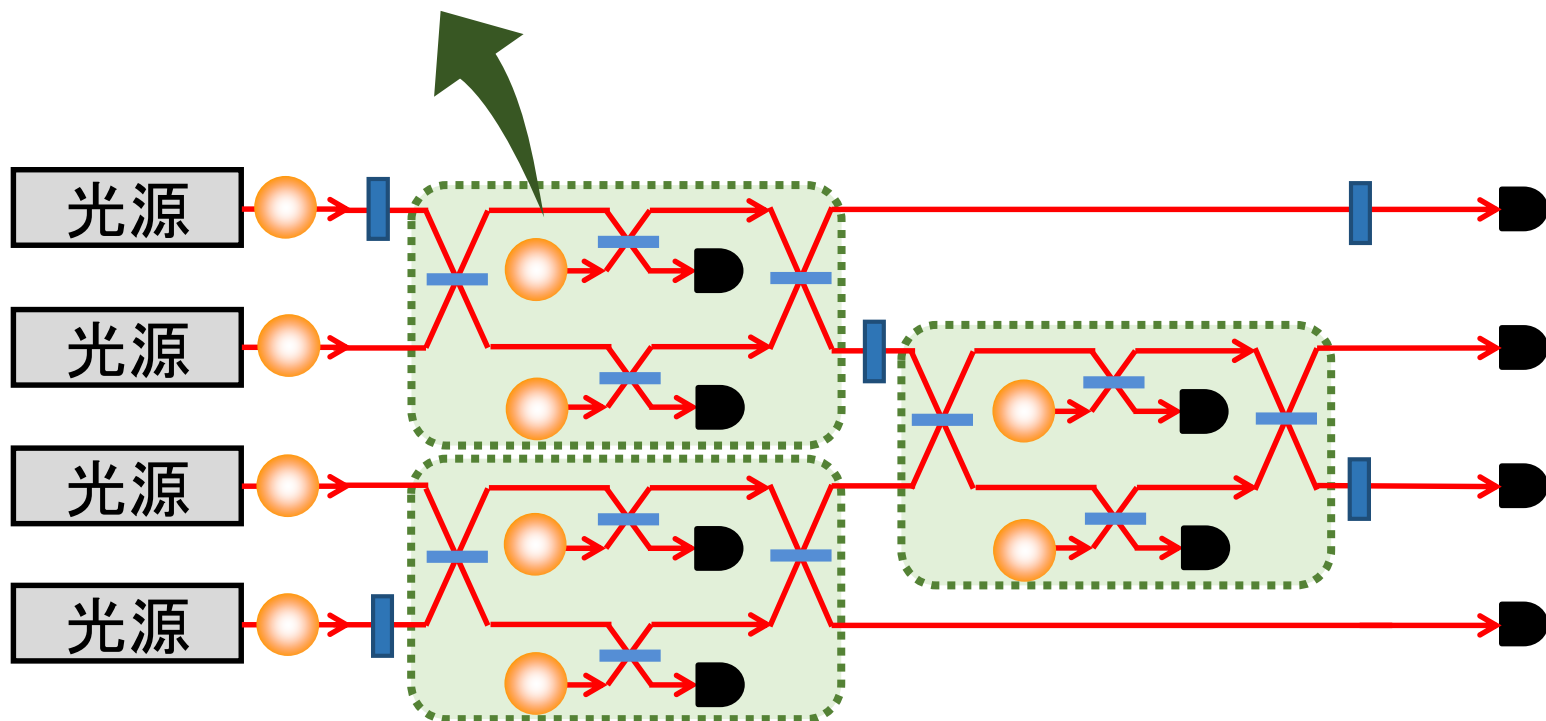


光量子コンピュータの典型的な作り方

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)

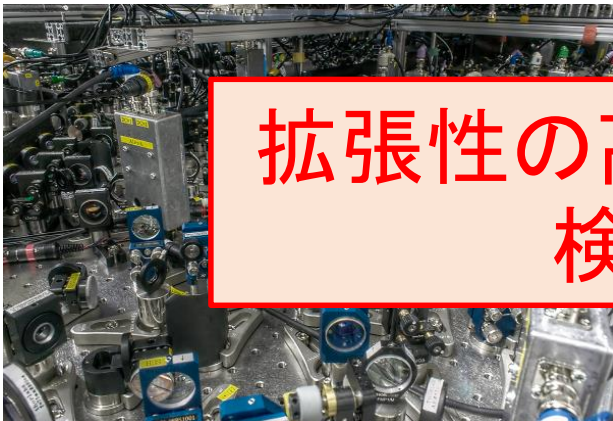
小規模アルゴリズム実装

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

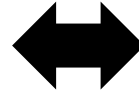
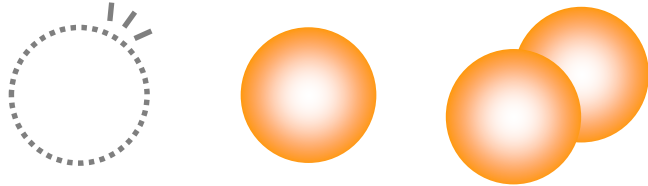
1チップに550個以上の素子
Science **360**, 285 (2018)

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

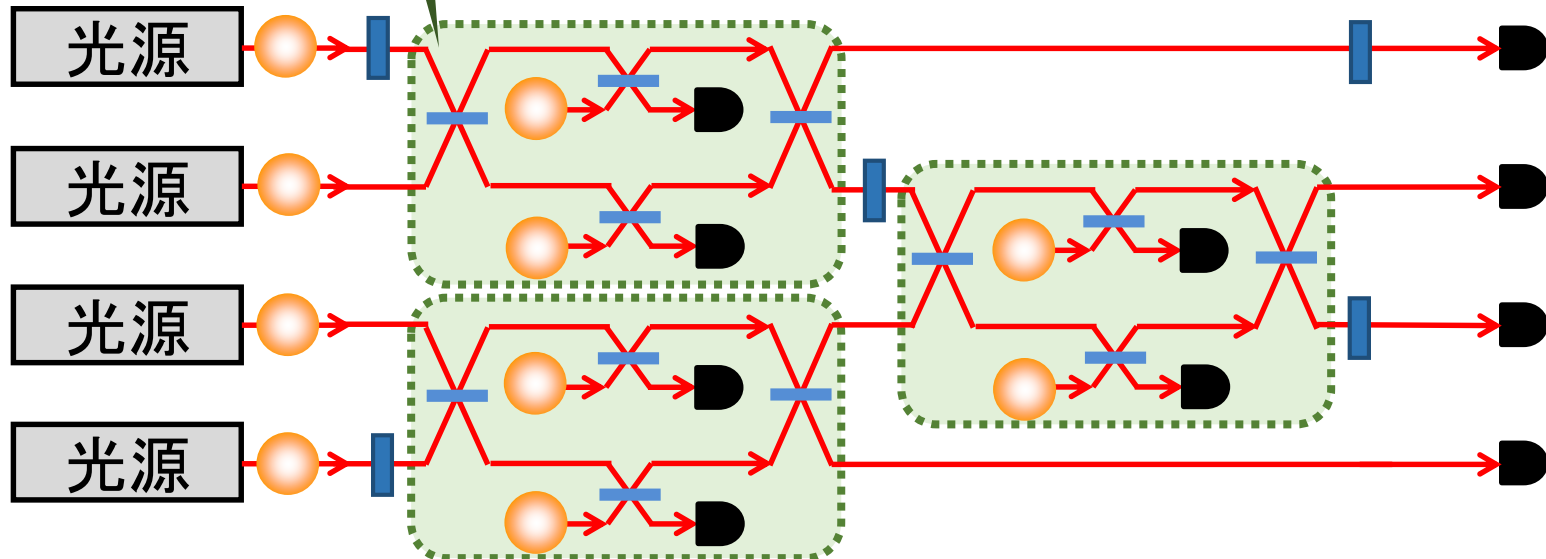
光の粒子性



光の波動性

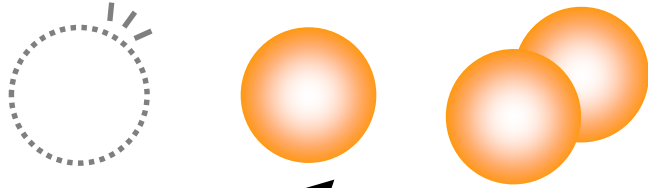


2量子ビット演算が確率的



展望1: 確率的な演算を克服する

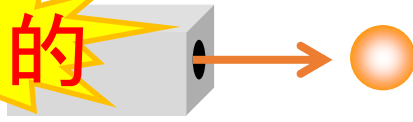
光の粒子性



光子の数に着目
(離散量)

・単一光子源

確率的



・光子検出器



低効率

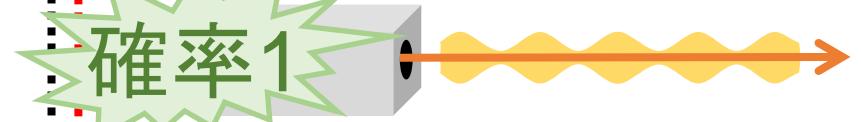
光の波動性



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

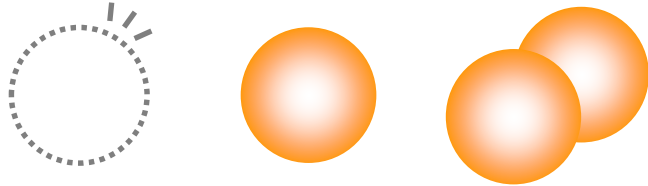


高効率

これ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



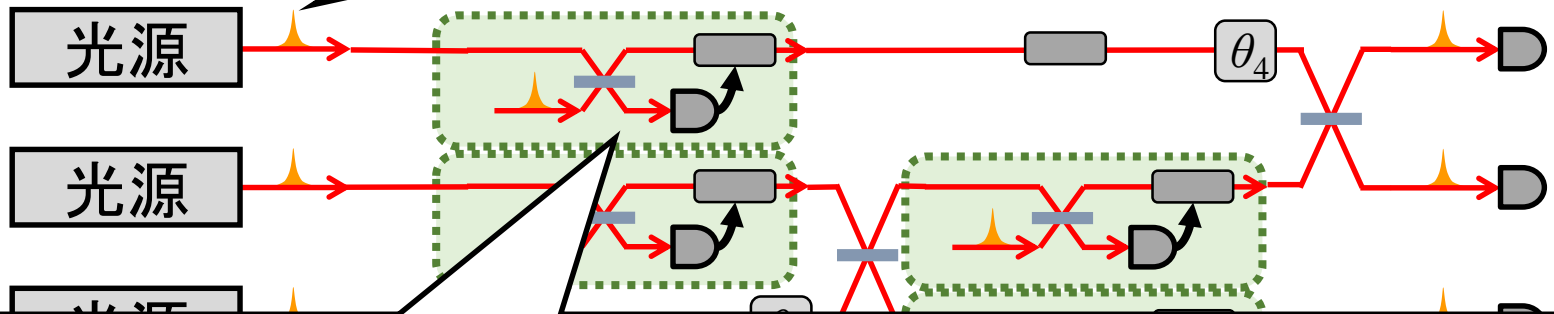
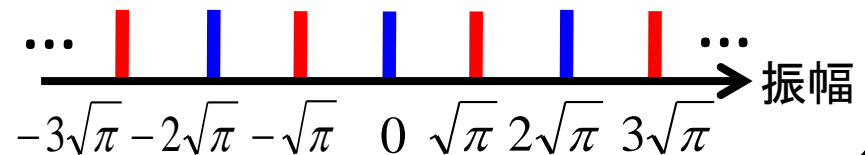
光の波動性



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)



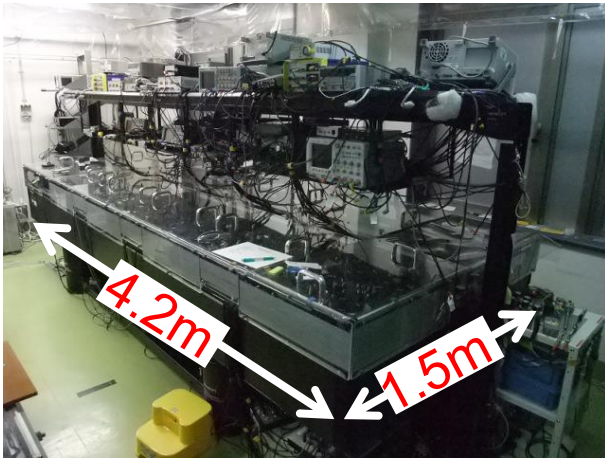
振幅・位相(連続量)の制御技術を用いた演算回路

⇒ 測定誘起の手法で**非線形な演算も確率1で可能**

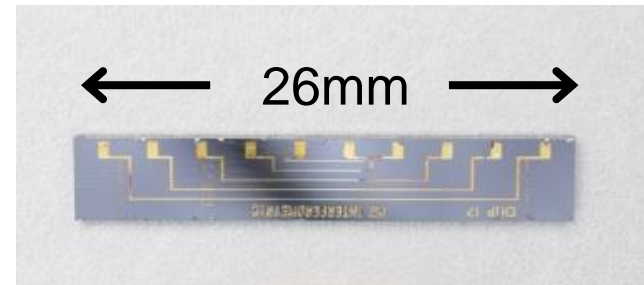
例: Phys. Rev. A **71**, 042308 (2005); Phys. Rev. A **93**, 022301 (2016)

展望2: 光回路の拡張性を高める

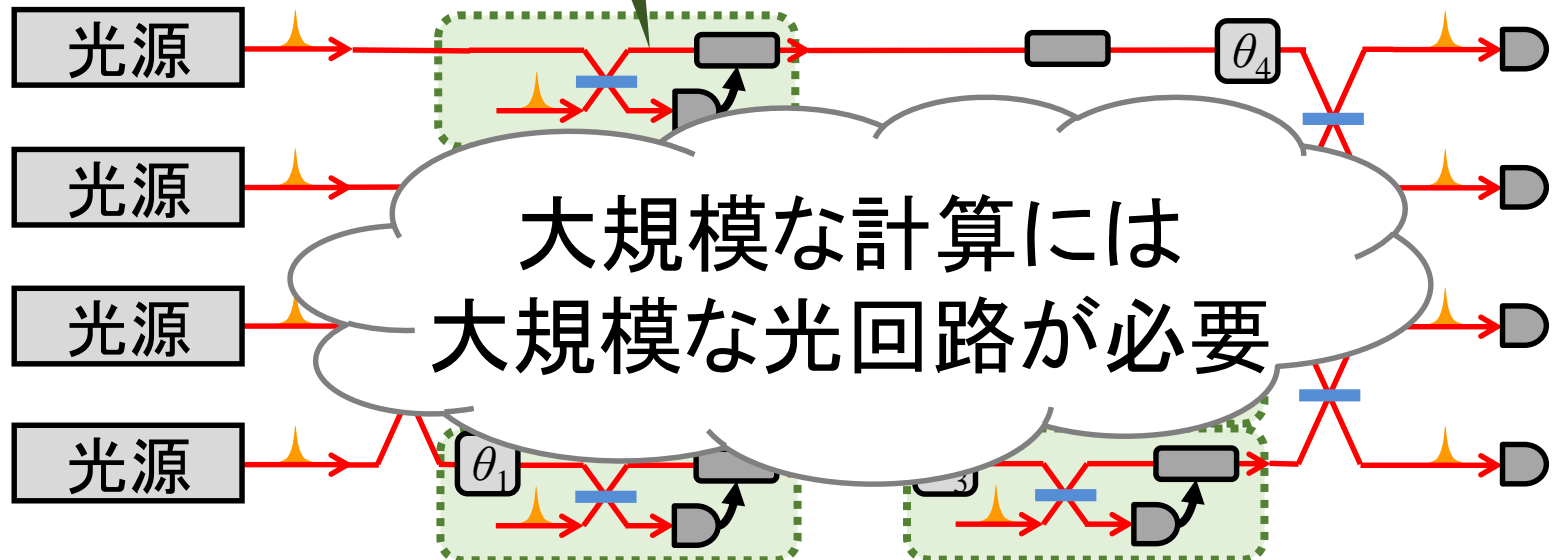
光学テーブル



光導波路チップ



Nat. Photon. 11, 447 (2017)

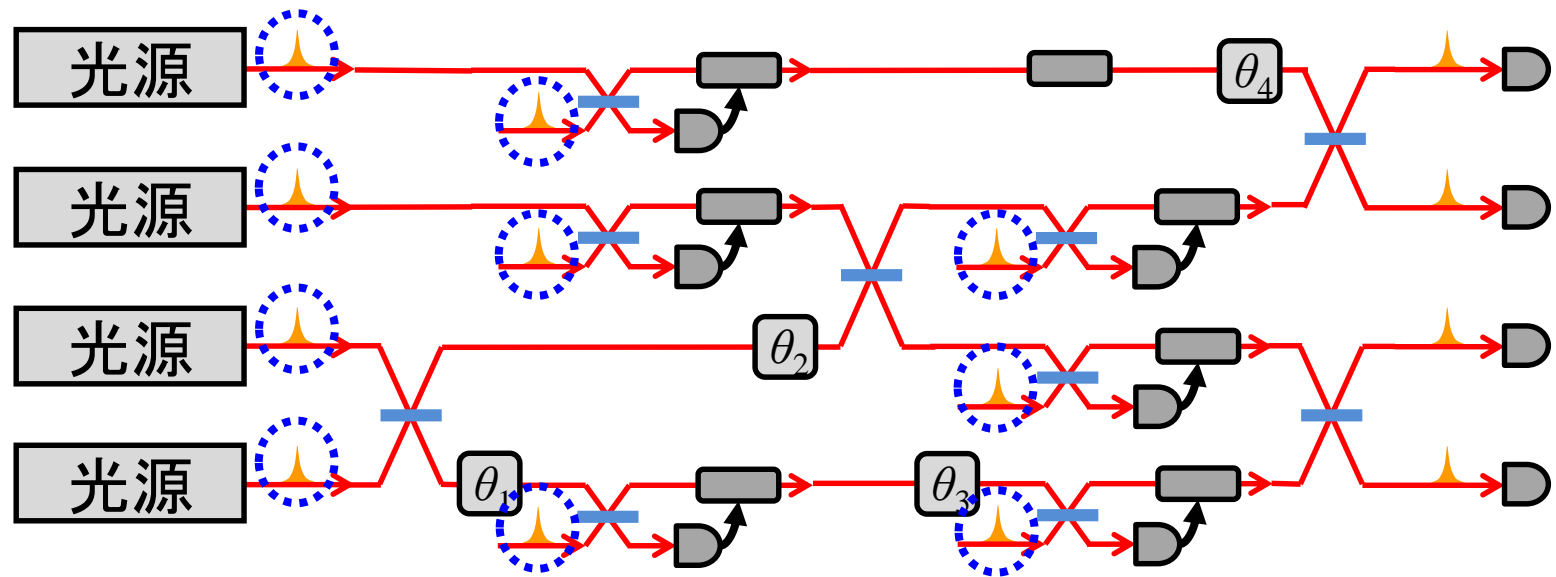
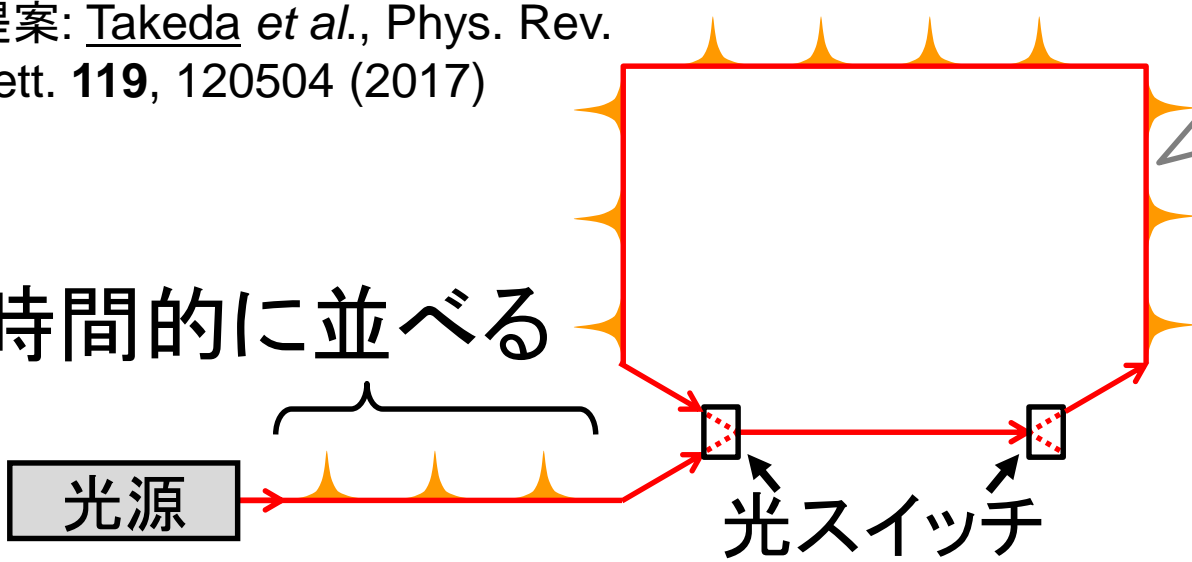


大規模化へのアプローチ(ループ方式)

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

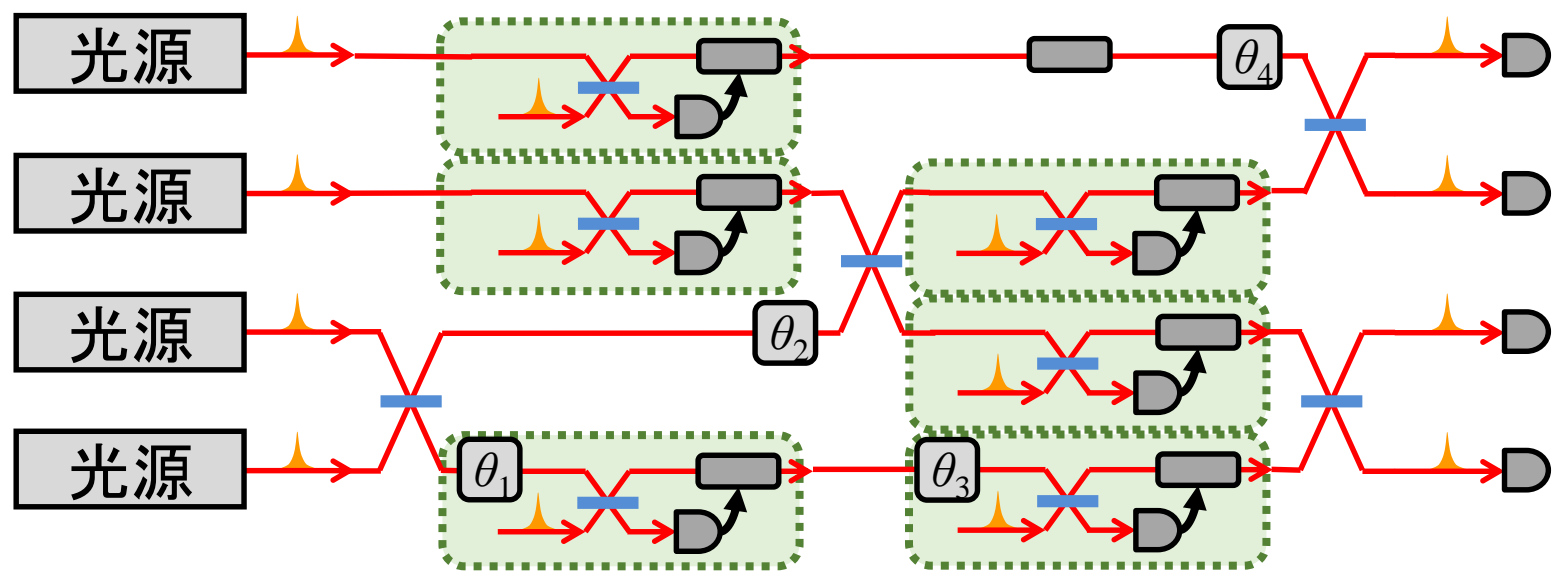
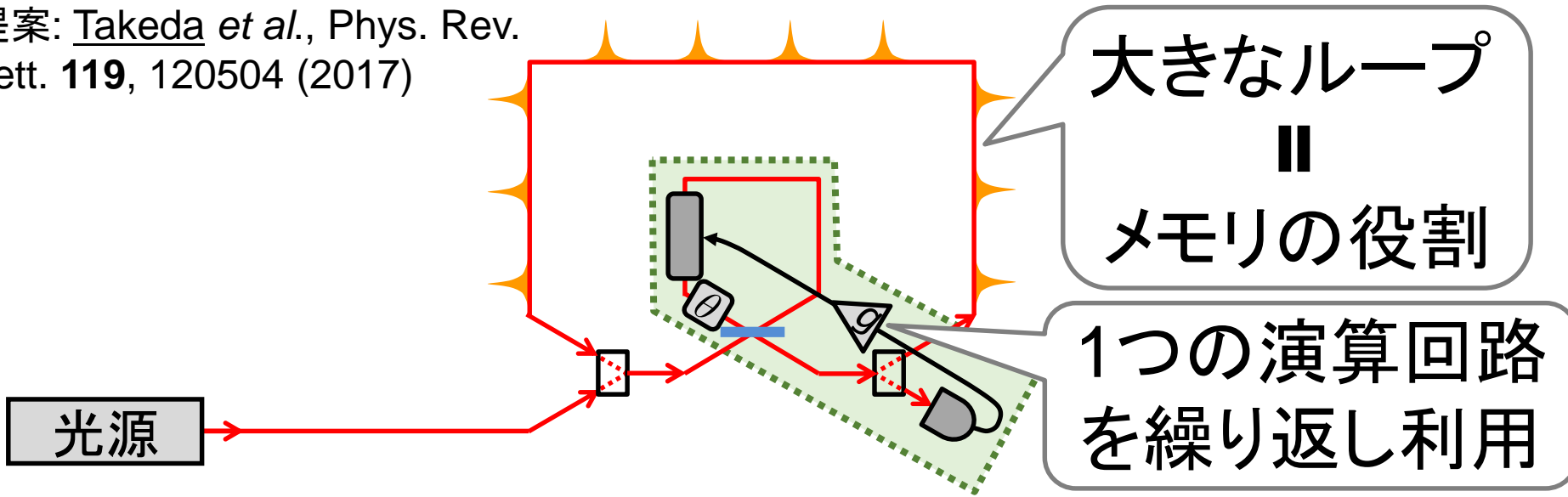
大きなループ
||
メモリの役割

時間的に並べる



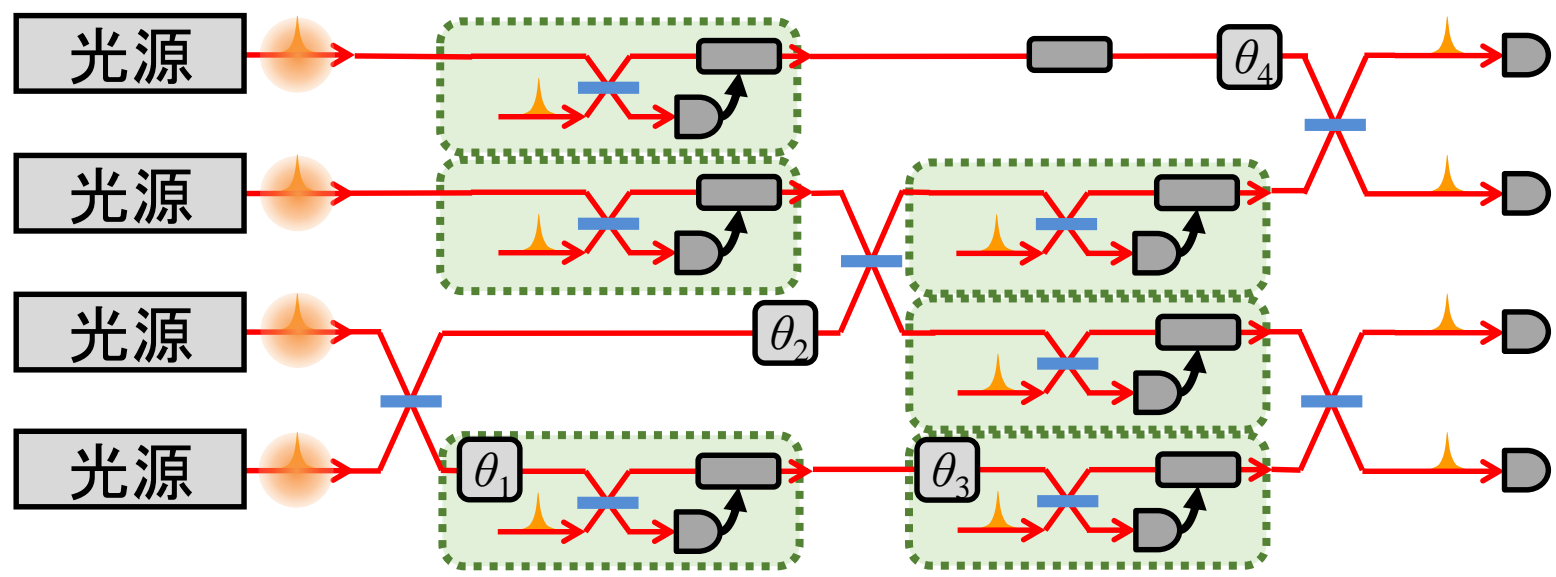
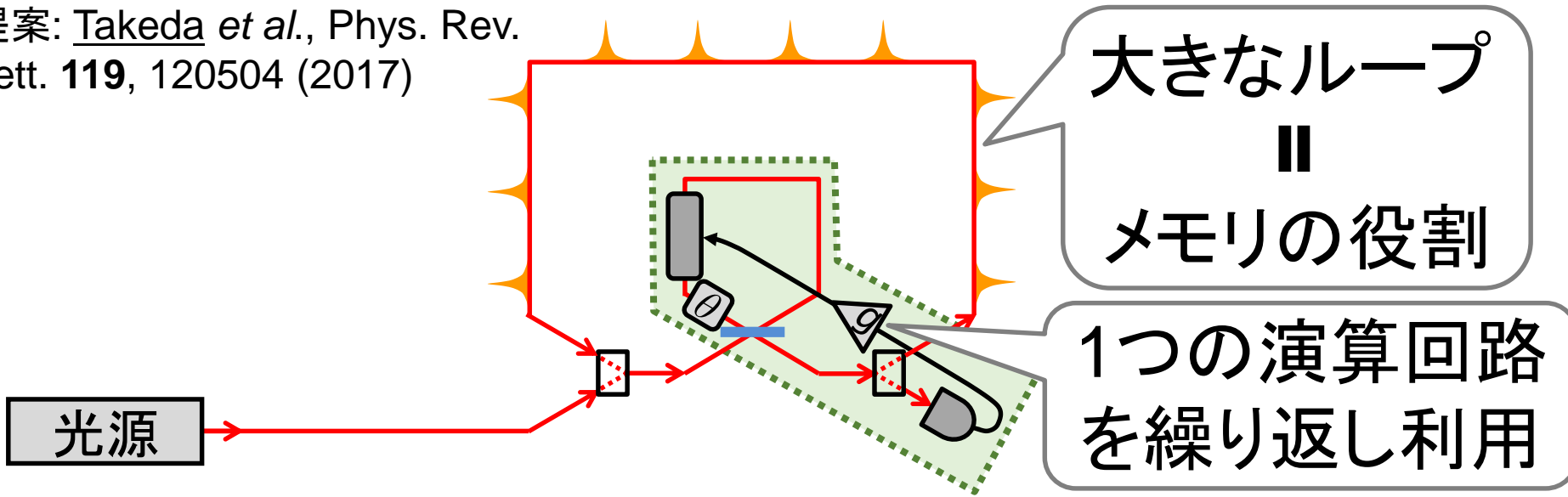
大規模化へのアプローチ(ループ方式)

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



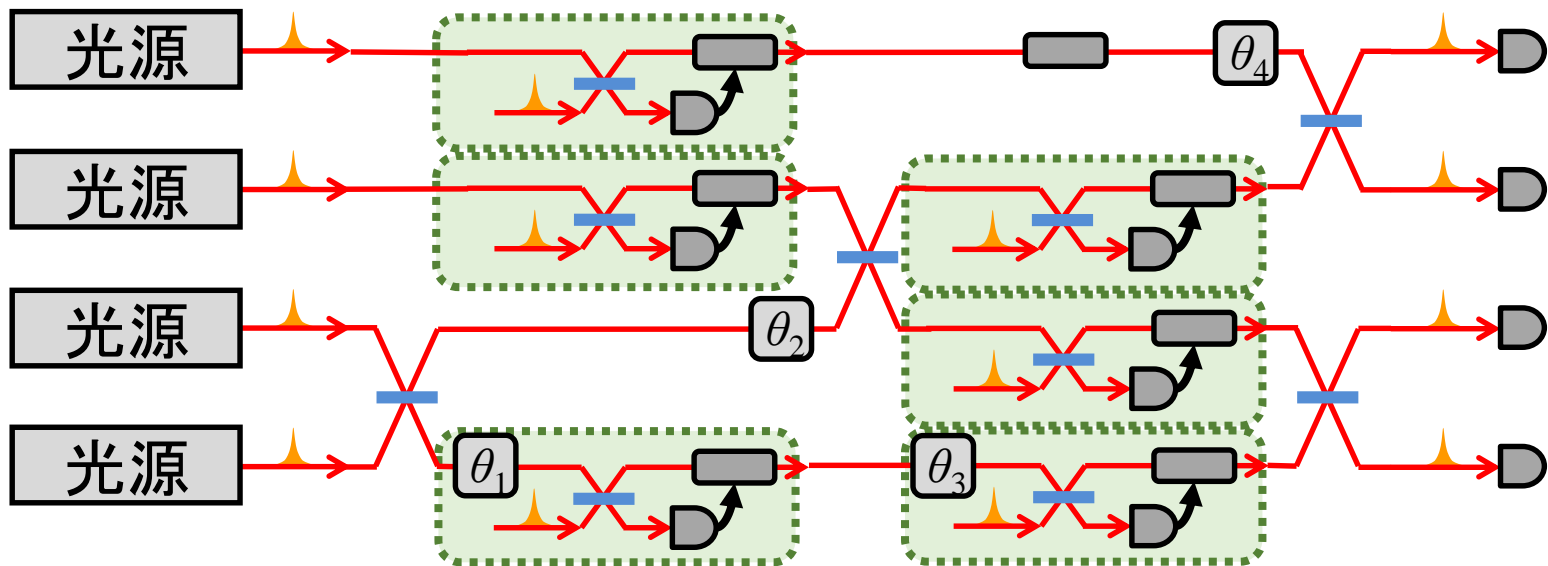
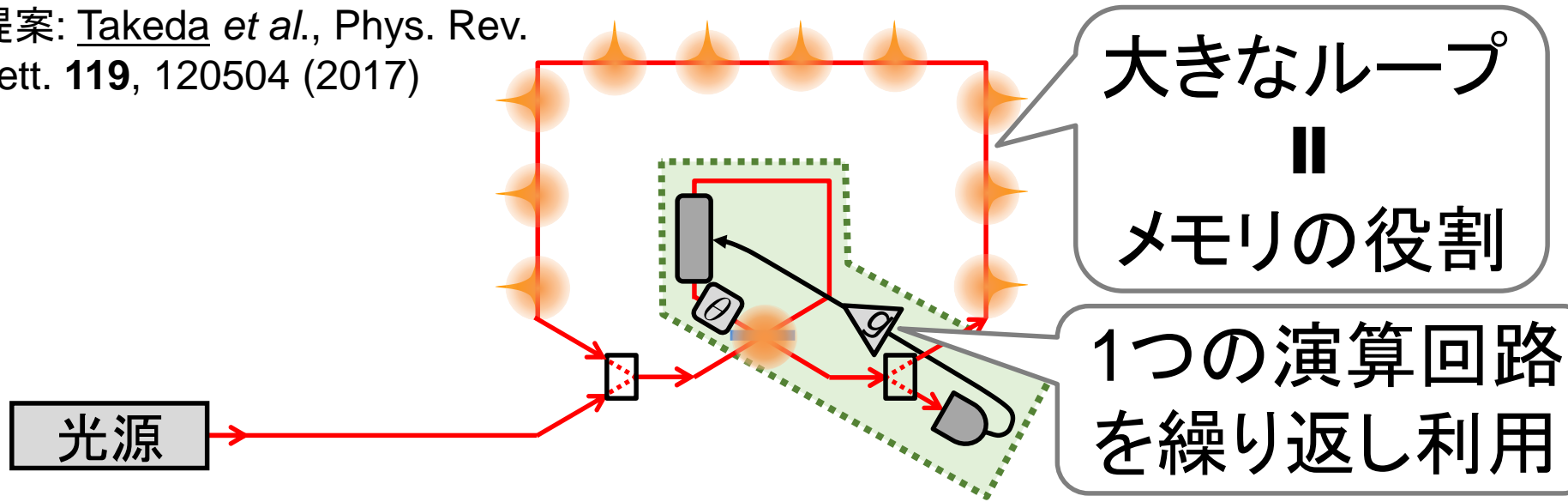
大規模化へのアプローチ(ループ方式)

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



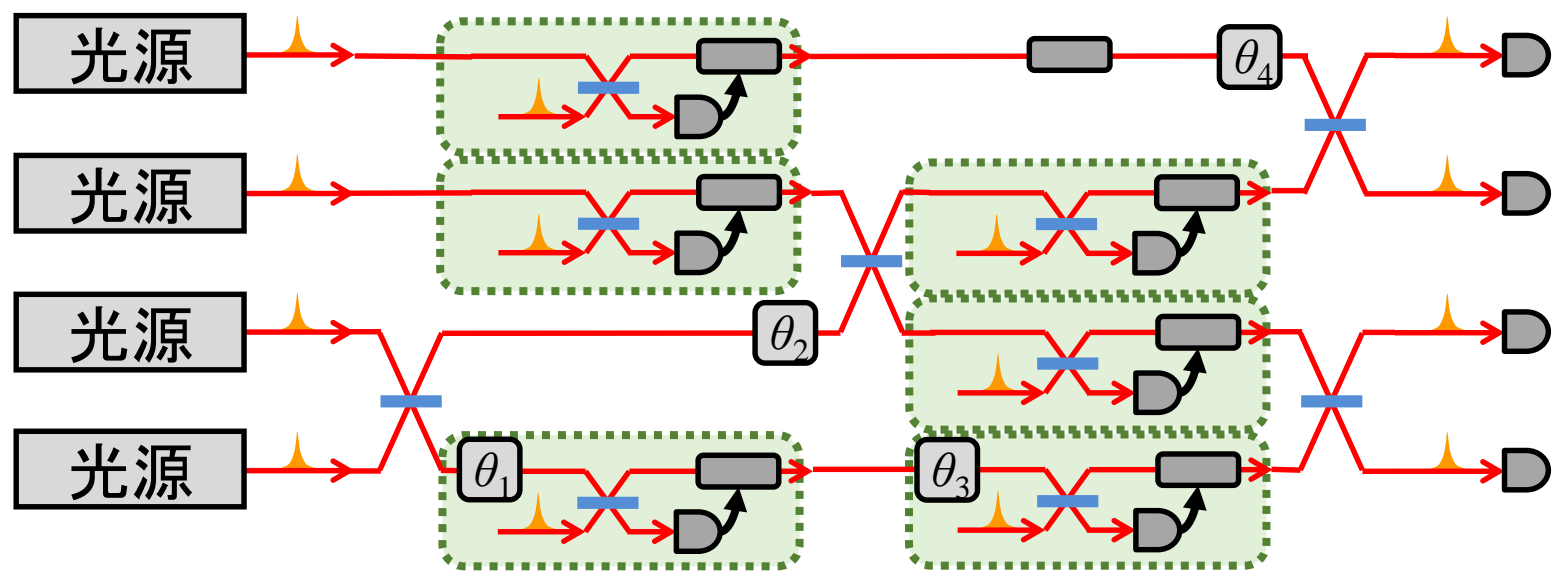
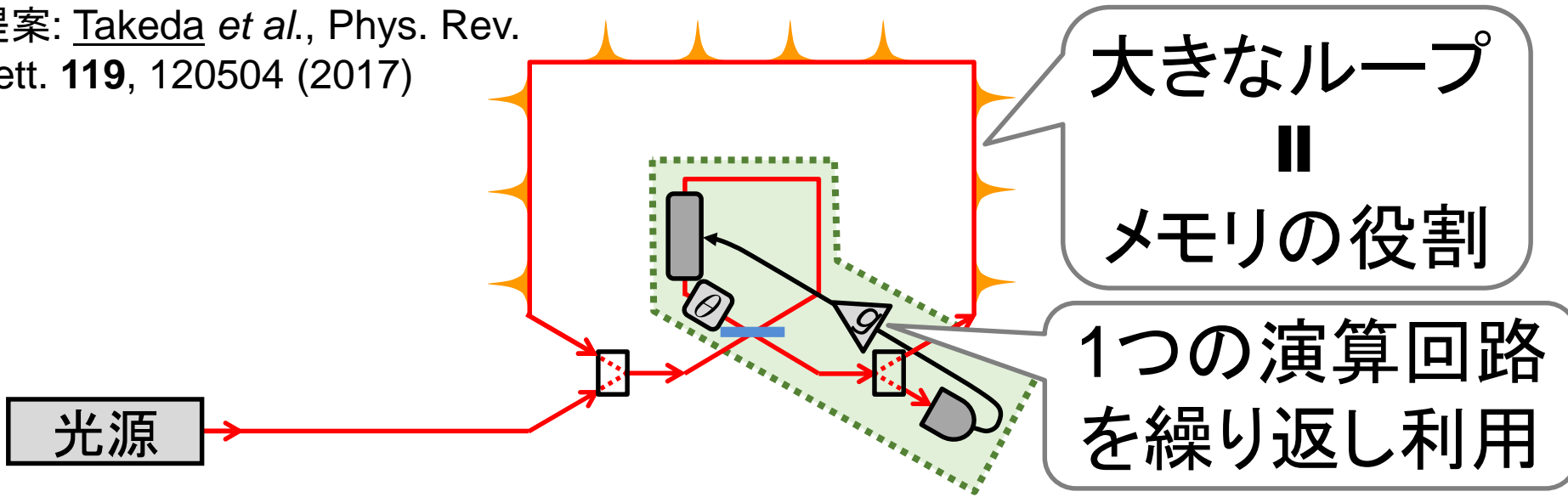
大規模化へのアプローチ(ループ方式)

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



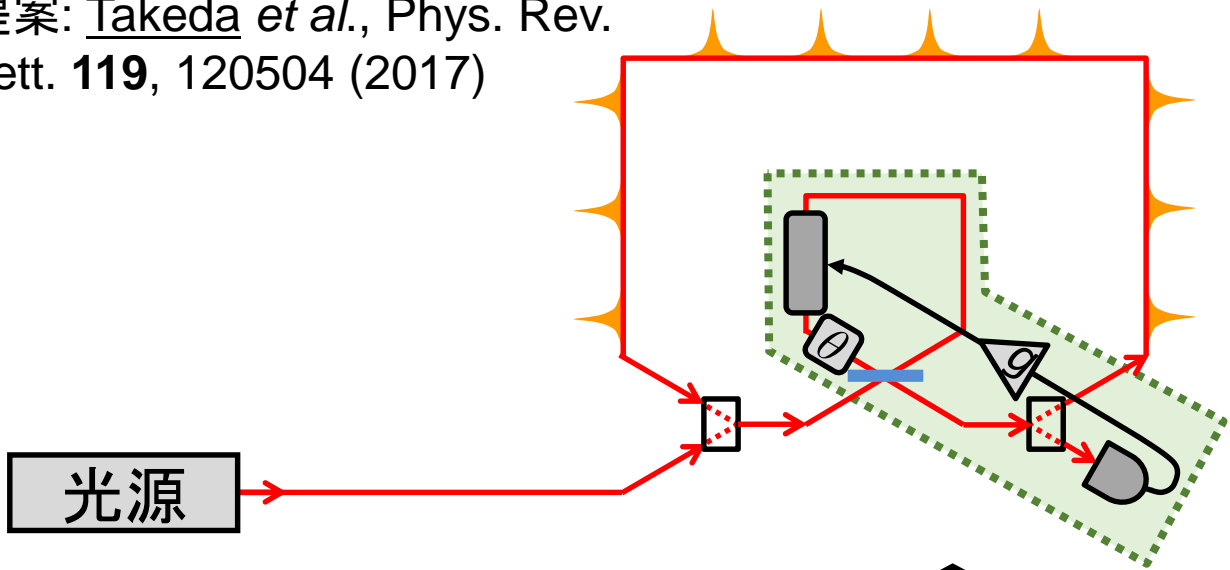
大規模化へのアプローチ(ループ方式)

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

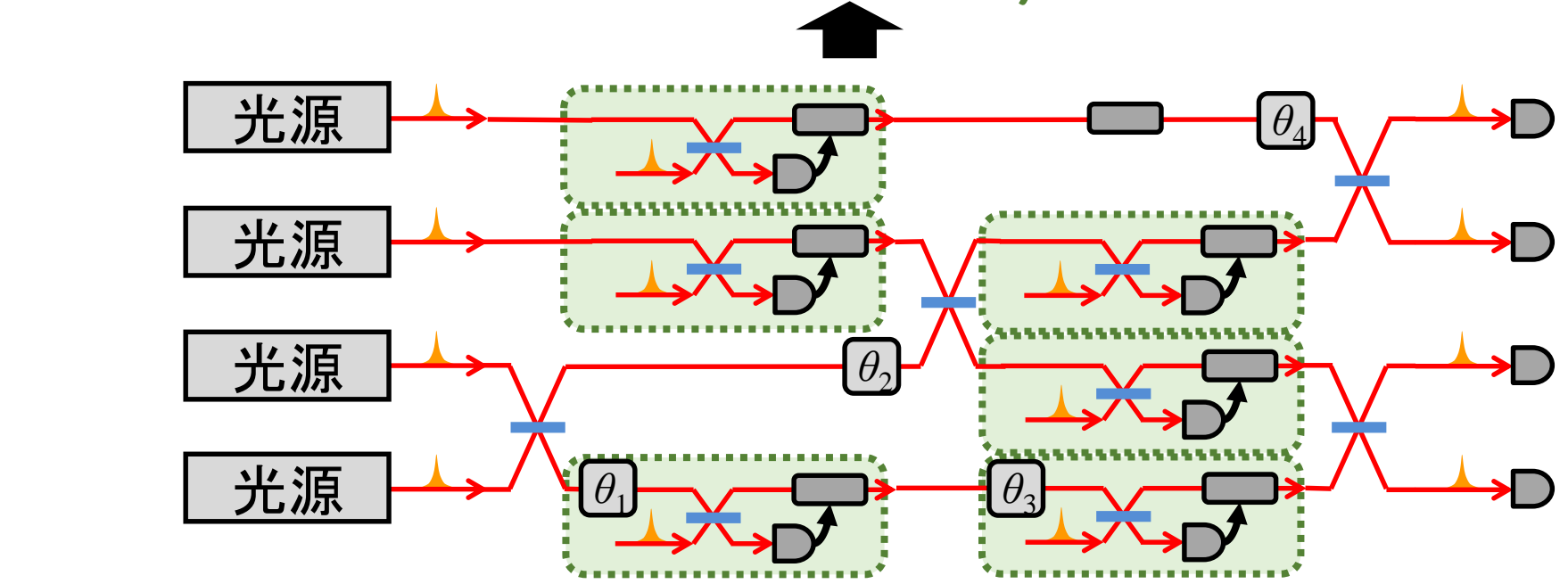


大規模化へのアプローチ(ループ方式)

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

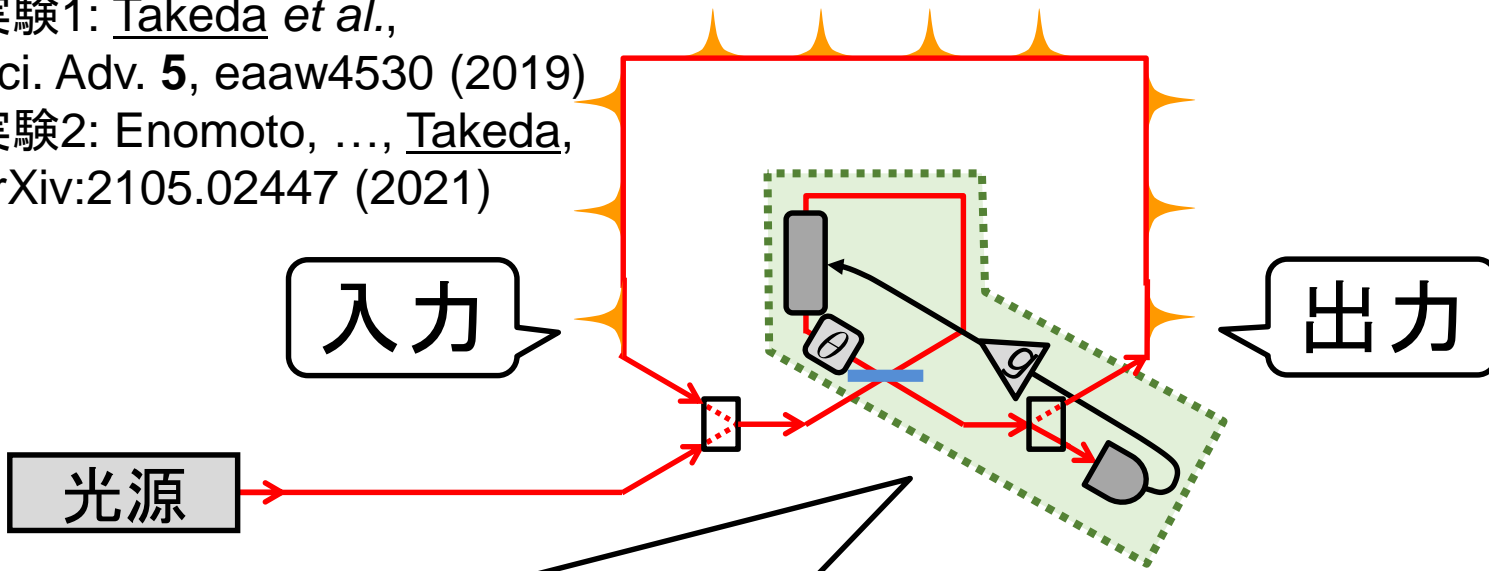


- ✓ 拡張可能性
- ✓ 汎用性
- ✓ 低開発コスト



大規模化へのアプローチ(ループ方式)

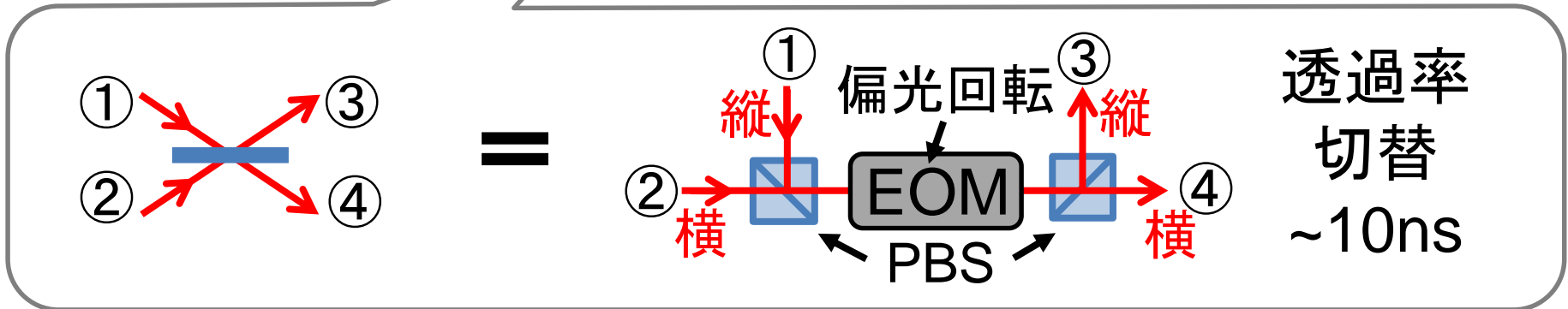
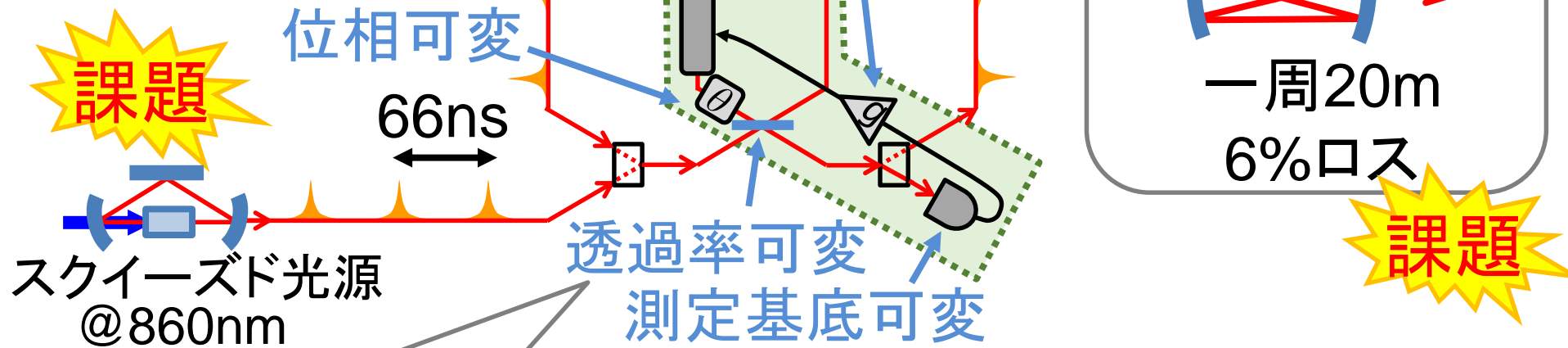
実験1: Takeda et al.,
Sci. Adv. **5**, eaaw4530 (2019)
実験2: Enomoto, ..., Takeda,
arXiv:2105.02447 (2021)



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

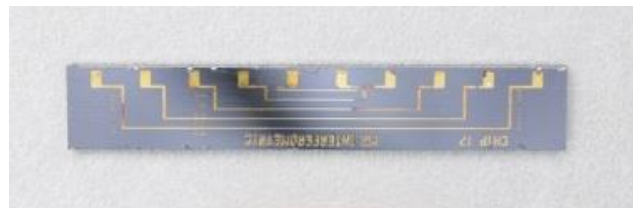
光回路高集積化・
高クロック化による
量子ビット数向上

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への道のり

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)

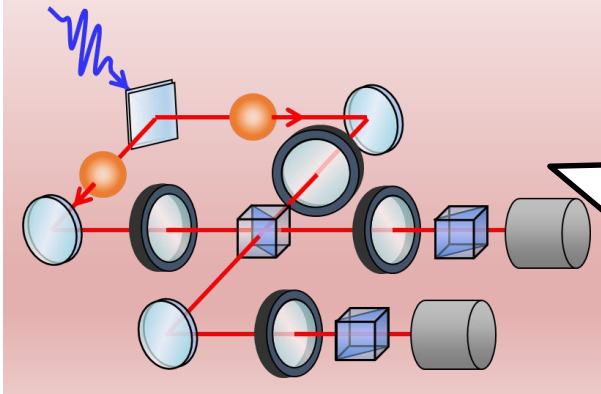
小規模光量子 コンピュータ向け アルゴリズム

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？

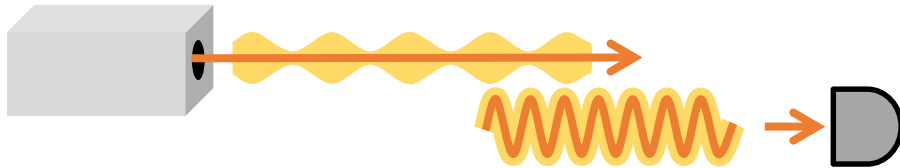
まとめ

光



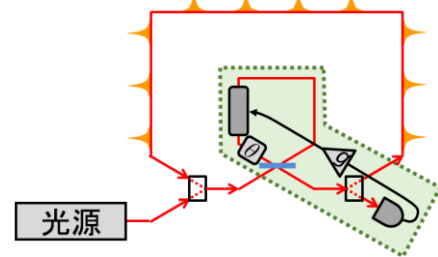
- ◎ 室温・大気中
- ◎ 光通信が可能
- ◎ 高クロック動作
- × 演算が確率的
- × 光回路の拡張性が低い

✓ 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