

大規模な光量子コンピュータを いかに実現するか

武田 俊太郎

東京大学 大学院工学系研究科
JST さきがけ

大規模な光量子コンピュータを いかに実現するか

1. イントロダクション

2. ハイブリッド量子情報処理

3. ループ型光量子プロセッサ

4. まとめ

イントロダクション

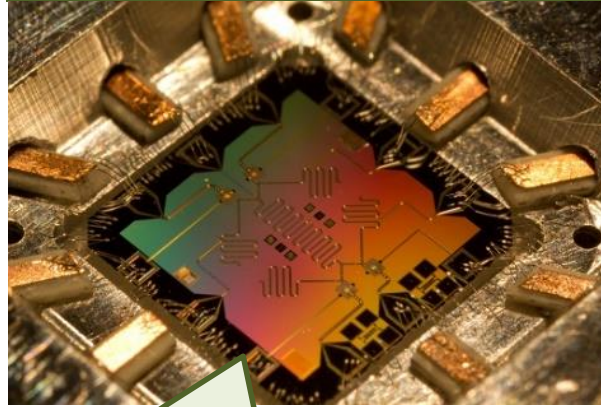
様々な方式の量子コンピュータ

原子・イオン



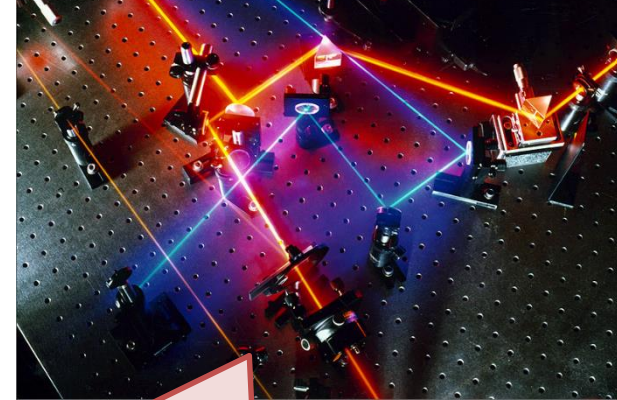
× 真空装置中

超伝導回路



× 冷却装置中

光



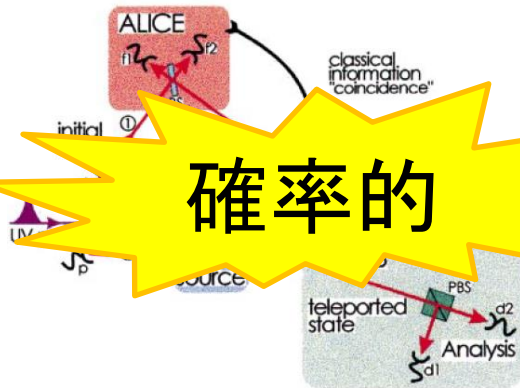
◎ 室温・大気中
◎ 光通信が可能

大規模光量子コンピュータへ向けた課題

1. 光量子ビットの操作が低効率

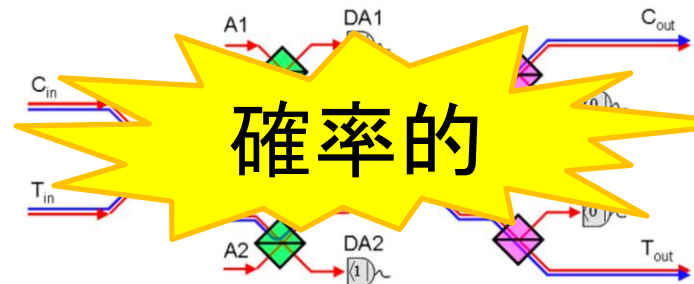
イントロダクション

量子テレポーテーション



Nature **390**,
5751 (1997)

2ビット量子ゲート



PNAS **108**, 10067 (2011)

量子エラー訂正

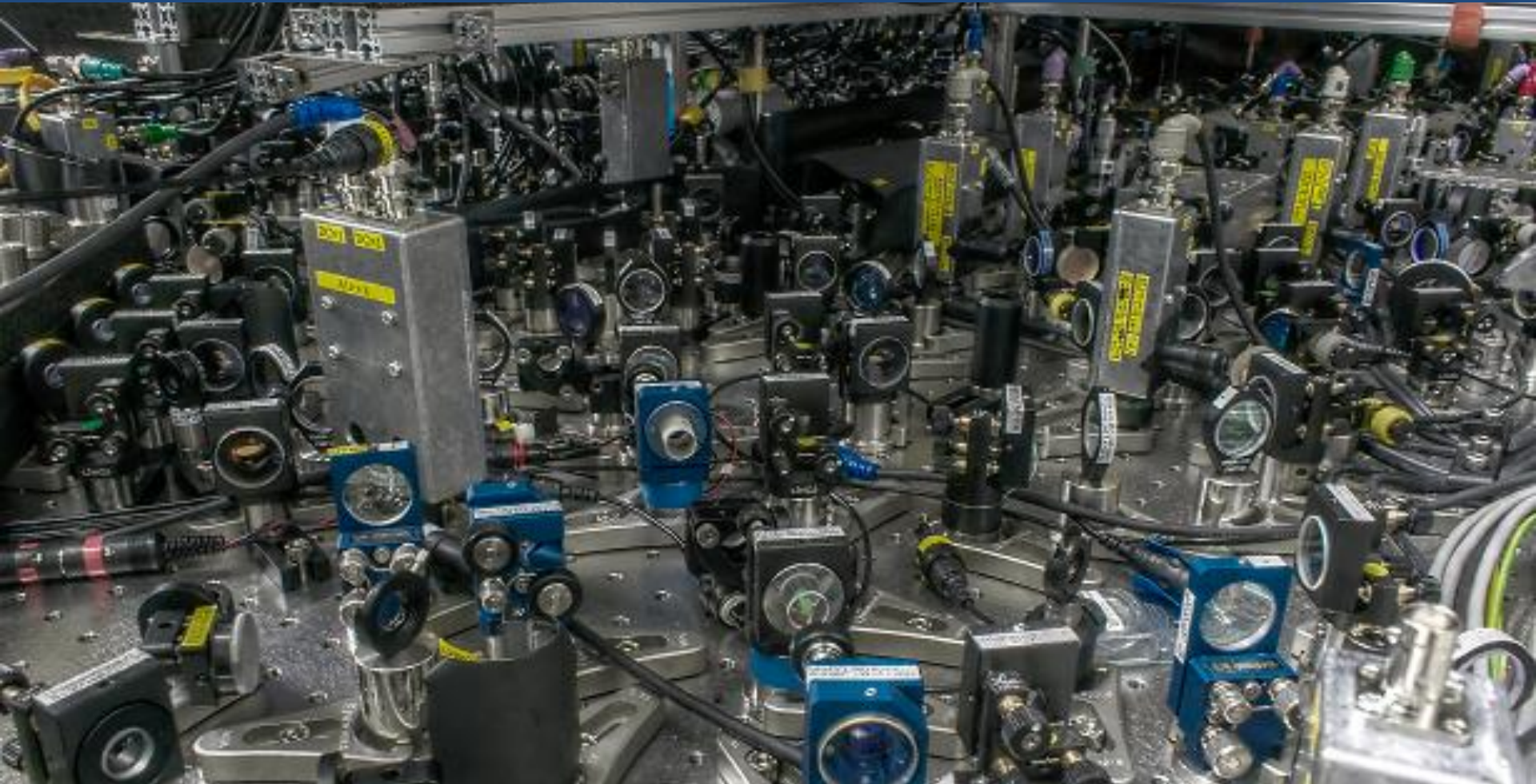
Nature **482**, 489 (2012)



大規模光量子コンピュータへ向けた課題

1. 光量子ビットの操作が低効率

イントロダクション



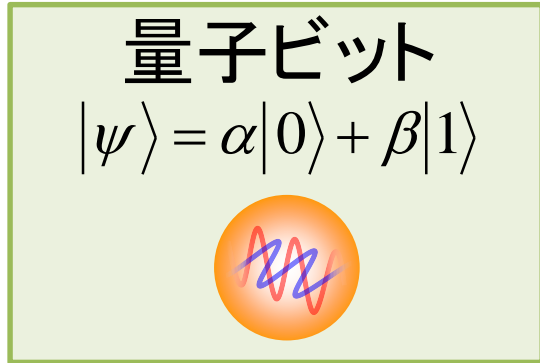
大規模光量子コンピュータへ向けた課題

1. 光量子ビットの操作が低効率
2. 光回路が拡張性に乏しい

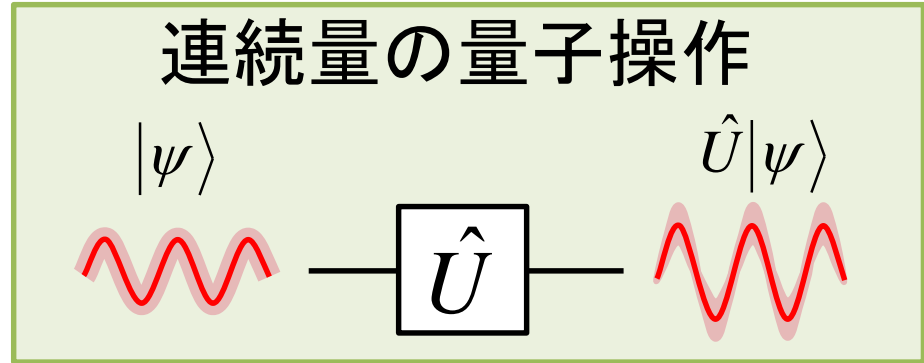
イントロダクション

本発表: 大規模光量子コンピュータへのアプローチ

✓ 高効率な操作: ハイブリッドな手法

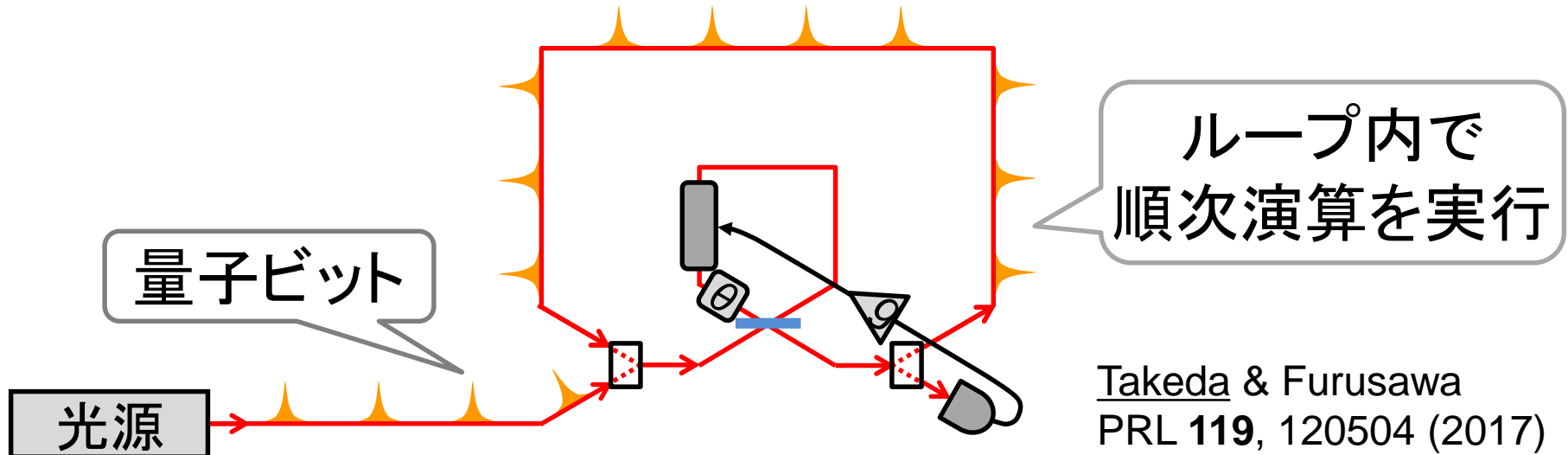


+



Takeda et al., Nature **500**, 315 (2013); Takeda et al., PRL **114**, 100501 (2015)

✓ 高い拡張性: ループ型光量子コンピュータ



Takeda & Furusawa
PRL **119**, 120504 (2017)

大規模な光量子コンピュータを いかに実現するか

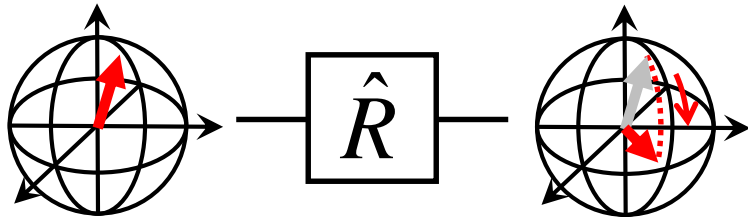
1. イントロダクション
- 2. ハイブリッド量子情報処理**
3. ループ型光量子プロセッサ
4. まとめ

量子ビットの量子計算

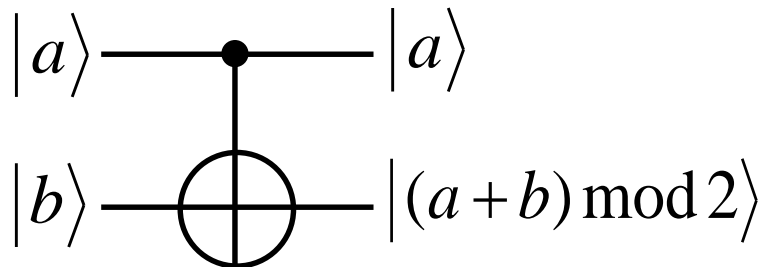
量子ビット

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

1量子ビット回転



2量子ビット制御NOT



$a=1$ の時だけ **b** にNOT

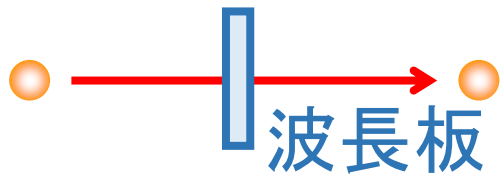
光子を用いた量子計算

量子ビット

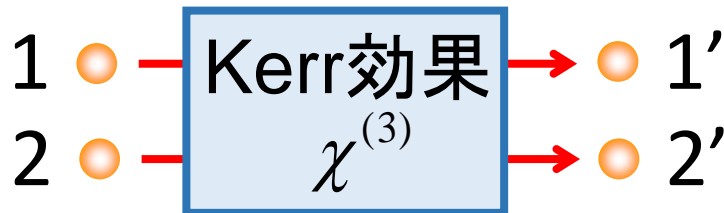
$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

横偏光 \longleftrightarrow 縦偏光 \updownarrow

1量子ビット回転

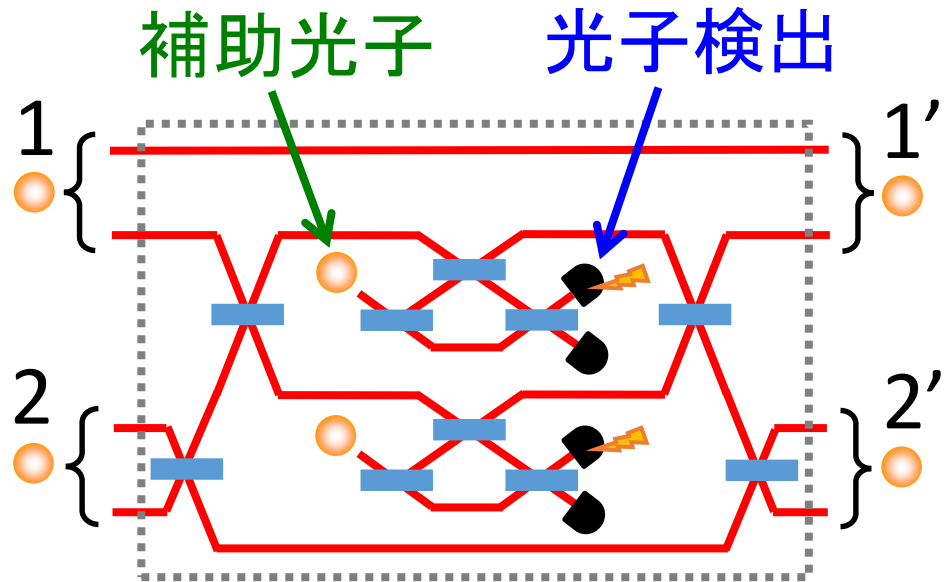


2量子ビット制御NOT



光子1が \updownarrow の時だけ
光子2の位相をシフト

非線形媒質なしで 確率1/16の制御NOT



補助光子数 $\rightarrow \infty$ で確率 $\rightarrow 1$

Nature 409, 46 (2001)

PNAS 108, 10067 (2011)

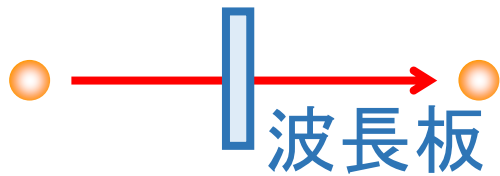
連続量の量子計算

量子ビット

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

横偏光 \leftrightarrow 縦偏光 \updownarrow

1量子ビット回転



2量子ビット制御NOT



× 確率的

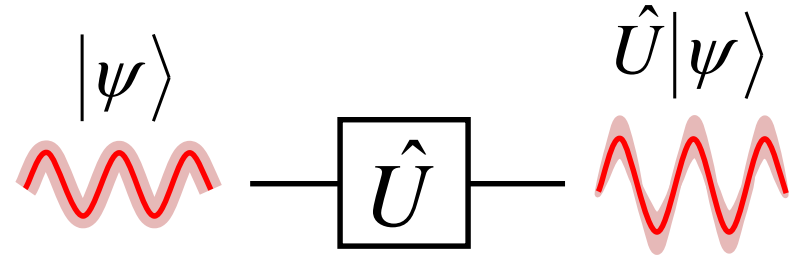
連続量

$$|\psi\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x)|x\rangle dx = \sum_{n \geq 0} c_n |n\rangle$$

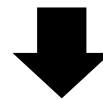
固有状態 \uparrow 光子数


$$\hat{E}(t) \propto \hat{x} \sin \omega t + \hat{p} \cos \omega t$$

連続量のゲート



振幅や位相の変換



5種類のゲートがあればOK

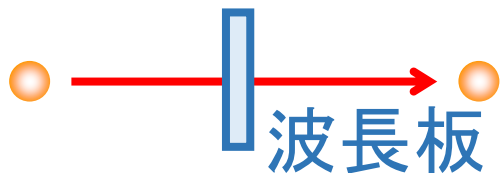
連続量の量子計算

量子ビット

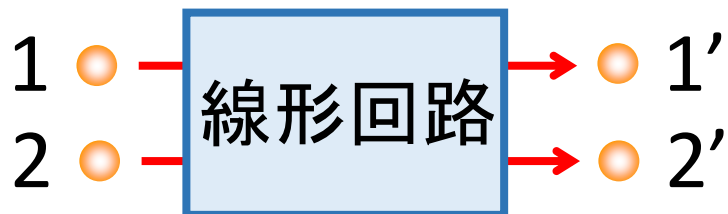
$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

横偏光 \leftrightarrow 縦偏光 \updownarrow

1量子ビット回転



2量子ビット制御NOT



× 確率的

連続量

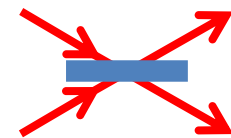
$$|\psi\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x)|x\rangle dx = \sum_{n \geq 0} c_n |n\rangle$$

固有状態 \uparrow 光子数

 $\hat{E}(t) \propto \hat{x} \sin \omega t + \hat{p} \cos \omega t$

連続量のゲート

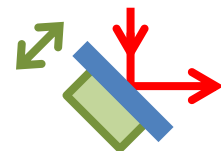
Ⓞ ビームスプリッタ



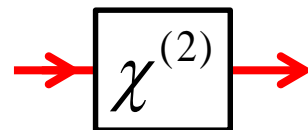
Ⓞ 変位操作



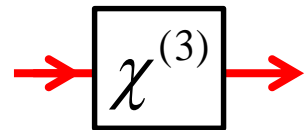
Ⓞ 位相シフタ



Ⓞ スクイーミング



Ⓞ 3次位相ゲート



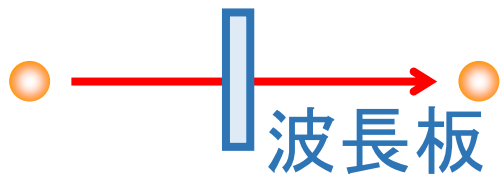
連続量の量子計算

量子ビット

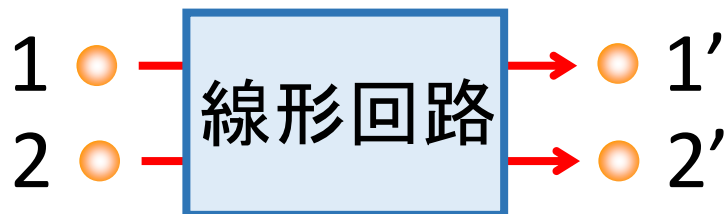
$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

横偏光 \leftrightarrow 縦偏光 \updownarrow

1量子ビット回転



2量子ビット制御NOT



× 確率的

連続量

$$|\psi\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x)|x\rangle dx = \sum_{n \geq 0} c_n |n\rangle$$

固有状態 \uparrow 光子数

 $\hat{E}(t) \propto \hat{x} \sin \omega t + \hat{p} \cos \omega t$

連続量のゲート

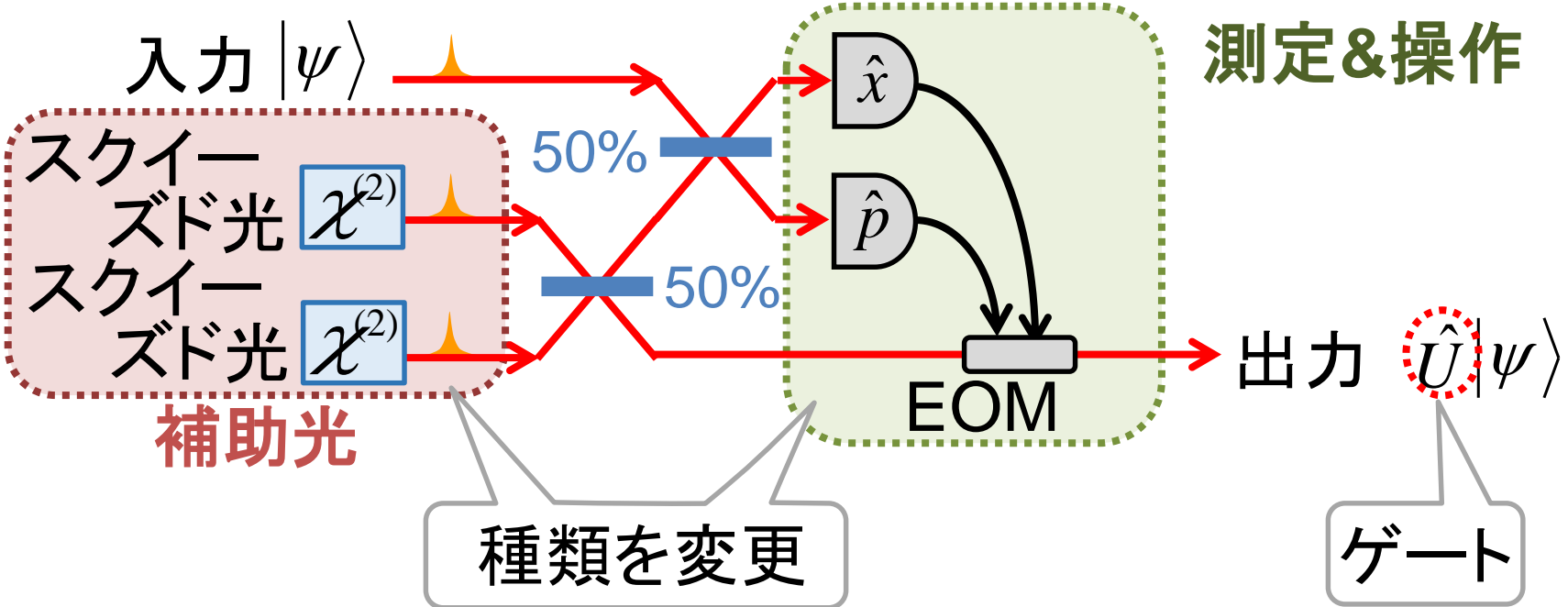
「量子テレポーテーション」
を用いて **確率1** で実現可能

Ⓢ スクイーミング \rightarrow $\chi^{(2)}$

Ⓢ 3次位相ゲート \rightarrow $\chi^{(3)}$

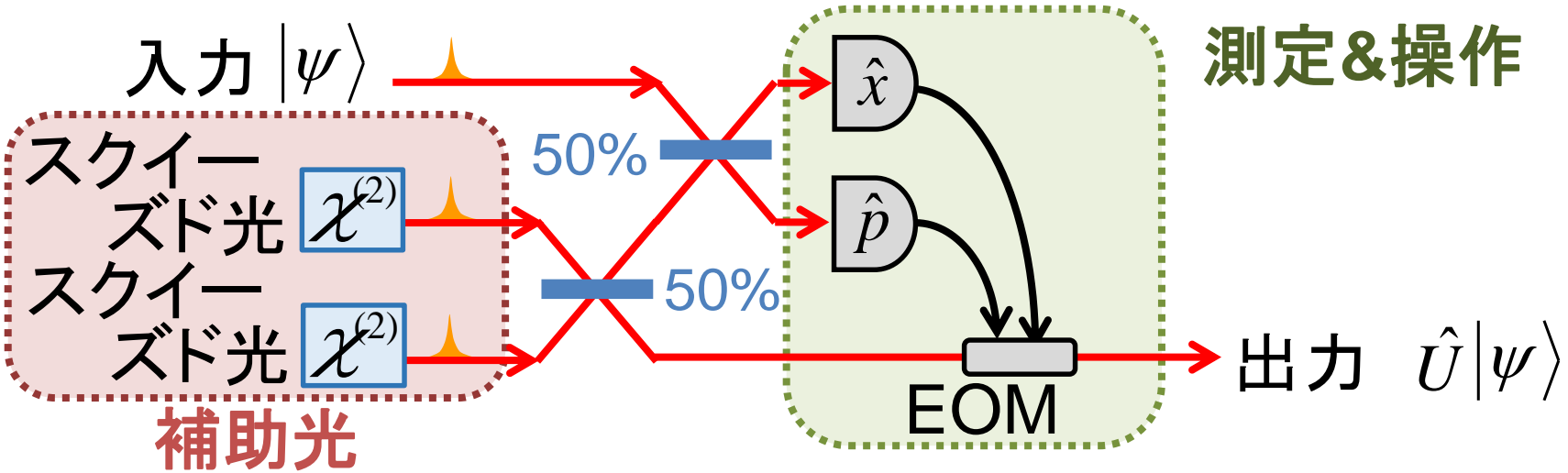
量子テレポーテーションベースの量子ゲート

量子テレポーテーション

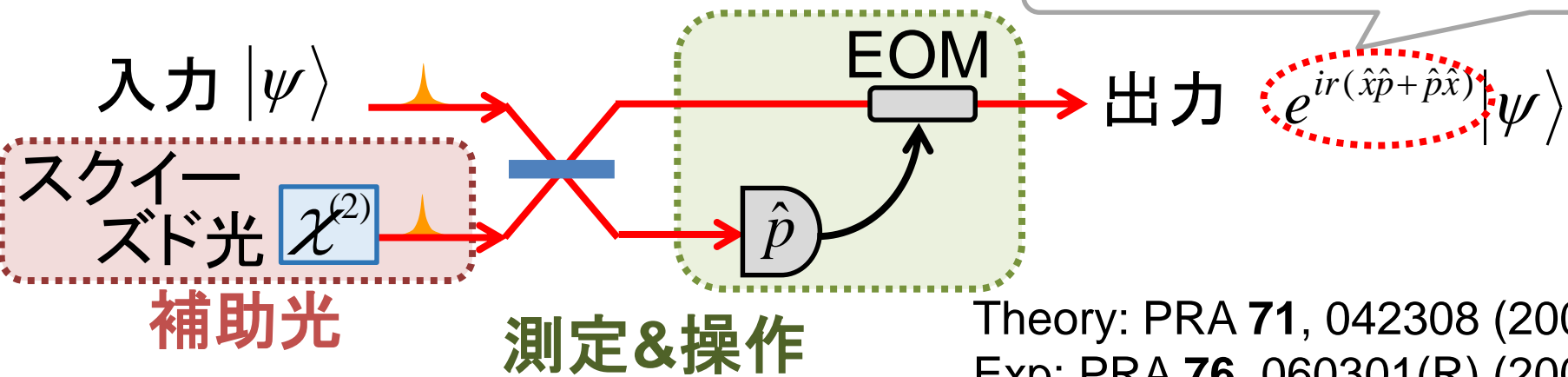


量子テレポーテーションベースの量子ゲート

量子テレポーテーション



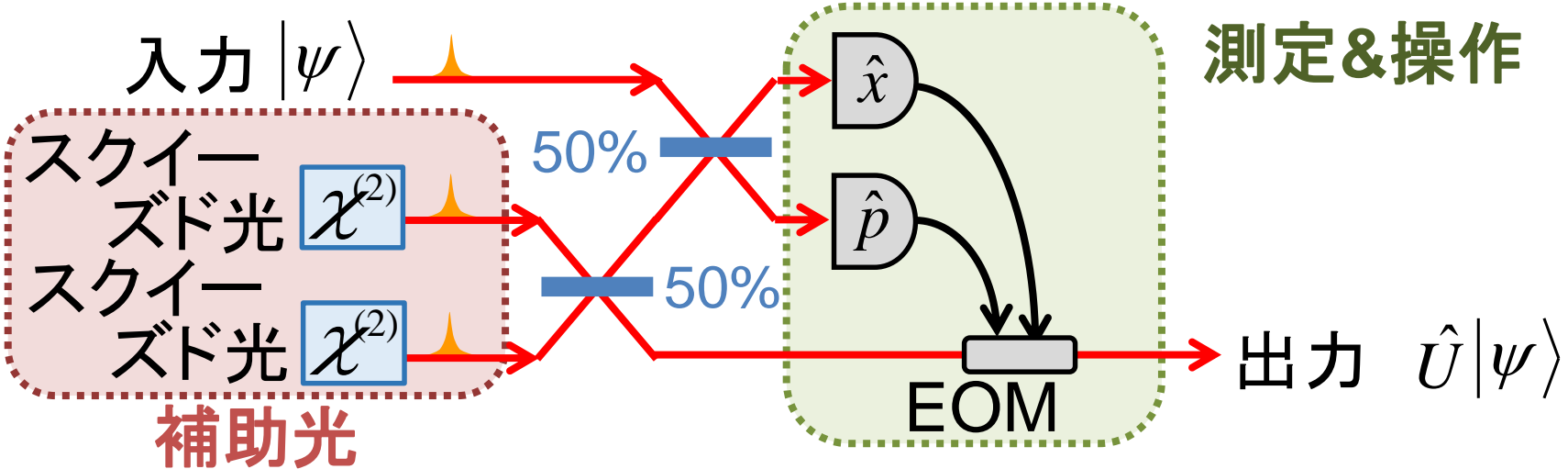
例1: スクイージングゲート



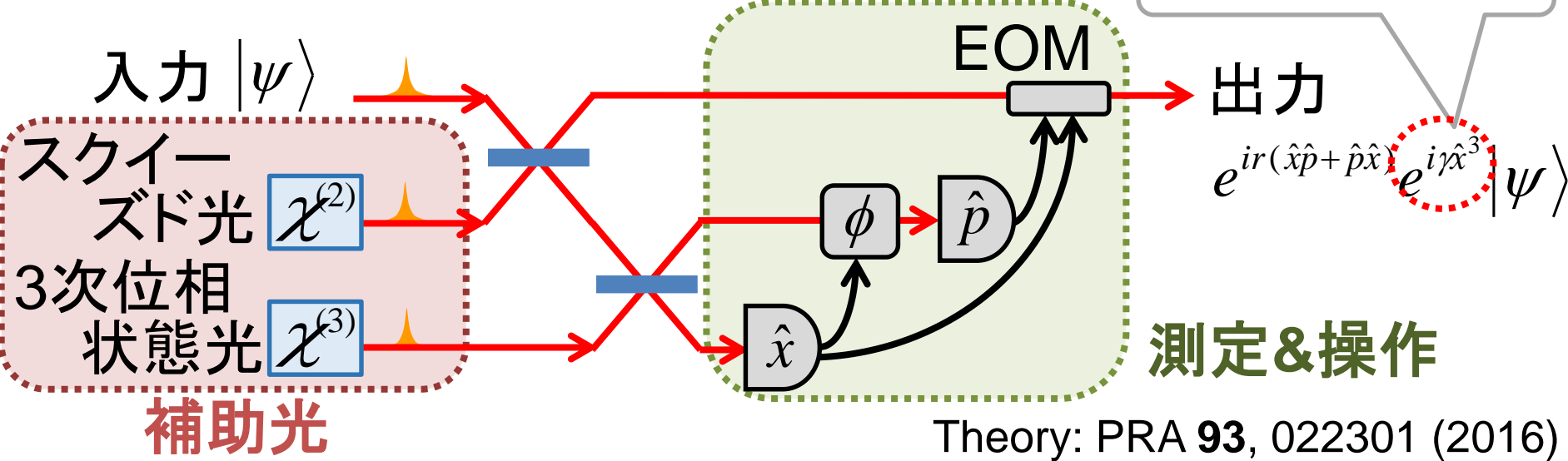
Theory: PRA **71**, 042308 (2005)
Exp: PRA **76**, 060301(R) (2007)
Exp: PRL **114**, 100501 (2015)

量子テレポーテーションベースの量子ゲート

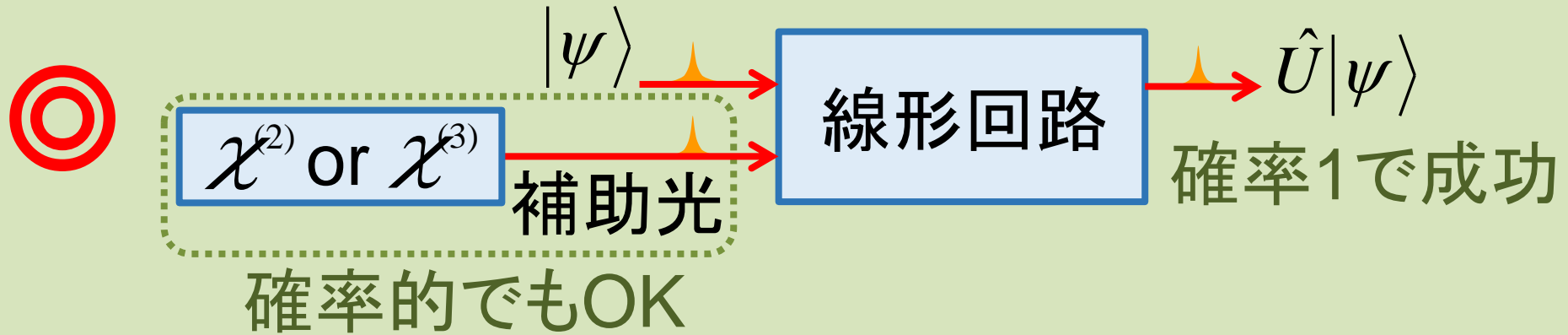
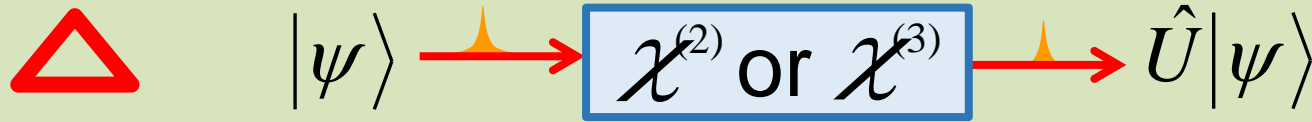
量子テレポーテーション



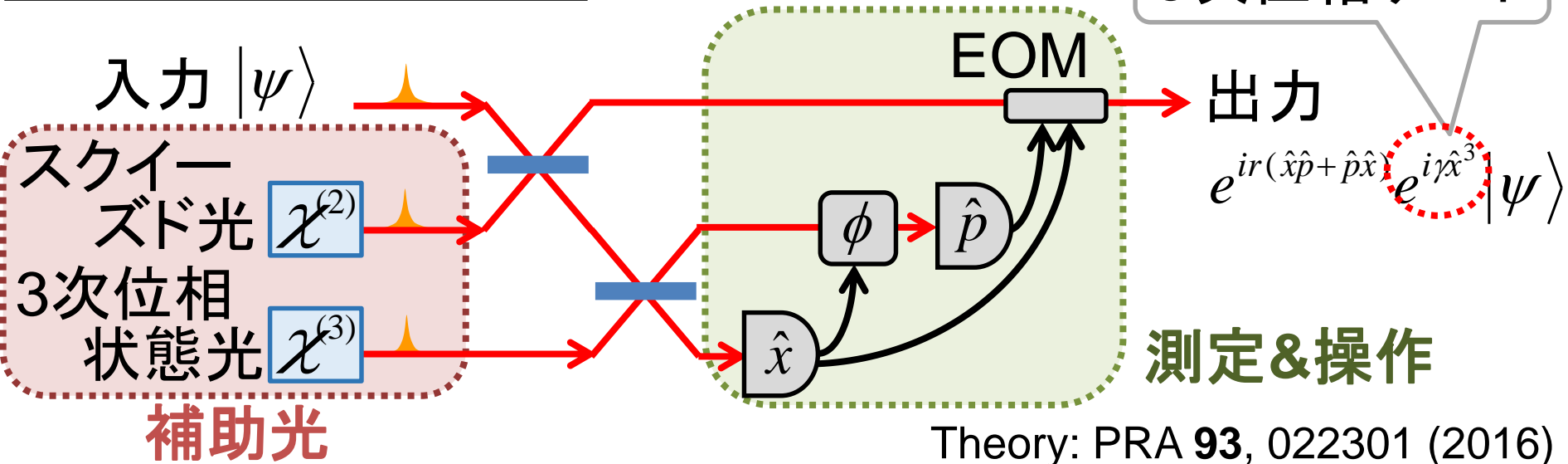
例2: 3次位相ゲート



量子テレポーテーションベースの量子ゲート



例2: 3次位相ゲート



量子ビット vs 連続量

量子ビット

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

光子の偏光にコード

◎ロバスト

連続量

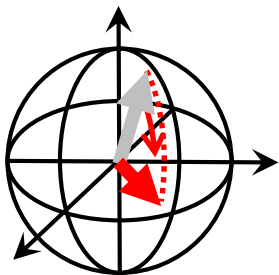
$$|\psi\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x)|x\rangle dx$$

光の振幅・位相にコード

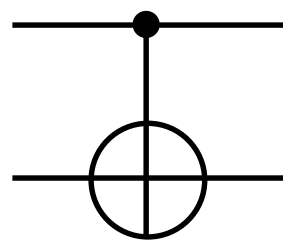
×ノイズ・ロスに弱い

量子ビットのゲート

回転



制御NOT

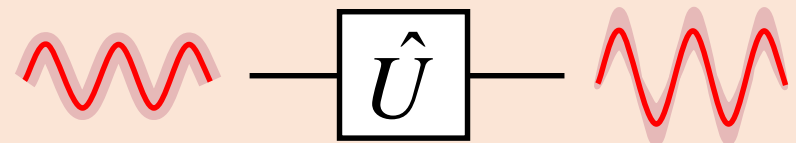


◎決定論的

×確率的

連続量のゲート

5種類のゲート



◎テレポーテーションで
全て決定論的

双方の強みを生かす、ハイブリッド量子情報処理

ハイブリッド量子情報処理

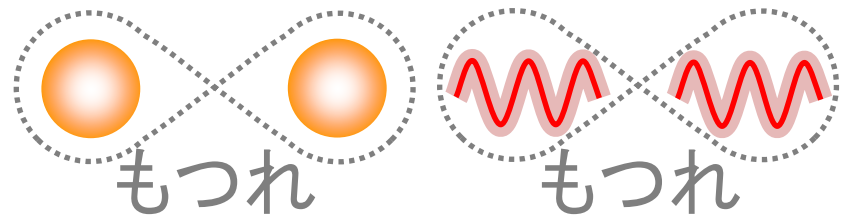
量子ビット

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

光子の偏光にコード

◎ロバスト

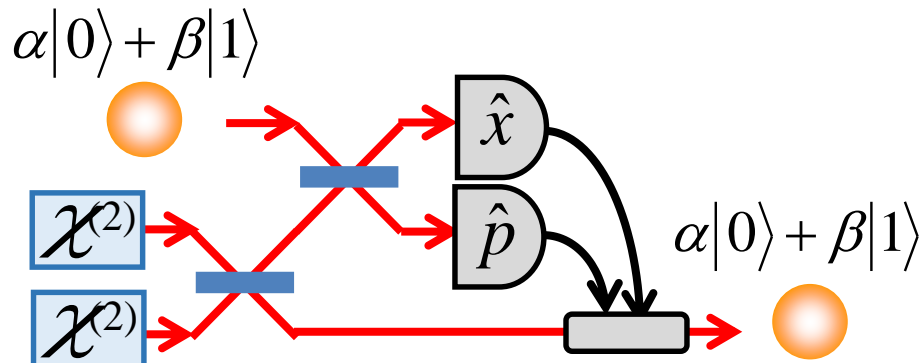
例2: エンタングルメント スワッピング



Takeda et al., PRL 114, 110501 (2015)

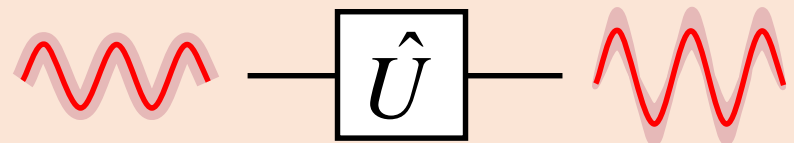
例1: 量子ビットの連続量 量子テレポーテーション

Takeda et al., Nature 500, 315 (2013)



連続量のゲート

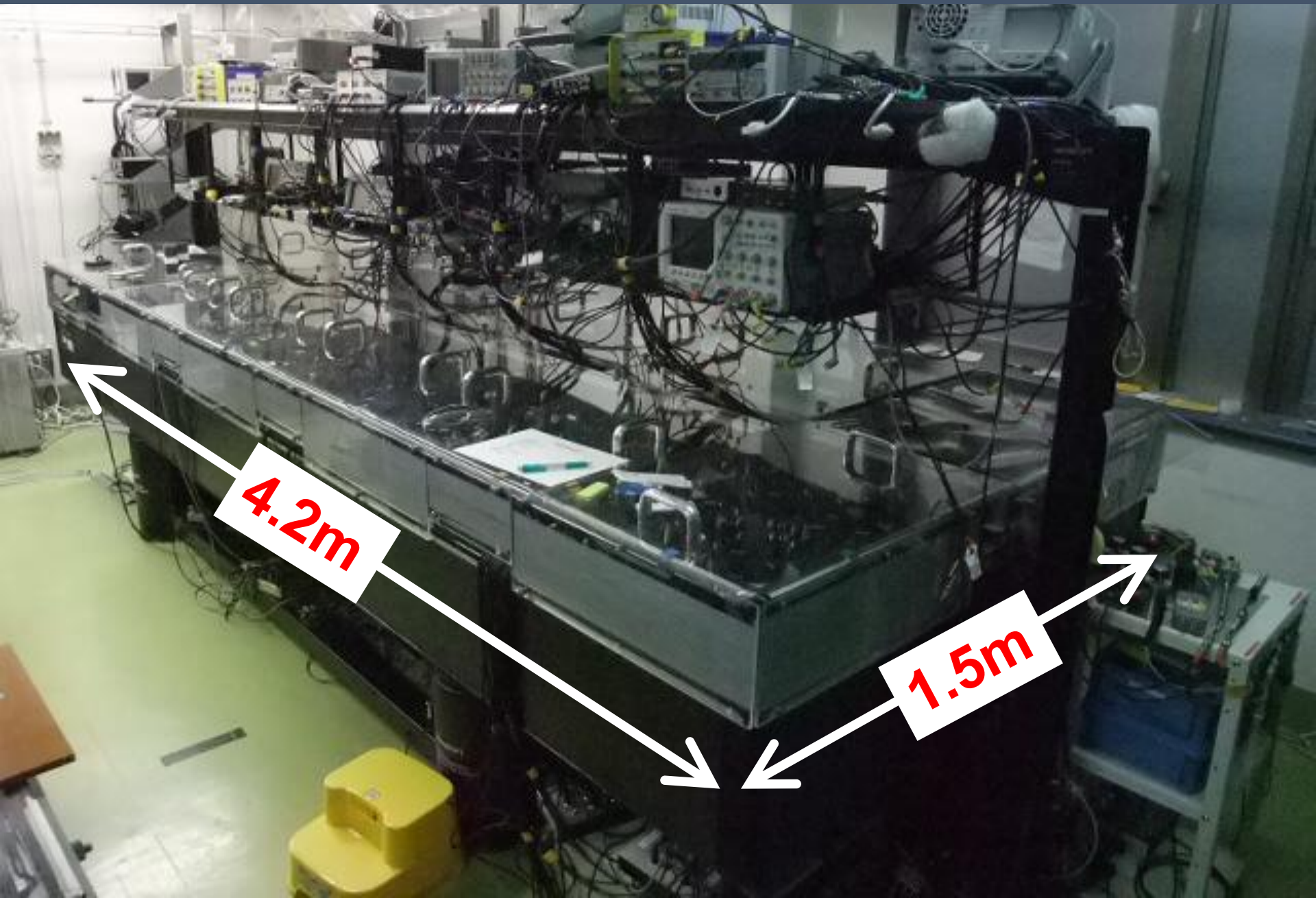
5種類のゲート



◎テレポーテーションで
全て決定論的

双方の強みを生かす、ハイブリッド量子情報処理

量子テレポーテーションの実験系



量子テレポーテーションの実験系

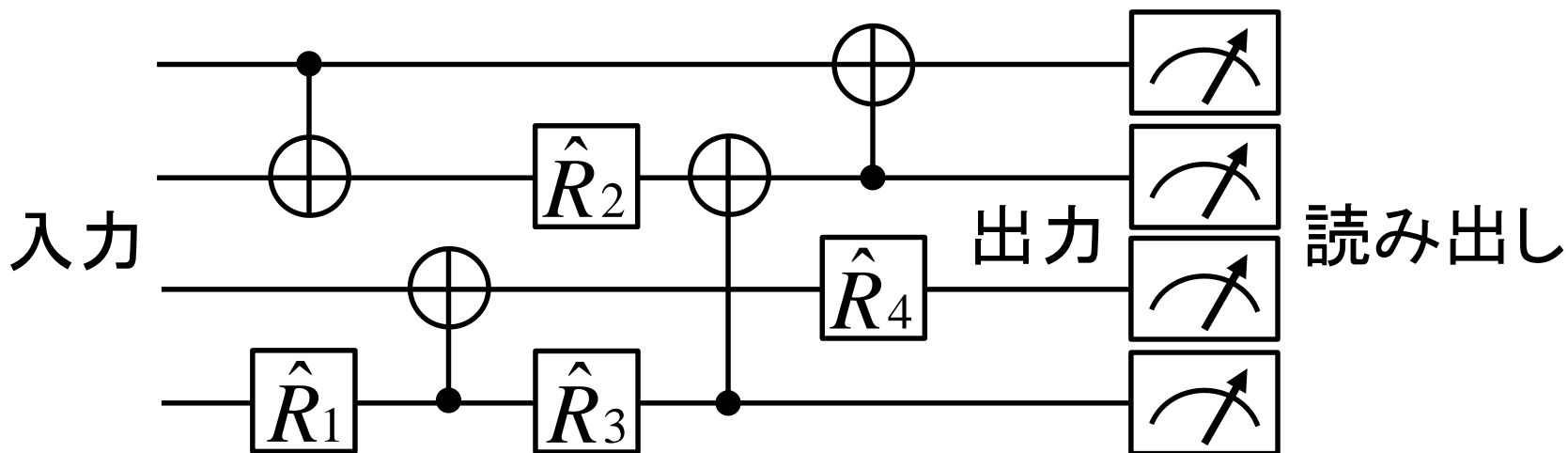


ミラー・レンズ・変調器・検出器など計500個以上

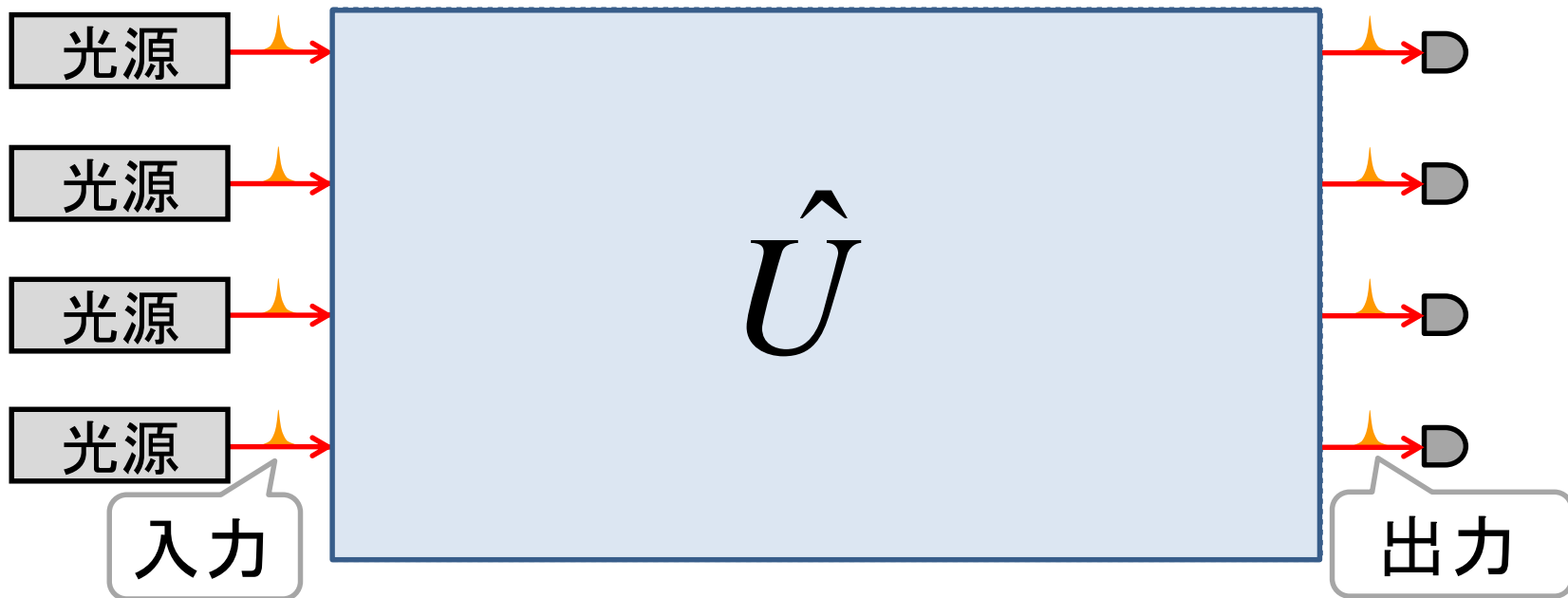
大規模な光量子コンピュータを いかに実現するか

1. イントロダクション
2. ハイブリッド量子情報処理
- 3. ループ型光量子プロセッサ**
4. まとめ

大規模量子コンピューティング

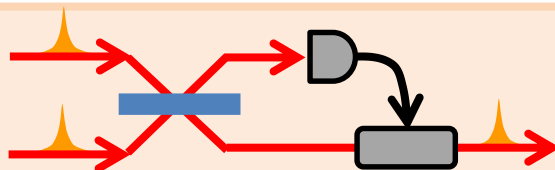


典型的な光量子計算

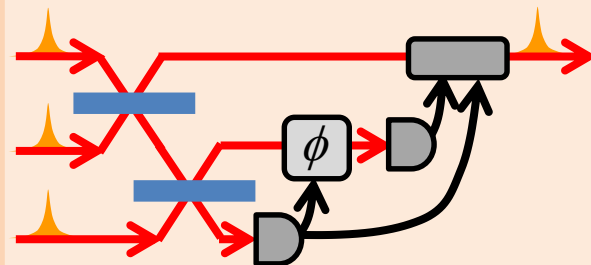


大規模量子コンピューティング

スクイージング



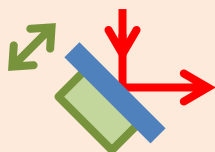
3次位相ゲート



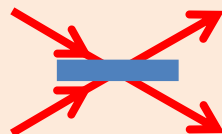
変位操作



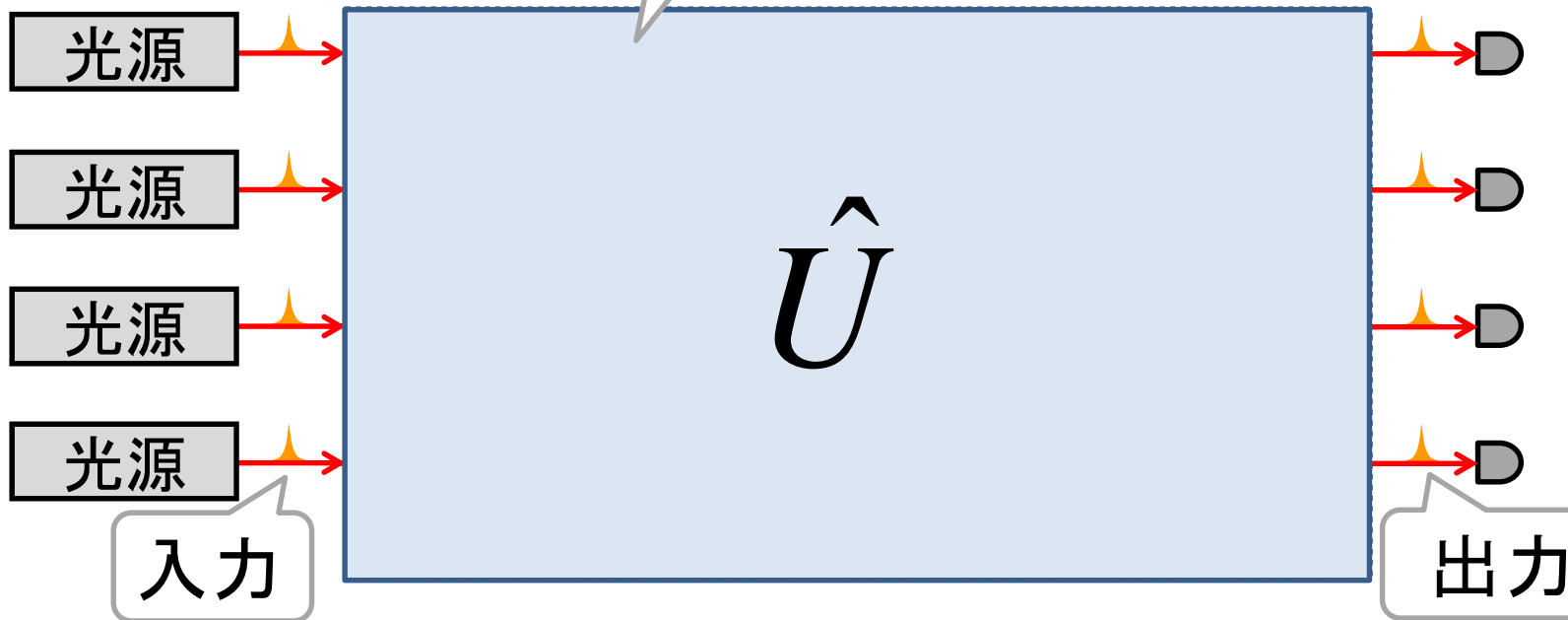
位相シフト



ビームスプリッタ



典型的な光量子計算



大規模量子コンピューティング

大規模光量子コンピューティングの課題

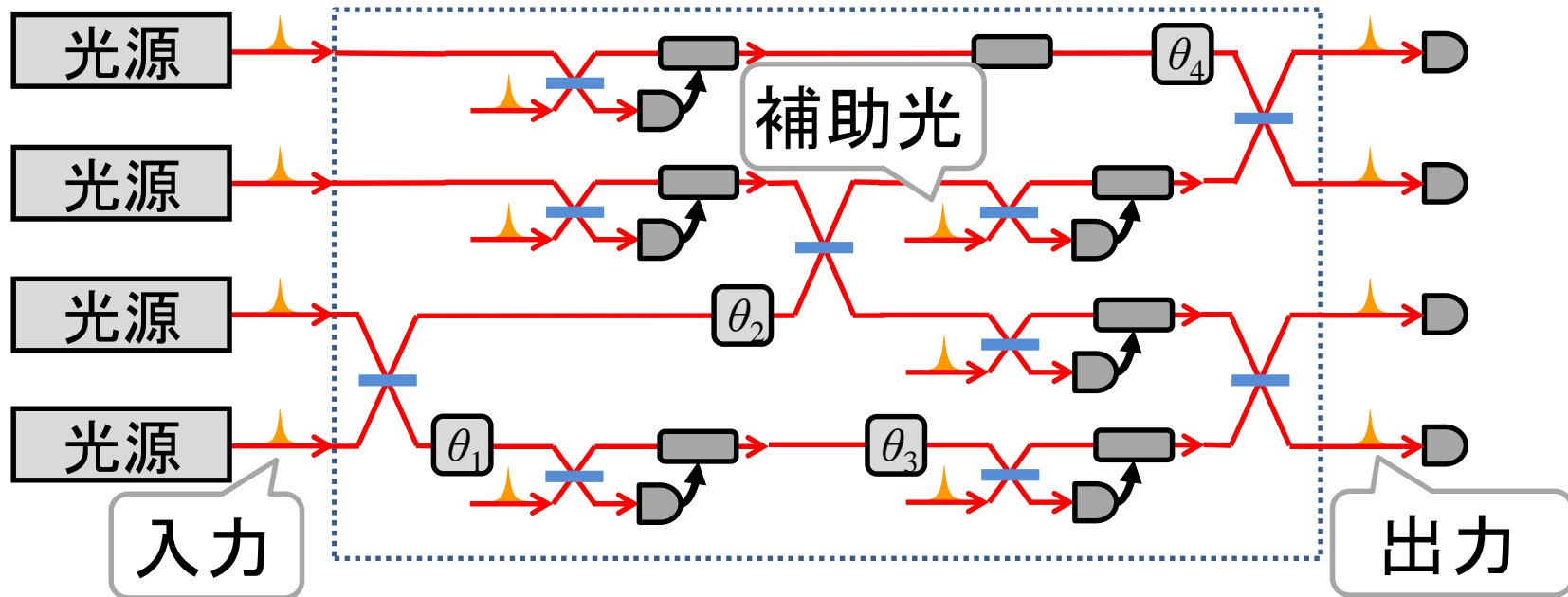
×非スケールラブル

ビット数・ステップ数(増) ⇒ 素子数(増)

×非プログラマブル

別の計算の実行 ⇒ 光回路の組み換えが必要

典型的な光量子計算



大規模量子コンピューティング

大規模光量子コンピューティング

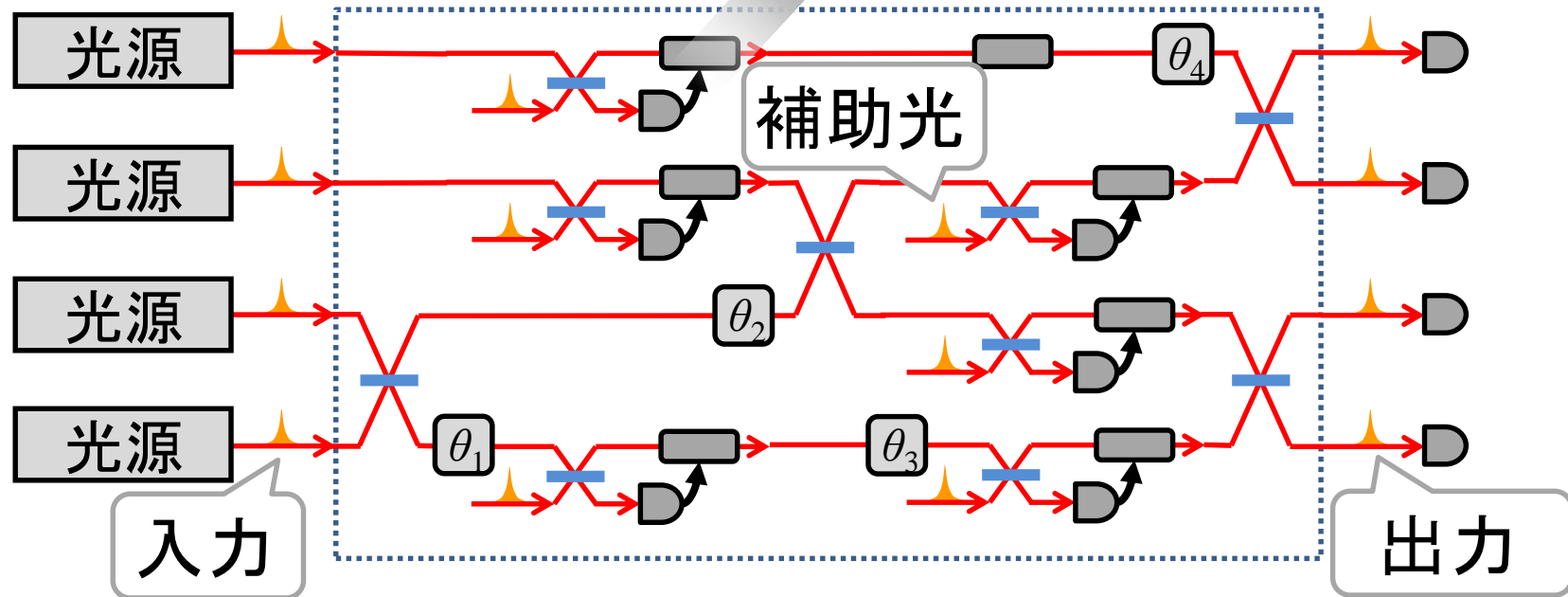
×非スケールラブル

ビット数・ステップ数(増) ⇒ 素

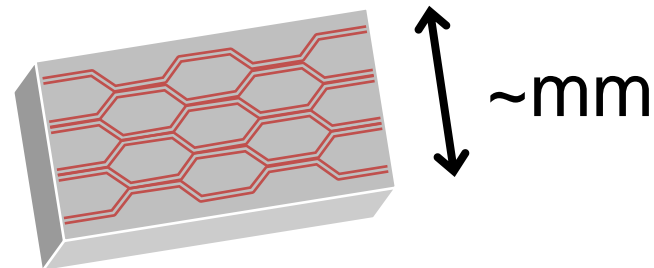
×非プログラマブル

別の計算の実行 ⇒ 光回路の結

典型的な光量子計算



光導波路チップ



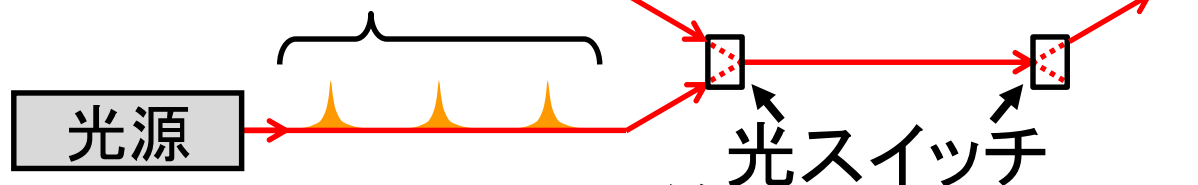
Science **349**, 711 (2015)
Nat. Photon. **11**, 447 (2017)

ループ型光量子コンピューティング

我々の提案

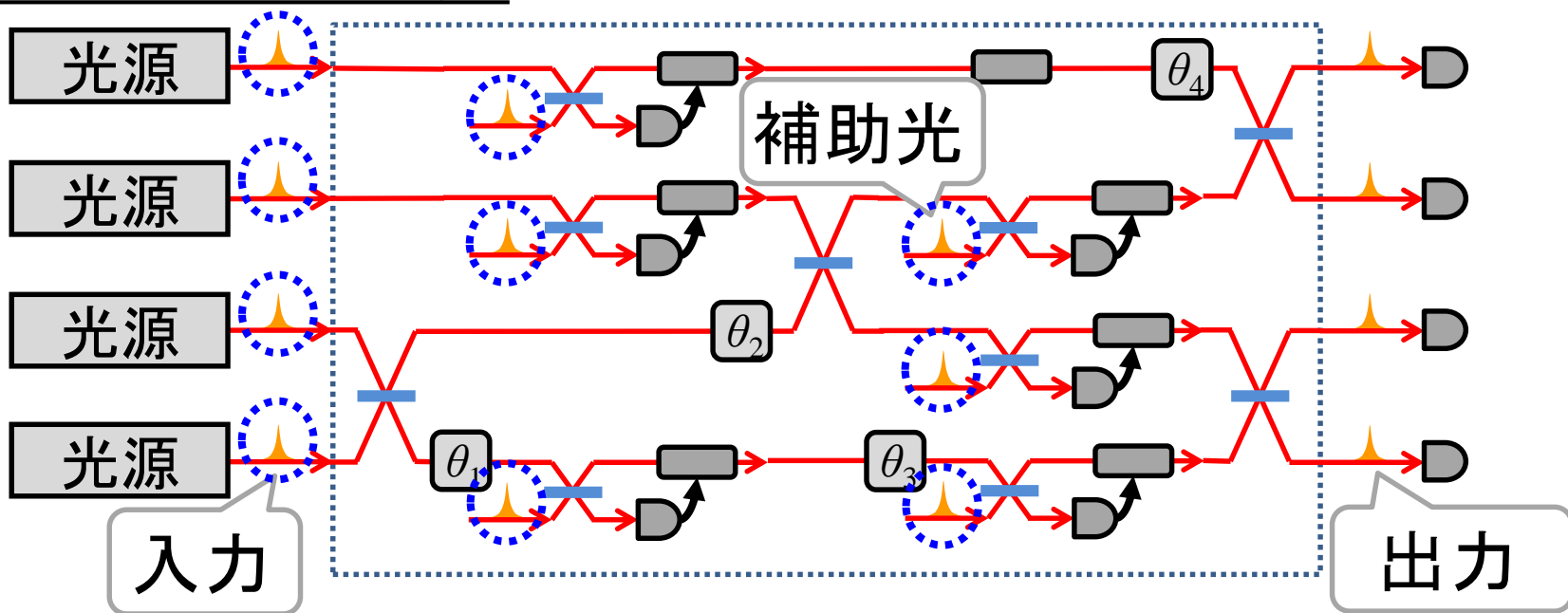
Takeda & Furusawa
PRL 119, 120504 (2017)

入力&補助光



大きなループ
||
量子メモリ

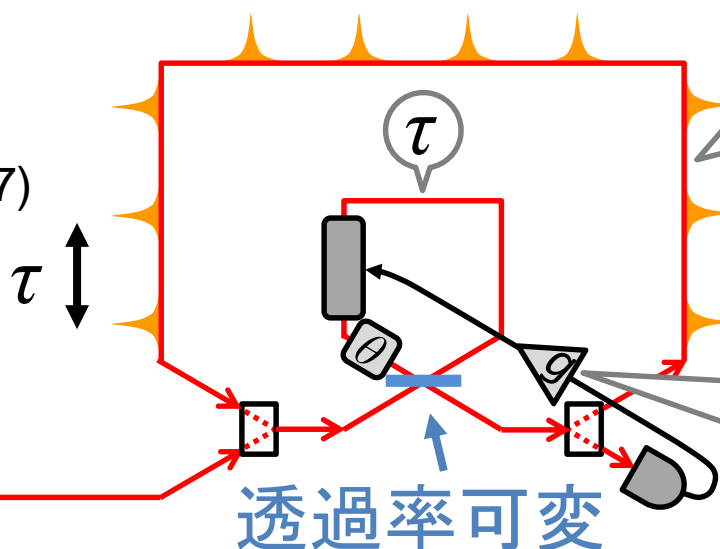
典型的な光量子計算



ループ型光量子コンピューティング

我々の提案

Takeda & Furusawa
PRL 119, 120504 (2017)



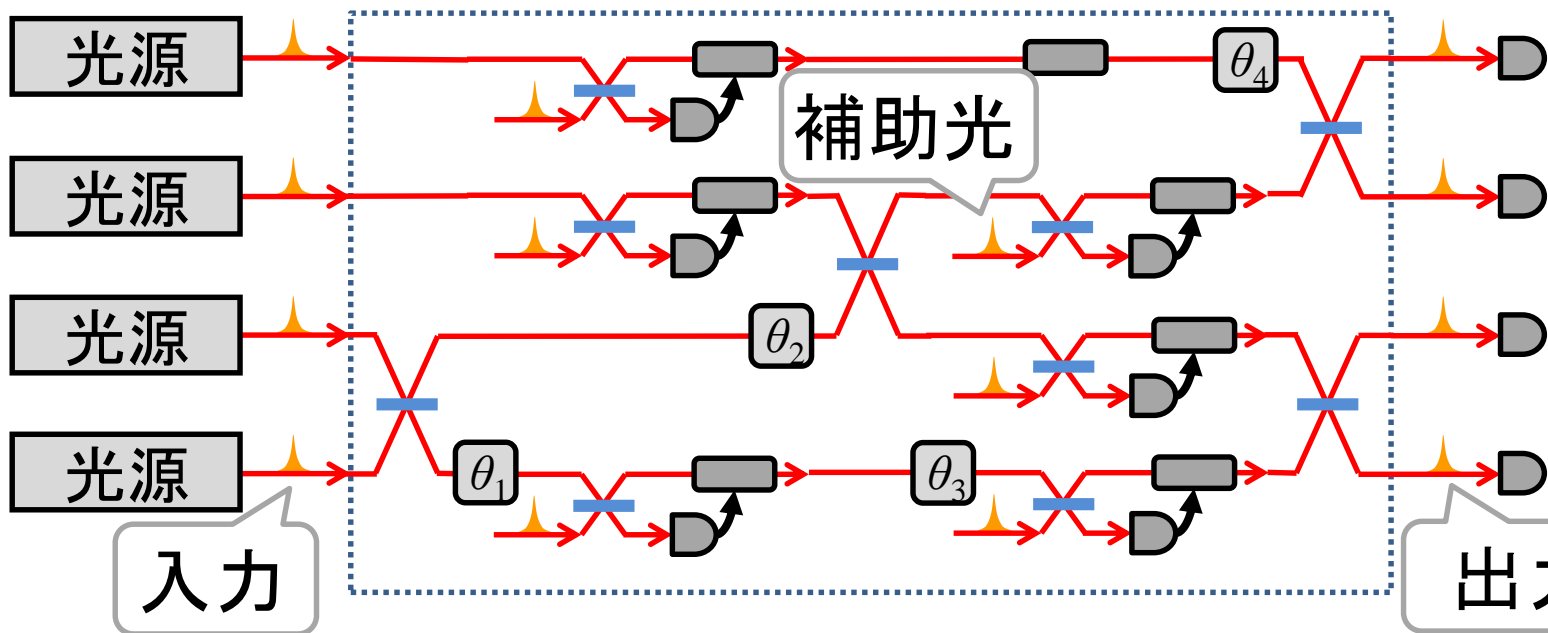
大きなループ
||
量子メモリ

機能を変えつつ
順次演算を実行

光源

透過率可変

典型的な光量子計算



光源

光源

光源

光源

補助光

入力

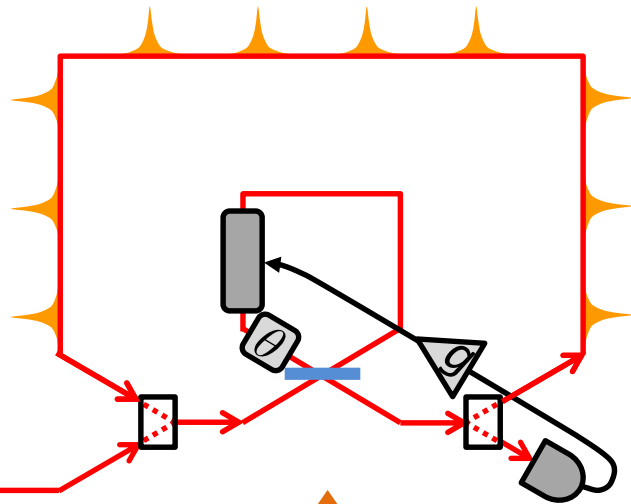
出力

ループ型光量子コンピューティング

我々の提案

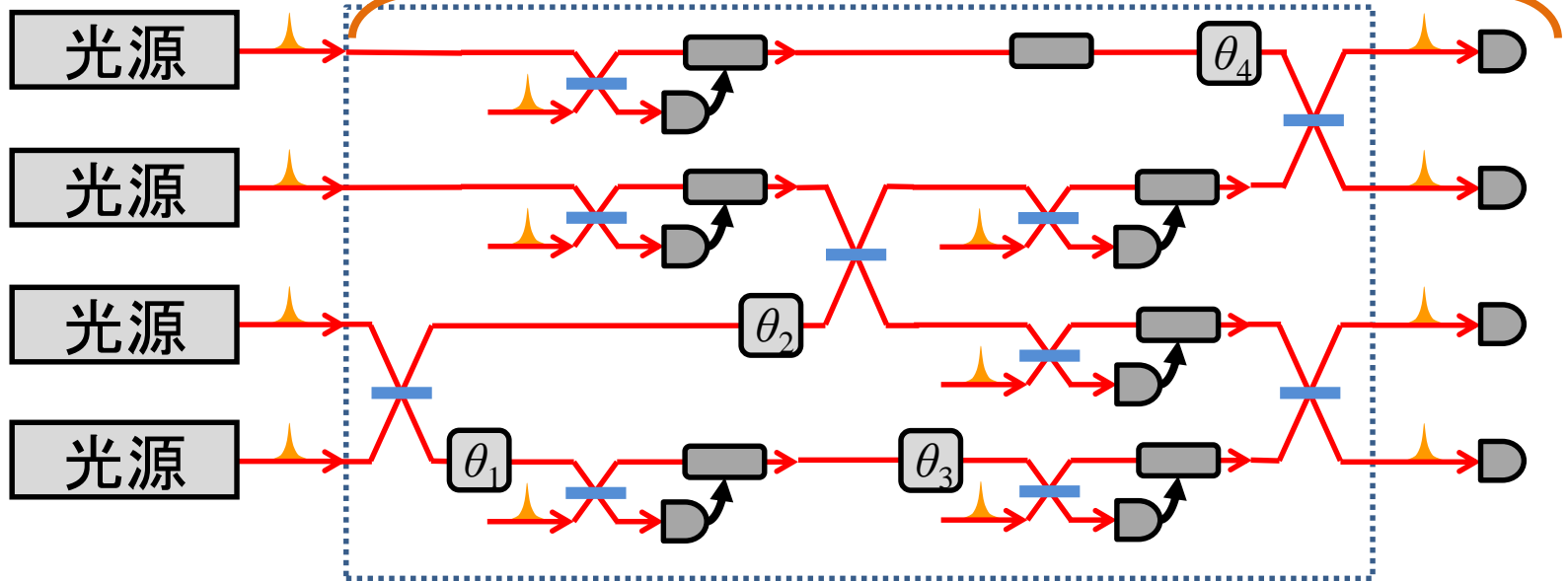
Takeda & Furusawa
PRL 119, 120504 (2017)

光源



典型的な光量子計算

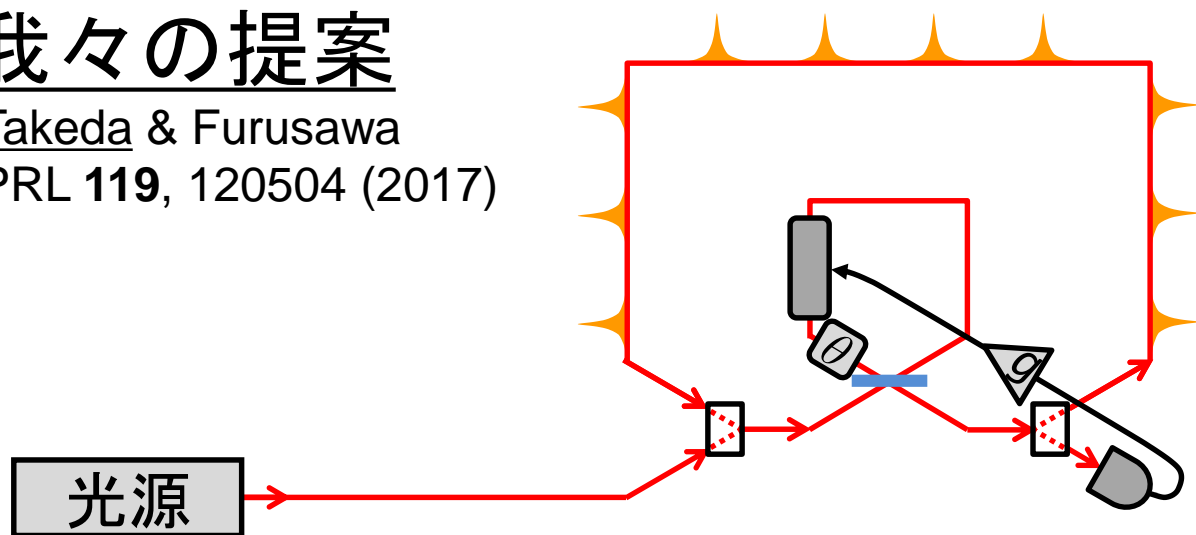
全機能を1回路で実現



ループ回路におけるゲートの実行方法

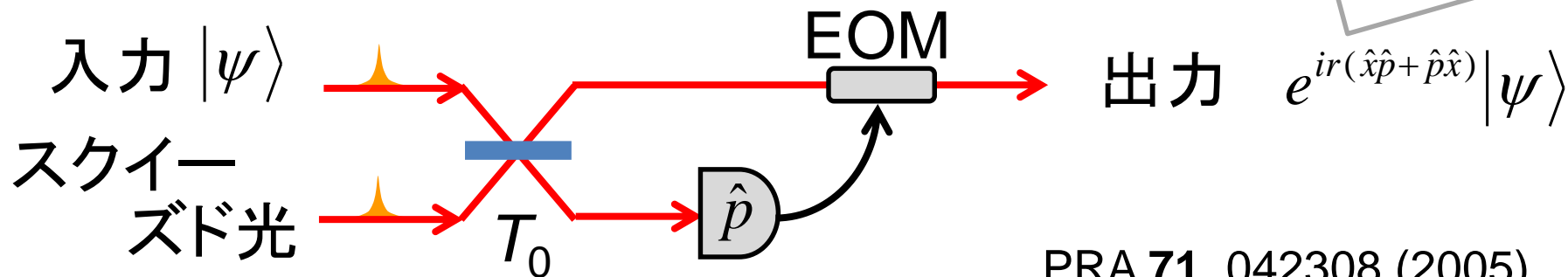
我々の提案

Takeda & Furusawa
PRL 119, 120504 (2017)



ゲートがどう実行されるか？

例：スクイージングゲート



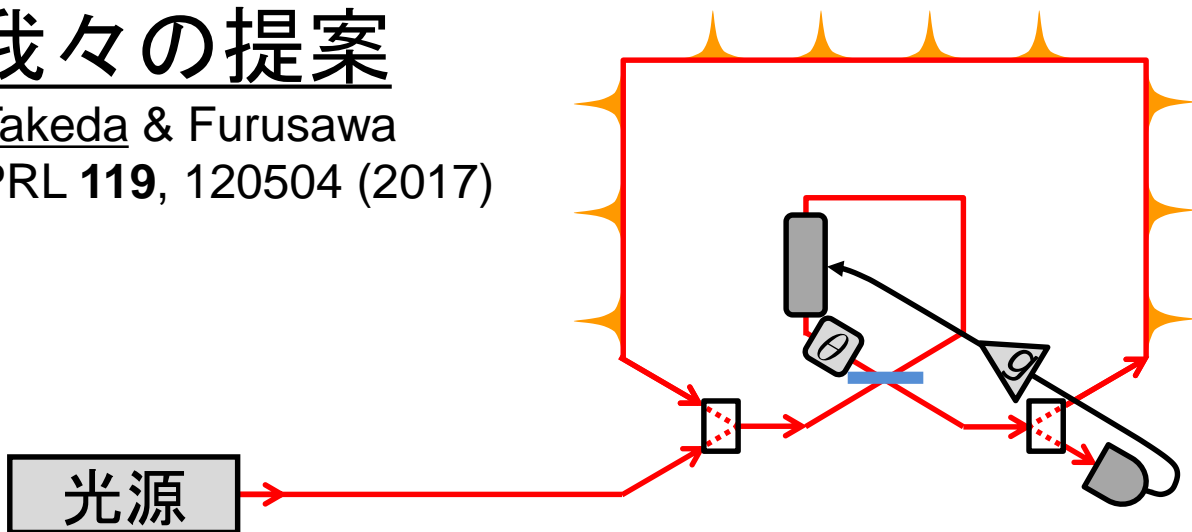
PRA 71, 042308 (2005)

PRA 76, 060301(R) (2007)

ループ回路におけるゲートの実行方法

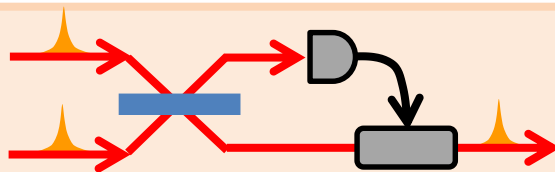
我々の提案

Takeda & Furusawa
PRL 119, 120504 (2017)

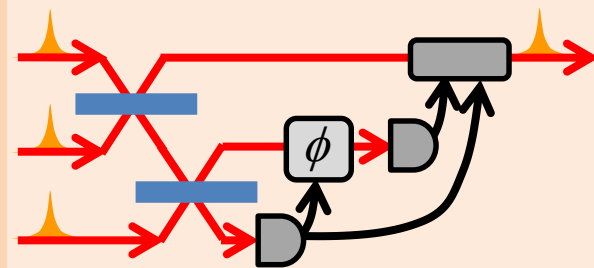


ゲートがどう実行されるか？

スクイージング



3次位相ゲート



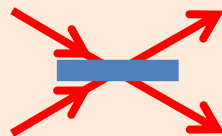
変位操作



位相シフト



ビームスプリッタ

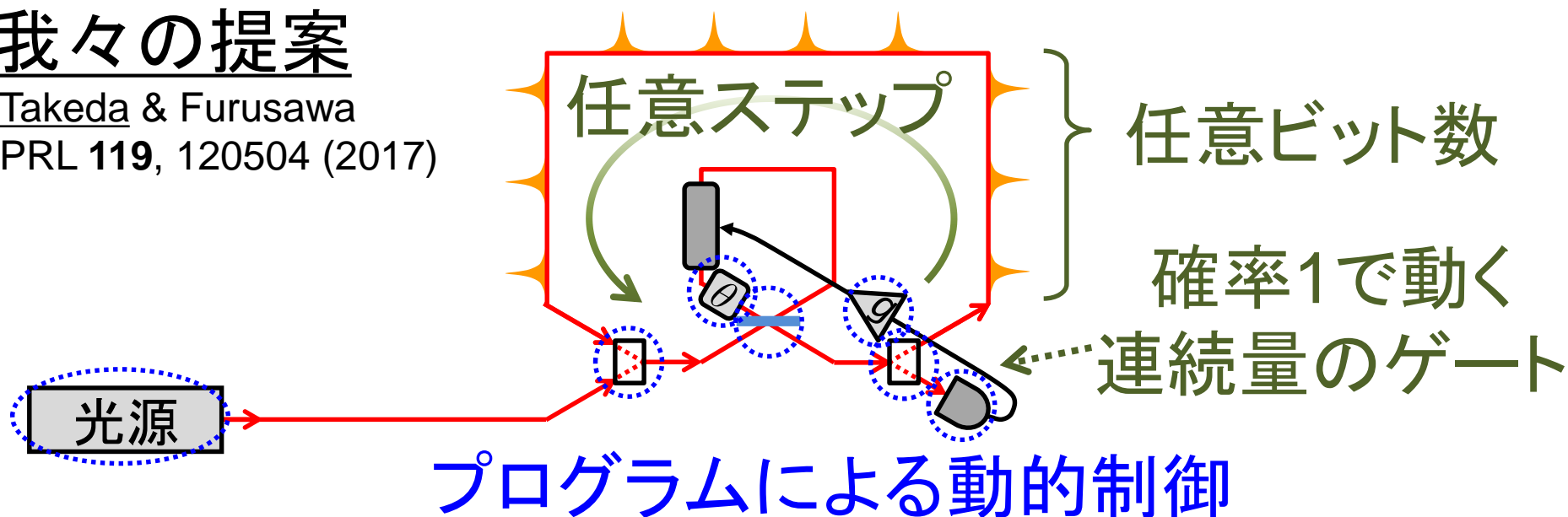


任意の量子計算も可能(量子ビットの計算も可能)

ループ回路におけるゲートの実行方法

我々の提案

Takeda & Furusawa
PRL 119, 120504 (2017)



特徴

- ✓ 量子ビット・連続量のユニバーサル量子計算
- ✓ スケーラブル(最小規模の回路構成)
- ✓ プログラマブル

今後、原理実証実験を目指す

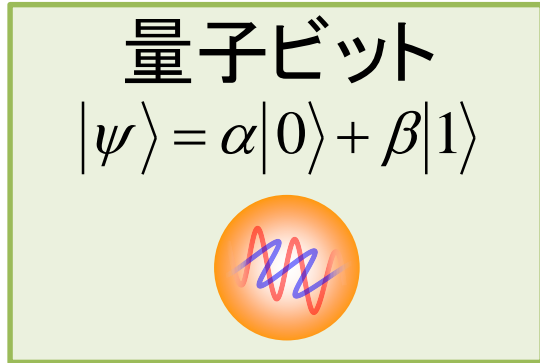
大規模な光量子コンピュータを いかに実現するか

1. イントロダクション
2. ハイブリッド量子情報処理
3. ループ型光量子プロセッサ
4. **まとめ**

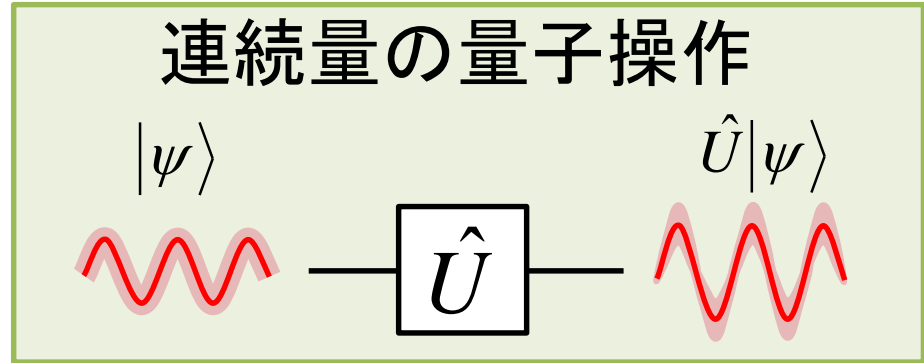
イントロダクション

本発表: 大規模光量子コンピュータへのアプローチ

✓ 高効率な操作: ハイブリッドな手法

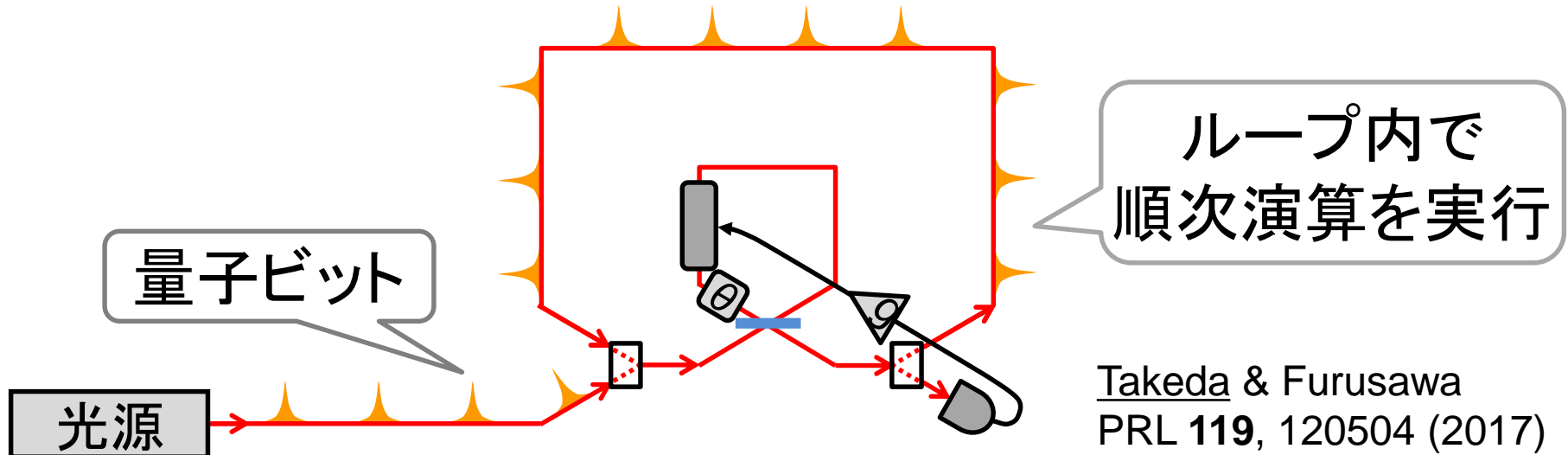


+



Takeda et al., Nature **500**, 315 (2013); Takeda et al., PRL **114**, 100501 (2015)

✓ 高い拡張性: ループ型光量子コンピュータ



Takeda & Furusawa
PRL **119**, 120504 (2017)