

光量子コンピュータ

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

1. 自己紹介と講義概要
2. 光量子コンピュータ基礎・量子ビット編
3. 光量子コンピュータ基礎・連続量編
4. 最先端トピックス紹介

自己紹介

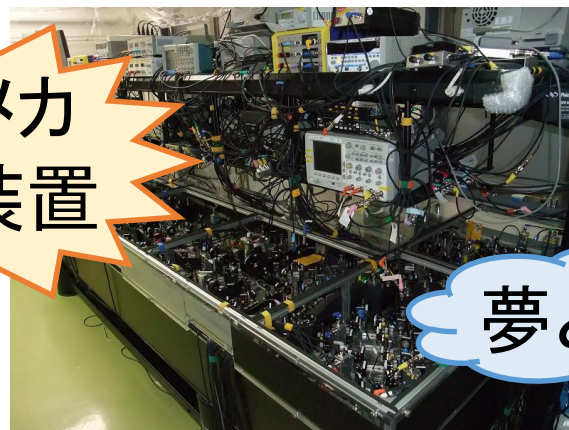


武田俊太郎(33歳)

専門: 光量子情報処理(実験)

この分野に入ったきっかけは?

メカメカ
しい装置

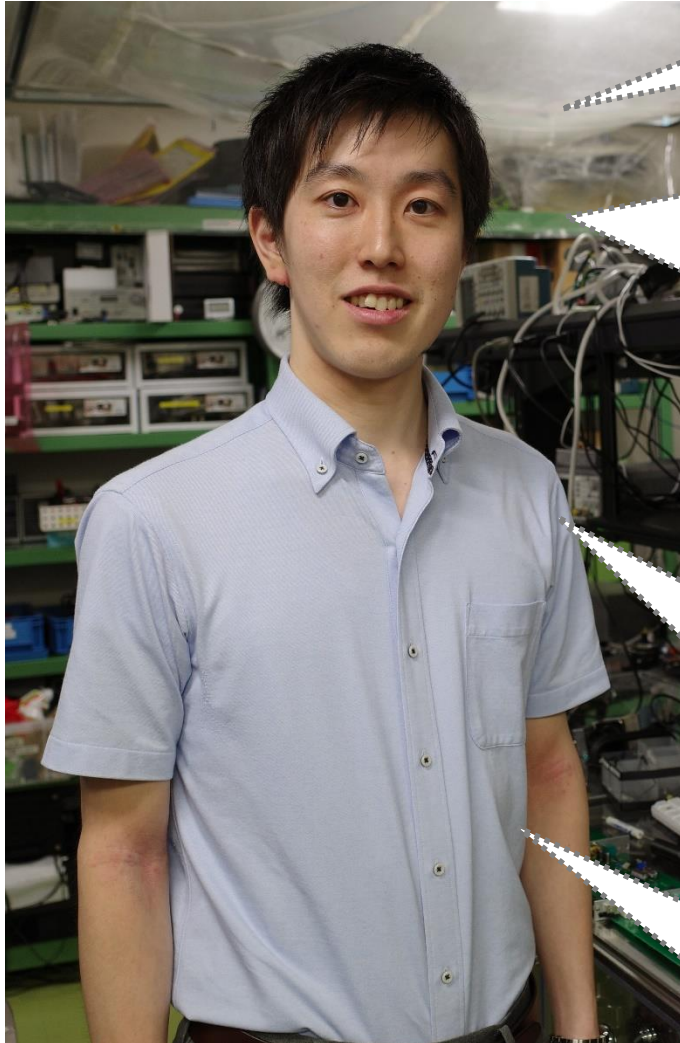


夢とロマン

この分野の魅力は?

- ① 手作り装置で光子が操れる
- ② 幅広い量子技術への応用
- ③ 日本が世界をリードできる

自己紹介



武田俊太郎(33歳)

Twitter: @shuntaro_takeda

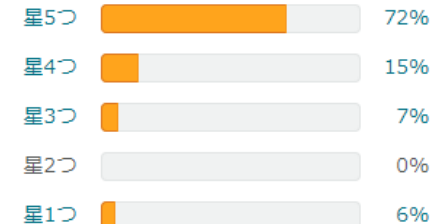
一般向け
書籍
(2020年)



カスタマーレビュー

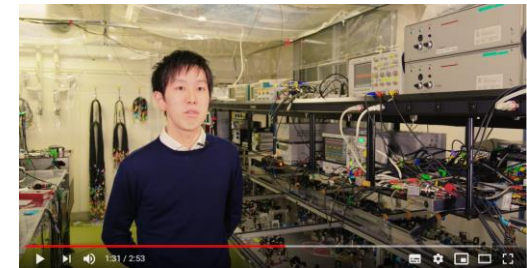
★★★★★ 星5つ中の4.5

65 件のグローバル評価



YouTube動画

<https://www.youtube.com/watch?v=ZiEscKWZZPc>



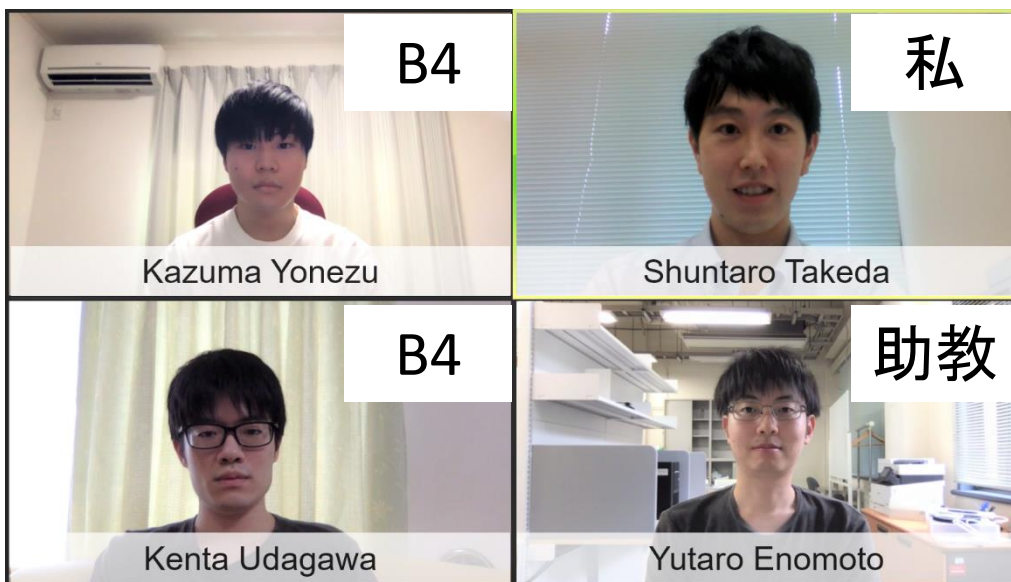
インタビュー記事

https://qforum.org/topics/young_interview06.html



東京大学・武田研の紹介

- 東京大学・工学部物理工学科
- 2019年10月オープン、メンバー4名
- 研究テーマ: 光量子コンピュータとその応用
- 進学に興味がある方に研究室紹介動画を公開中
⇒ 詳しくは武田 (takeda@ap.t.u-tokyo.ac.jp) まで



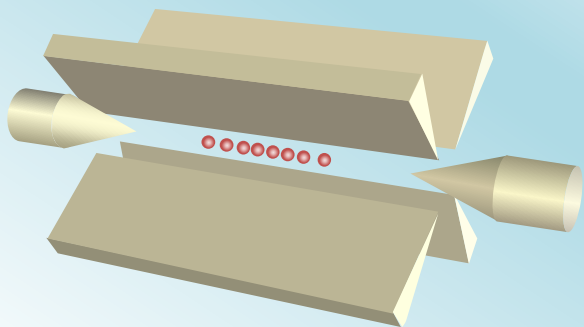
実験室

※図を削除

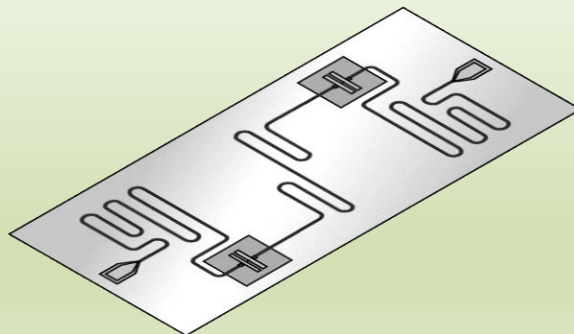
講義概要

- 量子コンピュータの多様な実現方式
⇒大規模化への課題は多く、本命は不明

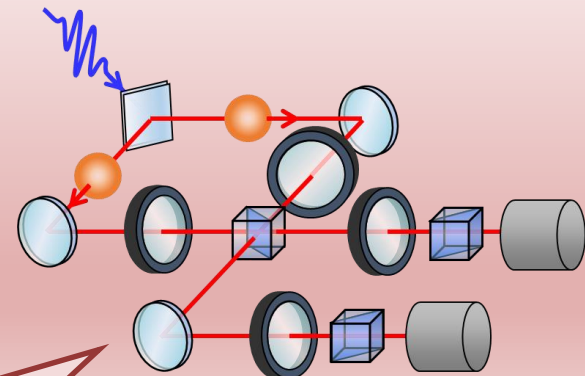
イオン



超伝導回路



光



近年、光特有のアプローチに注目が集まる

✓ 大規模量子もつれ生成

Nature Photonics 7, 982 (2013)

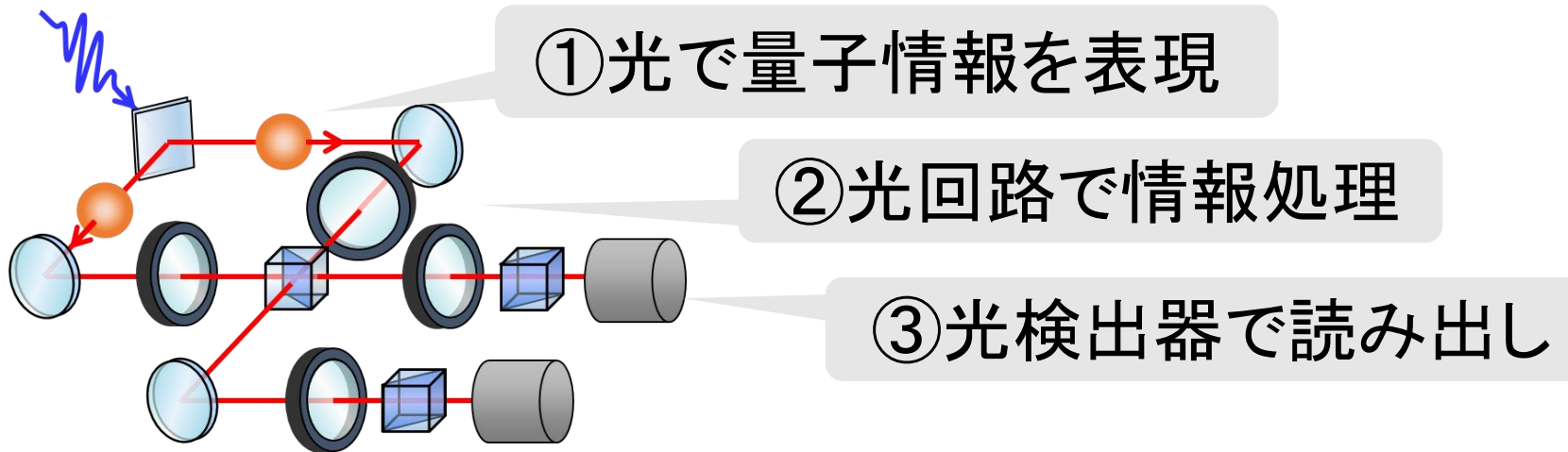
Science 366, 373 (2019)

✓ 「量子超越性」の実証

Science 370, 1460 (2020)

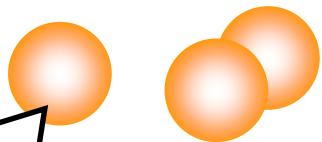
講義概要

• 光量子コンピュータの全体像



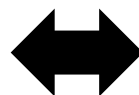
• 2つの流派

光子

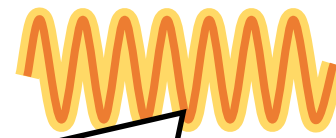


量子ビット

0・1の重ね合わせ



振幅・位相



連続量

任意実数 x の重ね合わせ

光量子コンピュータ

1. 自己紹介と講義概要
2. **光量子コンピュータ基礎・量子ビット編**
3. 光量子コンピュータ基礎・連続量編
4. 最先端トピックス紹介

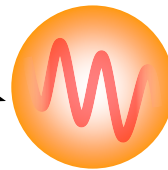
導入

- 1970～80年代：光子による量子力学の検証実験

量子もつれの検証実験

Phys. Rev. Lett. **28**, 938 (1972)

Phys. Rev. Lett. **47**, 460 (1981)



光子

制御・検出
が容易

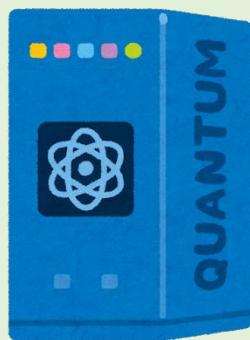
- 1980年代中頃～：様々な量子情報処理への応用

Nature Photonics **3**, 687 (2009)

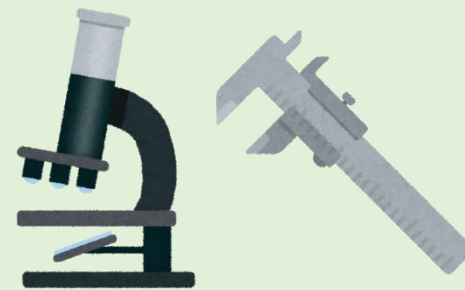
量子暗号



量子計算



量子計測

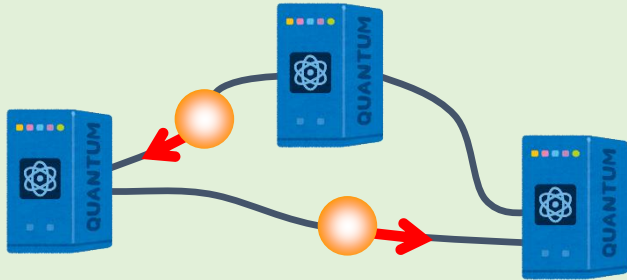


⇒光は今でも量子技術の中心的役割を担う

導入

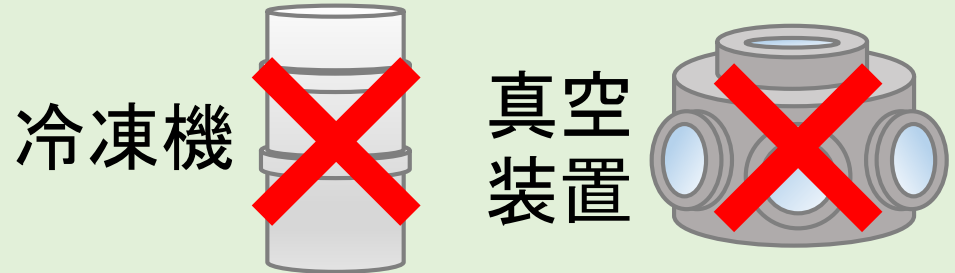
• 光量子ビットの特徴

①空間を光速で移動



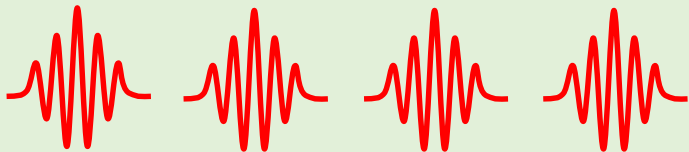
◎通信に最適

②常温・大気中で量子性を保持



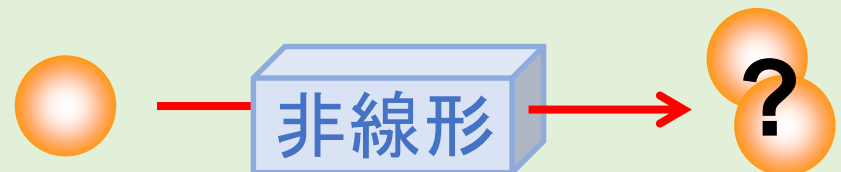
◎特殊環境が不要

③高速な情報処理



◎高クロックのゲート操作

④光の非線形な変換が難しい



△実現が難しいゲートが存在

光を用いた量子ビットの表現

- Single-rail量子ビット: $\alpha|0_L\rangle + \beta|1_L\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

論理 (Logic) の「0」と「1」 光子数の「0」と「1」

× 光のロスに弱い (ロスでどの状態も $|0_L\rangle = |0\rangle$ に変化)

- Dual-rail量子ビット: $\alpha|0_L\rangle + \beta|1_L\rangle = \alpha|0\rangle_A |1\rangle_B + \beta|1\rangle_A |0\rangle_B$

A, Bのどちらに光子がいるか

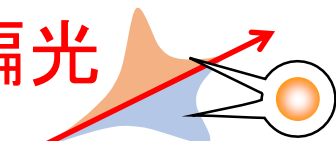
◎ 光のロスにロバスト (ロスで $|0\rangle_A |0\rangle_B$ に変化し区別可能)

① 偏光量子ビット

$$\alpha|0\rangle_{\uparrow} |1\rangle_{\leftrightarrow} + \beta|1\rangle_{\downarrow} |0\rangle_{\leftrightarrow}$$

縦偏光

横偏光

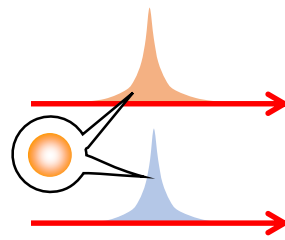


② 経路量子ビット

$$\alpha|0\rangle_1 |1\rangle_2 + \beta|1\rangle_1 |0\rangle_2$$

経路1

経路2



③ Time-bin量子ビット

$$\alpha|0\rangle_{\text{前}} |1\rangle_{\text{後}} + \beta|1\rangle_{\text{前}} |0\rangle_{\text{後}}$$

後 前



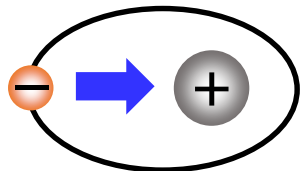
①~③は相互変換可能⇒以後は②で議論

光子の量子ビットの生成

- 初期状態の光子の発生 ⇒ **非線形光学効果**の手法が主流

非線形光学効果

→ 電場 E



分極 P

真空の誘電率

感受率

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 + \dots$$

線形 非線形(2次) 非線形(3次)

⇒ 入力光と異なる周波数の光が発生

- 典型手法: パラメトリック下方変換 (2次の非線形光学効果)

[Rev. Sci. Instrum. **82**, 071101 (2011)]

2次の非線形光学結晶
(BBO, KTP, etc.)

ポンプ強度 → 0 ($\epsilon \rightarrow 0$)

$$|0\rangle_1 |0\rangle_2 + \epsilon |1\rangle_1 |1\rangle_2 + \cancel{\epsilon^2 |2\rangle_1 |2\rangle_2} + \dots$$

弱いポンプ光

$$\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$$

ω_1

ω_2

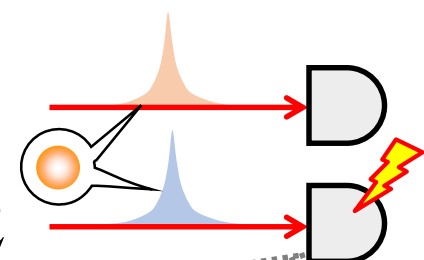
約 ϵ^2 の確率で
光子を生成

光子検出

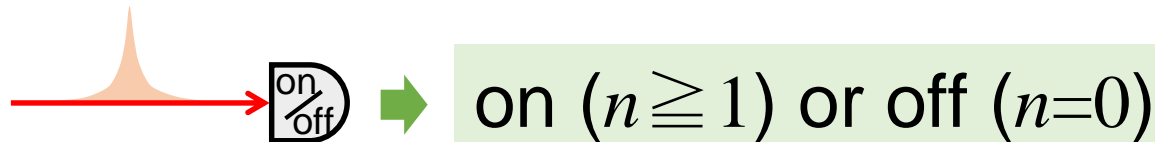
光子の量子ビットの測定

- 光子検出で $|0_L\rangle$ or $|1_L\rangle$ を測定

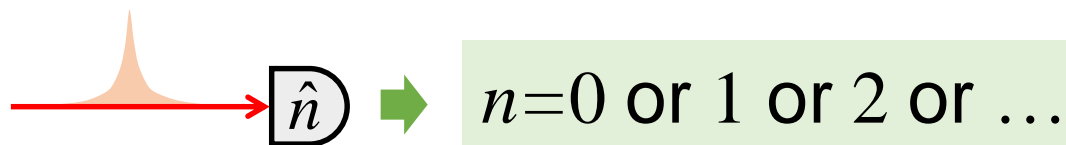
経路量子ビット

$$c_0|0_L\rangle + c_1|1_L\rangle = c_0|0\rangle_1|1\rangle_2 + c_1|1\rangle_1|0\rangle_2$$


- ① On/off検出器 = 光子数「0」か「1以上」への射影測定
(例: アバランシェフォトダイオード、光電子増倍管)



- ② 光子数識別器 = 光子数が確定した状態への射影測定
(例: 超伝導転移端センサー)



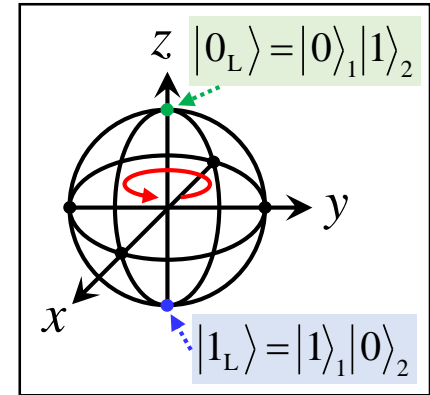
1量子ビットに対する操作

- ①②で任意の1量子ビットゲートが可能 [Nature 409, 46 (2001)]

①位相シフト

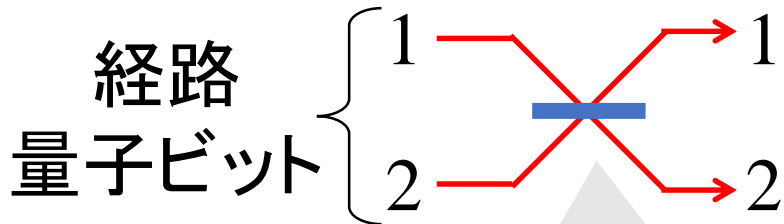
= 光路長の違いで位相がずれる

経路 量子ビット	$\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ --- } \boxed{\varphi} \text{ --- } 1 \\ 2 \text{ --- } \text{---} \text{---} \text{---} 2 \end{array} \right.$	$ 0\rangle_1 1\rangle_2 \rightarrow 0\rangle_1 1\rangle_2$
		$ 1\rangle_1 0\rangle_2 \rightarrow e^{i\varphi} 1\rangle_1 0\rangle_2$



⇒ Bloch球上でz軸回転ゲート

②ビームスプリッタ = 入射光の一部を反射、残りを透過



反射率 $\cos^2\theta$

$ 0\rangle_1 1\rangle_2 \rightarrow \cos\theta 0\rangle_1 1\rangle_2 - \sin\theta 1\rangle_1 0\rangle_2$
$ 1\rangle_1 0\rangle_2 \rightarrow \sin\theta 0\rangle_1 1\rangle_2 + \cos\theta 1\rangle_1 0\rangle_2$

⇒ Bloch球上でy軸回転ゲート

1量子ビットに対する操作

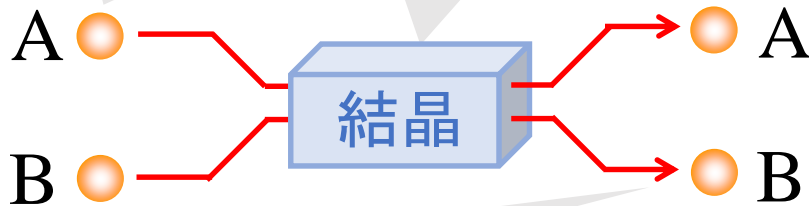
- 2量子ビットゲートには以下の③の相互作用が必要

③光カー効果 (3次の非線形光学効果)

= 物質の屈折率が光強度で変化

光子Aが入射

屈折率変化



光子Bに180°位相シフト

光子間の相互作用で位相シフト

$$|0\rangle_A |0\rangle_B \rightarrow |0\rangle_A |0\rangle_B$$

$$|1\rangle_A |0\rangle_B \rightarrow |1\rangle_A |0\rangle_B$$

$$|0\rangle_A |1\rangle_B \rightarrow |0\rangle_A |1\rangle_B$$

$$|1\rangle_A |1\rangle_B \rightarrow -|1\rangle_A |1\rangle_B$$

⇒この応用で経路量子ビットの2量子ビットゲートが作れる
(しかし、光子1個レベルで180°位相シフトを生むほど
強い3次の非線形性を持つ媒質はない)

2量子ビットに対する操作

- 「補助光子 + 光子検出」による確率的な非線形変換の手法

[Nature 409, 46 (2001)]

- Nonlinear Sign Shift gate: 成功確率 1/4

$$\alpha|0\rangle_A + \beta|1\rangle_A + \gamma|2\rangle_A$$

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \pi/8 \\ \theta_2 &= \arccos(\sqrt{2}-1) \\ \theta_3 &= -\pi/8\end{aligned}$$

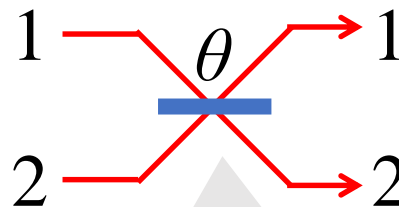
NSS

$$\alpha|0\rangle_A + \beta|1\rangle_A - \gamma|2\rangle_A$$

光子数1

光子数0

ビームスプリッタ



反射率 $\cos^2\theta$

2量子ビットに対する操作

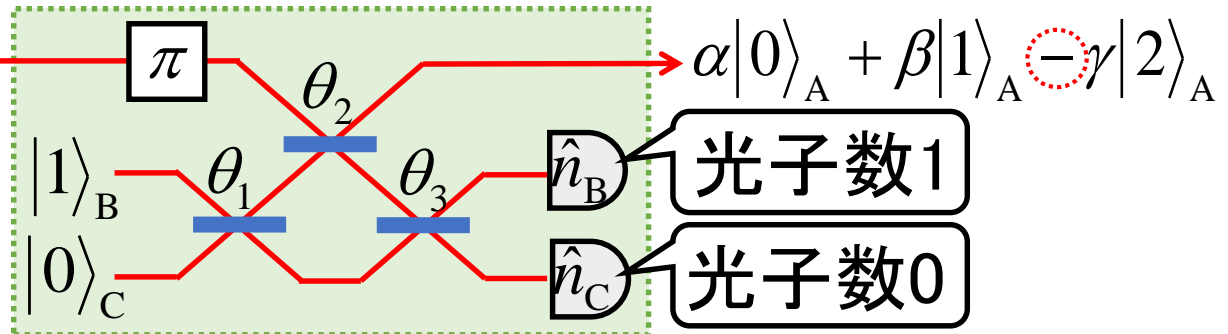
- 「補助光子 + 光子検出」による確率的な非線形変換の手法

[Nature 409, 46 (2001)]

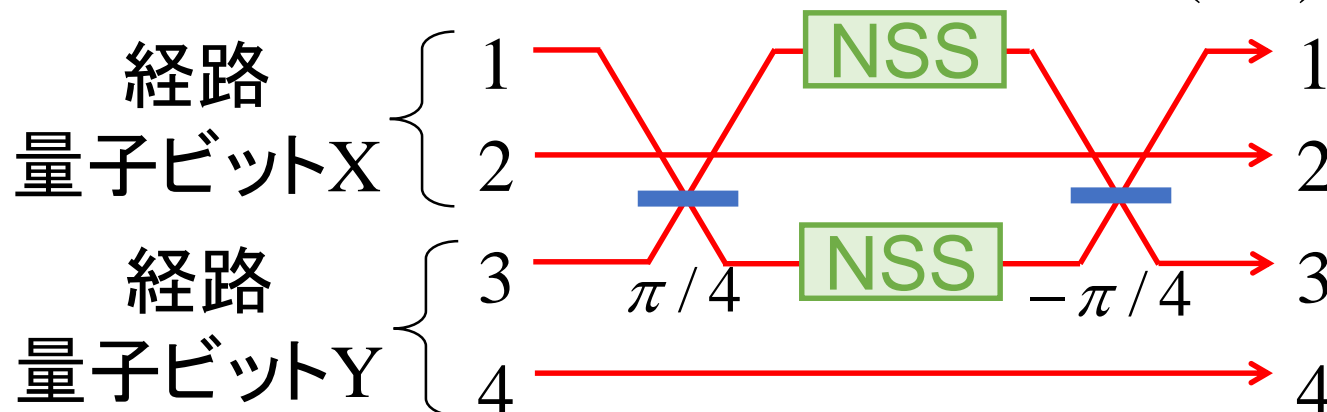
- Nonlinear Sign Shift gate: 成功確率 1/4

$$\alpha|0\rangle_A + \beta|1\rangle_A + \gamma|2\rangle_A \rightarrow \alpha|0\rangle_A + \beta|1\rangle_A - \gamma|2\rangle_A$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \pi/8 \\ \theta_2 &= \arccos(\sqrt{2}-1) \\ \theta_3 &= -\pi/8 \end{aligned}$$



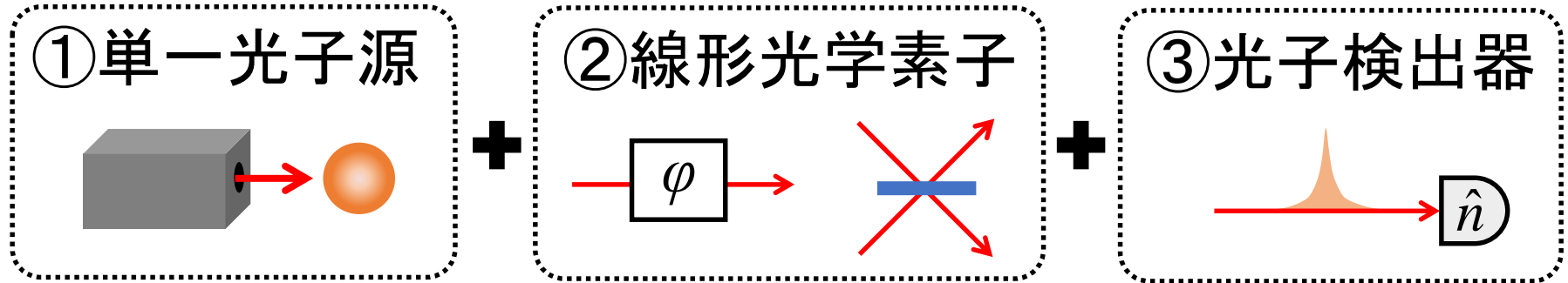
- 2量子ビット間の制御Zゲート: 成功確率 $(1/4)^2 = 1/16$



- 補助光子数 & 光子検出数 $\rightarrow \infty$ で成功確率 $\rightarrow 1$

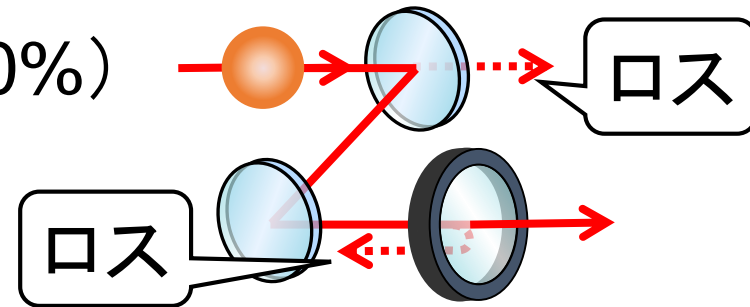
大規模化のアプローチと課題

- 「線形光学量子計算」の手法 [Nature 409, 46 (2001)]



⇒原理的には効率よく光量子コンピュータが実装可能
 (しかし現状は単一光子源も2量子ビットゲートも**確率的**)

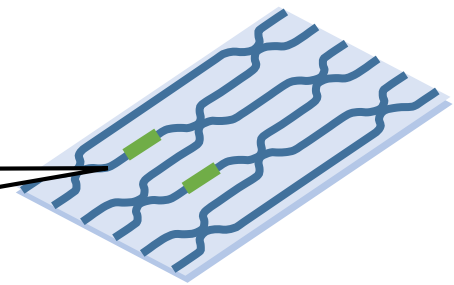
- 最大のエラー要因は**光のロス** ($\geq 10\%$)



- 光回路の集積化は必須

[Nature Photonics 14, 273 (2020)]

量子光源・回路・検出器を1チップに



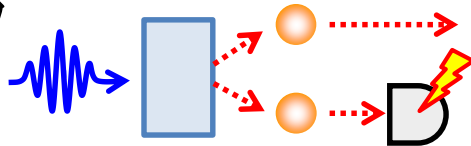
量子ビット編・まとめ

- 利点: ①通信可能 ②室温大気中で動作 ③高速動作

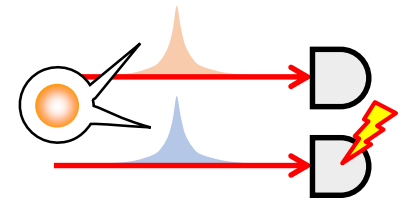
- 量子ビットの情報表現: $\alpha|0_L\rangle + \beta|1_L\rangle = \alpha|0\rangle_A|1\rangle_B + \beta|1\rangle_A|0\rangle_B$

- 状態生成・検出技術 **確率的**

パラメトリック
下方変換

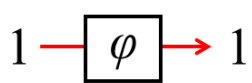


光子検出



- ゲートの実装技術

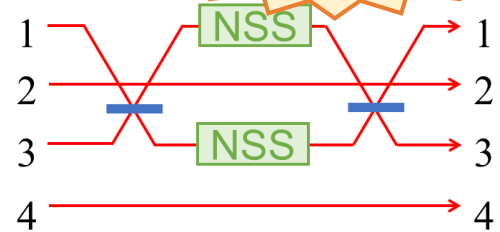
位相
シフト



ビーム
スプリッタ



2量子
ビット
ゲート



確率的

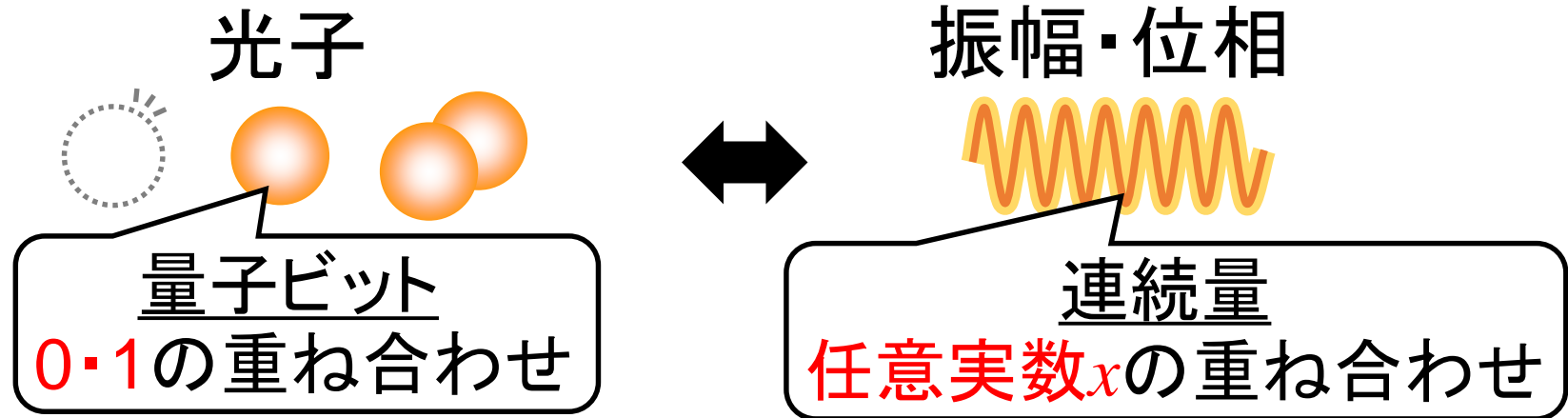
- 拡張性: 「線形光学量子計算」で拡張可能、チップ化も鍵
- 課題: 光のロス・光子生成や2量子ビットゲートが確率的

光量子コンピュータ

1. 自己紹介と講義概要
2. 光量子コンピュータ基礎・量子ビット編
- 3. 光量子コンピュータ基礎・連続量編**
4. 最先端トピックス紹介

導入

- 光の「連続量」とは？



- なぜ「連続量」を使う？

① 高い情報処理効率

量子ビットだと確率的だが、連続量だと確率1の要素あり

② 無限次元の大きな自由度

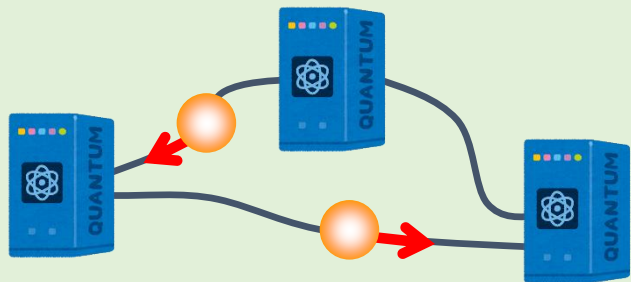
量子ビットにできない情報処理ができ、有利な場合あり

⇒元々量子ビットが主流だが、近年連続量に注目が集まる

導入

• 光連続量の特徴(量子ビットと同じ)

①空間を光速で移動



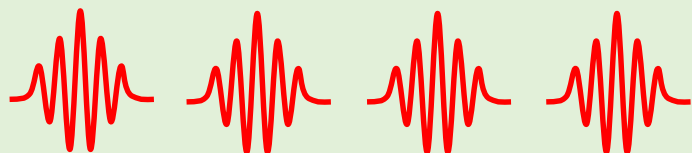
◎通信に最適

②常温・大気中で量子性を保持



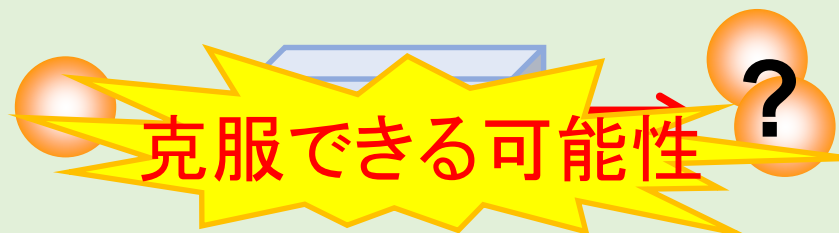
◎特殊環境が不要

③高速な情報処理




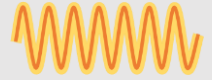
◎高クロックのゲート操作

④光の非線形な変換が難しい

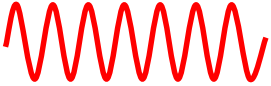


△実現が難しいゲートが存在

光を用いた連続量の表現

	量子ビット 	連続量 
物理量	光子数 $\hat{n} = \hat{a}^\dagger \hat{a}$ (光子の生成・消滅演算子)	直交位相振幅 $\hat{x} = (\hat{a} + \hat{a}^\dagger) / \sqrt{2}$, $\hat{p} = (\hat{a} - \hat{a}^\dagger) / i\sqrt{2}$
基底	$\hat{n} n\rangle = n n\rangle$ $ 0\rangle, 1\rangle, 2\rangle, \dots$	$\hat{x} x\rangle = x x\rangle$ or $\hat{p} p\rangle = p p\rangle$ $\{ x\rangle x \in \mathbb{R}\}$ or $\{ p\rangle p \in \mathbb{R}\}$
情報	$ \psi\rangle = c_0 0\rangle 1\rangle + c_1 1\rangle 0\rangle$	$ \psi\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) x\rangle dx = \sum_{n=0}^{\infty} c_n n\rangle$

古典電磁波

量子化 $E(z, t) = i\varepsilon \left(\alpha e^{i(kz - \omega t)} - \alpha^* e^{-i(kz - \omega t)} \right)$  $\rightarrow z$

量子化 $\hat{E}(z, t) = i\varepsilon \left(\hat{a} e^{i(kz - \omega t)} - \hat{a}^\dagger e^{-i(kz - \omega t)} \right)$ $[[\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1]$

$= -\sqrt{2}\varepsilon (\hat{x} \sin(kz - \omega t) + \hat{p} \cos(kz - \omega t))$ $[[\hat{x}, \hat{p}] = i]$

$\Rightarrow \hat{x}, \hat{p}$ は sin成分と cos成分の振幅に相当

$|x=0\rangle$ を生成可能

光の $|x=0\rangle$ 状態の生成

- 量子ビット: パラメトリック下方変換で光子を生成

2次の非線形光学結晶
(BBO, KTP, etc.)

弱いポンプ光 
 $\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$



ω_1

ω_2

ポンプ強度 $\rightarrow 0$ ($\varepsilon \rightarrow 0$)

$$|0\rangle_1 |0\rangle_2 + \varepsilon |1\rangle_1 |1\rangle_2 + \cancel{\varepsilon^2 |2\rangle_1 |2\rangle_2} + \dots$$

約 ε^2 の確率で
光子を生成

 光子検出

- 連続量: パラメトリック下方変換でスクイーズド光を生成

[arXiv:1401.4118]

2次の非線形光学結晶
(BBO, KTP, etc.)

強いポンプ光 
 $\omega_0 = 2\omega_1$



ω_1

スクイーズド光

$$|0\rangle - \varepsilon/\sqrt{2} |2\rangle + \sqrt{6}\varepsilon^2/4 |4\rangle + \dots$$

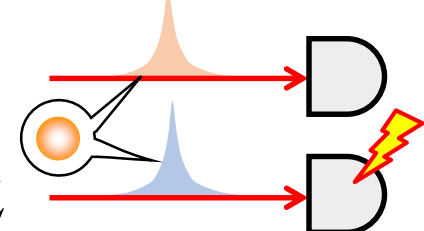
ポンプ強度 $\rightarrow \infty$ ($\varepsilon \rightarrow 1$) $\rightarrow |x=0\rangle$

確率1でスクイーズド光
を生成

光の連続量の測定

- 量子ビット: 光子検出で $|0_L\rangle$ or $|1_L\rangle$ を測定

経路量子ビット

$$c_0|0_L\rangle + c_1|1_L\rangle = c_0|0\rangle_1|1\rangle_2 + c_1|1\rangle_1|0\rangle_2$$


- 連続量: ホモダイン測定で直交位相振幅 \hat{x}, \hat{p} を測定

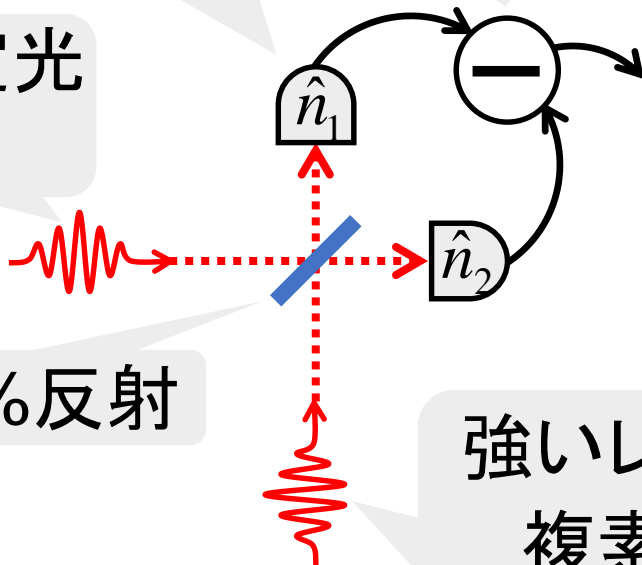
[arXiv:1401.4118]

② 光強度測定

③ 引き算

LO光の振幅倍信号を増幅

被測定光
 \hat{x}, \hat{p}



$$\hat{n}_2 - \hat{n}_1 = \sqrt{2}|\alpha|(\hat{x} \cos \theta + \hat{p} \sin \theta)$$

LO光の位相 θ に応じた
直交位相振幅を測定

① 50%反射

強いレーザー光 (LO光)

$$\text{複素振幅: } \alpha = e^{i\theta}|\alpha|$$

量子モードに対する操作

- 連続量の量子計算では、光の直交位相振幅 \hat{x}, \hat{p} を制御
⇒ Heisenberg描像での記述が便利

Schrödinger描像

$$|\psi\rangle \xrightarrow{\hat{U}} \hat{U}|\psi\rangle$$

Heisenberg描像

$$\begin{array}{c} \hat{x} \\ \hat{p} \end{array} \xrightarrow{\hat{U}} \begin{array}{c} \hat{U}^\dagger \hat{x} \hat{U} \\ \hat{U}^\dagger \hat{p} \hat{U} \end{array}$$

状態が変化

$$\langle \psi | \hat{U}^\dagger \hat{x} \hat{U} | \psi \rangle$$

測定

演算子が変化
(状態は不変)

例：位相シフト： $\hat{U} = \exp(-i\varphi\hat{n}) = \exp(-i\varphi(\hat{x}^2 + \hat{p}^2 - 1)/2)$

$$\hat{x} \rightarrow \hat{U}^\dagger \hat{x} \hat{U} = \hat{x} \cos \varphi + \hat{p} \sin \varphi$$

$$\hat{p} \rightarrow \hat{U}^\dagger \hat{p} \hat{U} = -\hat{x} \sin \varphi + \hat{p} \cos \varphi$$

線形

任意の量子計算 = 任意の線形変換 (expの中が \hat{x}, \hat{p} の2次以下) + 非線形変換1個 (expの中が \hat{x}, \hat{p} の3次以上)

量子モードに対する操作

- ①～④で任意の1モード操作が可能

①位相シフト



$$\hat{U} = \exp(-i\varphi\hat{n})$$

$$\begin{aligned}\hat{x} &\rightarrow \hat{x} \cos \varphi + \hat{p} \sin \varphi \\ \hat{p} &\rightarrow -\hat{x} \sin \varphi + \hat{p} \cos \varphi\end{aligned}$$

線形

②変位操作



$$\hat{U} = \exp(ip_0\hat{x} - ix_0\hat{p})$$

$$\begin{aligned}\hat{x} &\rightarrow \hat{x} + x_0 \\ \hat{p} &\rightarrow \hat{p} + p_0\end{aligned}$$

線形

③スクイーズ操作

2次の非線形
光学効果



$$\hat{U} = \exp(ir(\hat{x}\hat{p} + \hat{p}\hat{x})/2)$$

$$\begin{aligned}\hat{x} &\rightarrow e^{-r}\hat{x} \\ \hat{p} &\rightarrow e^{+r}\hat{p}\end{aligned}$$

線形

④3次位相ゲート

3次の非線形
光学効果



$$\hat{U} = \exp(i\gamma\hat{x}^3)$$

$$\begin{aligned}\hat{x} &\rightarrow \hat{x} \\ \hat{p} &\rightarrow \hat{p} + 3\gamma\hat{x}^2\end{aligned}$$

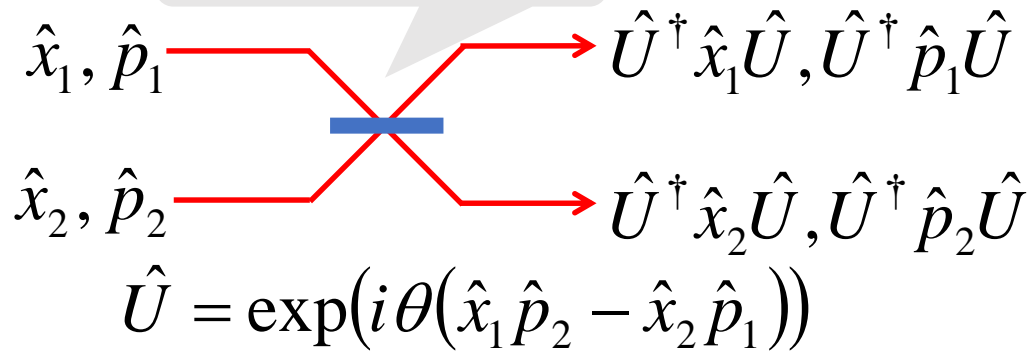
非線形

量子モードに対する操作

- 「前の1モード操作①～④」+「以下の2モード相互作用⑤」
= 任意の連続量量子計算が可能 [Rev. Mod. Phys. 77, 513 (2005)]

⑤ビームスプリッタ相互作用

反射率 $\cos^2\theta$



$$\hat{x}_1 \rightarrow \hat{x}_1 \cos \theta + \hat{x}_2 \sin \theta$$

$$\hat{p}_1 \rightarrow \hat{p}_1 \cos \theta + \hat{p}_2 \sin \theta$$

$$\hat{x}_2 \rightarrow -\hat{x}_1 \sin \theta + \hat{x}_2 \cos \theta$$


$$\hat{p}_2 \rightarrow -\hat{p}_1 \sin \theta + \hat{p}_2 \cos \theta$$

線形

量子モードに対する操作

- 3次位相ゲートは困難 (3次の非線形光学効果は弱い)

3次の非線形
光学効果

$$\hat{U} = \exp(i\gamma\hat{x}^3)$$


$$\begin{aligned}\hat{x} &\rightarrow \hat{x} \\ \hat{p} &\rightarrow \hat{p} + 3\gamma\hat{x}^2\end{aligned}$$

非線形

⇒ 入力状態を補助状態と相互作用させ、測定誘起で
3次位相ゲートを行う手法の提案 [Phys. Rev. A **64**, 012310 (2001)]

入力状態

$$|\psi\rangle_1$$

線形

$$e^{i\hat{x}_1\hat{p}_2}$$

$$e^{-i\gamma(3q\hat{x}_1^2 + 3q^2\hat{x}_1)}$$

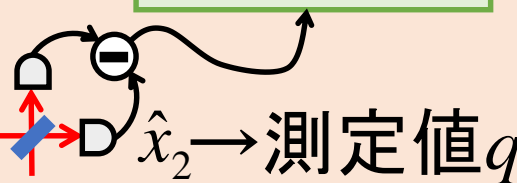
出力状態

$$\exp(i\gamma\hat{x}_1^3)|\psi\rangle_1$$

非線形 補助状態

$$\exp(i\gamma\hat{x}_2^3)|p=0\rangle_2$$

非線形

$$\hat{x}_2 \rightarrow \text{測定値 } q$$


確率的手法で生成し、量子メモリに保存しておけばOK

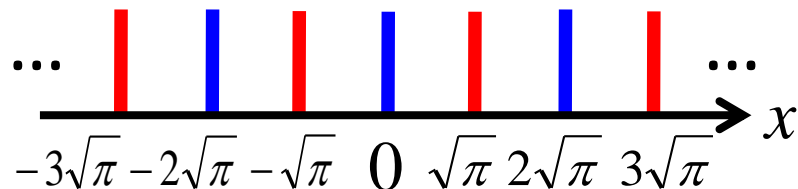
⇒ 非線形ゲートが難しいという光の欠点を克服できる可能性

大規模化のアプローチと課題

- 連続量をそのまま利用した量子アルゴリズムもあるが、「連続量空間の中に誤り訂正可能な量子ビットをコード」するアプローチが有力(ただし実現手法は課題)

例: GKP code

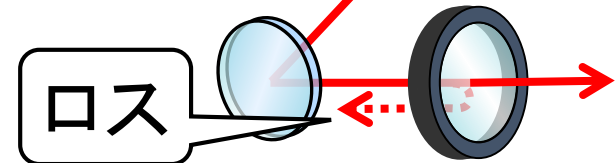
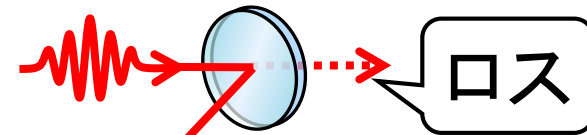
Phys. Rev. A **64**, 012310 (2001)



$$|0_L\rangle \propto \sum_{s=-\infty}^{+\infty} |x = 2s\sqrt{\pi}\rangle$$

$$|1_L\rangle \propto \sum_{s=-\infty}^{+\infty} |x = (2s+1)\sqrt{\pi}\rangle$$

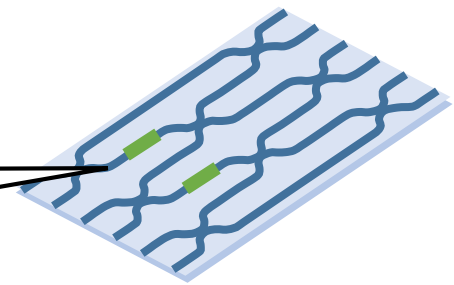
- 最大のエラー要因は光のロス(≧10%)



- 光回路の集積化は必須

[Nature Photonics **14**, 273 (2020)]

量子光源・回路・検出器を1チップに



連続量編・まとめ

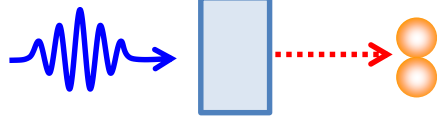
- 利点: ①量子ビットより高効率処理 ②無限次元の自由度

- 連続量の情報表現: $|\psi\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x)|x\rangle dx$

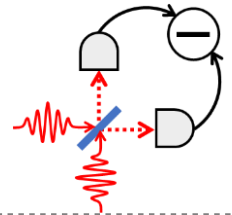
- 状態生成・検出技術

↑電場の直交位相振幅

パラメトリック
下方変換

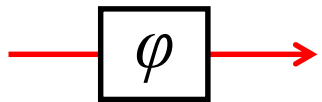


ホモダイン測定



- ゲートの実装技術

位相シフト



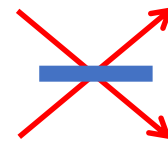
変位操作



スクイーズ

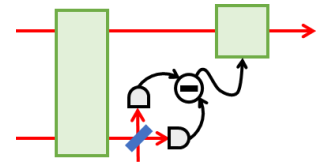


BS



確率的

3次位相



確率的

- 拡張性: 連続量空間に量子ビットをコード、チップ化も鍵

- 課題: 光のロス・状態生成や3次位相ゲートが確率的

光量子コンピュータ

1. 自己紹介と講義概要
2. 光量子コンピュータ基礎・量子ビット編
3. 光量子コンピュータ基礎・連続量編
- 4. 最先端トピックス紹介**

最先端トピックス紹介

「量子超越性」の実証

※図を削除

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

光回路チップ化技術の進展

※図を削除

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

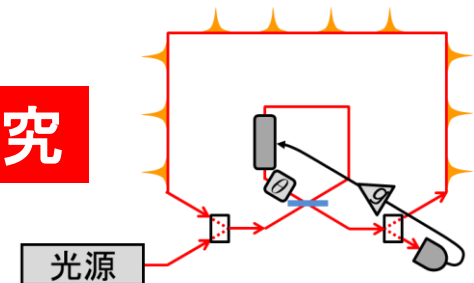
大規模量子もつれ生成

※図を削除

25000光パルスの量子もつれ
Science **370**, 1460 (2019)

ループ型光量子コンピュータ

我々の研究



最小回路で大規模計算が可能に

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

1. 「量子超越性」の実証

2019年・Googleによる超伝導を用いた「量子超越性」

- ・最先端スパコンで1万年の計算を200秒で実行
- ・ランダム量子回路サンプリング(量子ビット53個)

Nature **574**, 505 (2019)

※図を削除

2020年・中国による光を用いた「量子超越性」

- ・最先端スパコンで6億年の計算を200秒で実行
- ・ガウシアンボソンサンプリング(スクイーズド光50本・光路100本)

※図を削除

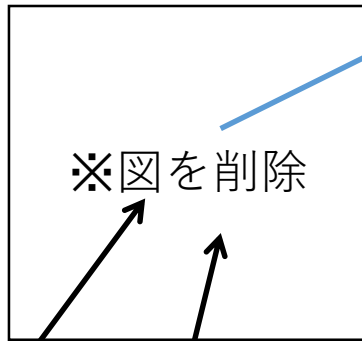
※図を削除

Science **370**, 1460 (2020)

2. 光回路チップ化技術の進展

チップの原理

Silica doped with
germanium & boron oxides



Nature Photonics **3**, 346 (2009)

コアとクラッドの屈折率差を利用して光を閉じ込める

量子ビット向けチップ



連続量向けチップ



<https://physicsworld.com/a/programmable-photonic-chip-lights-up-quantum-computing/>

光子対源16個搭載・550個の素子

Science **360**, 285 (2018)

スクイーズド光源搭載・8モード

Nature **591**, 54 (2020)

3. 大規模量子もつれ生成

東大の実験

※図を削除

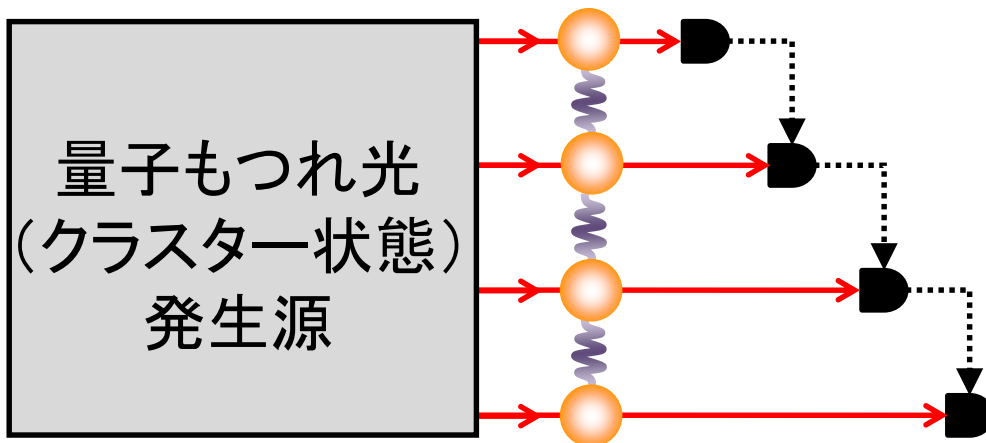
5 × 5000光パルスの量子もつれ
Science **366**, 373 (2019)

デンマーク工科大の実験

※図を削除

24 × 1250光パルスの量子もつれ
Science **366**, 369 (2019)

大規模量子もつれを作る背景：測定型量子計算



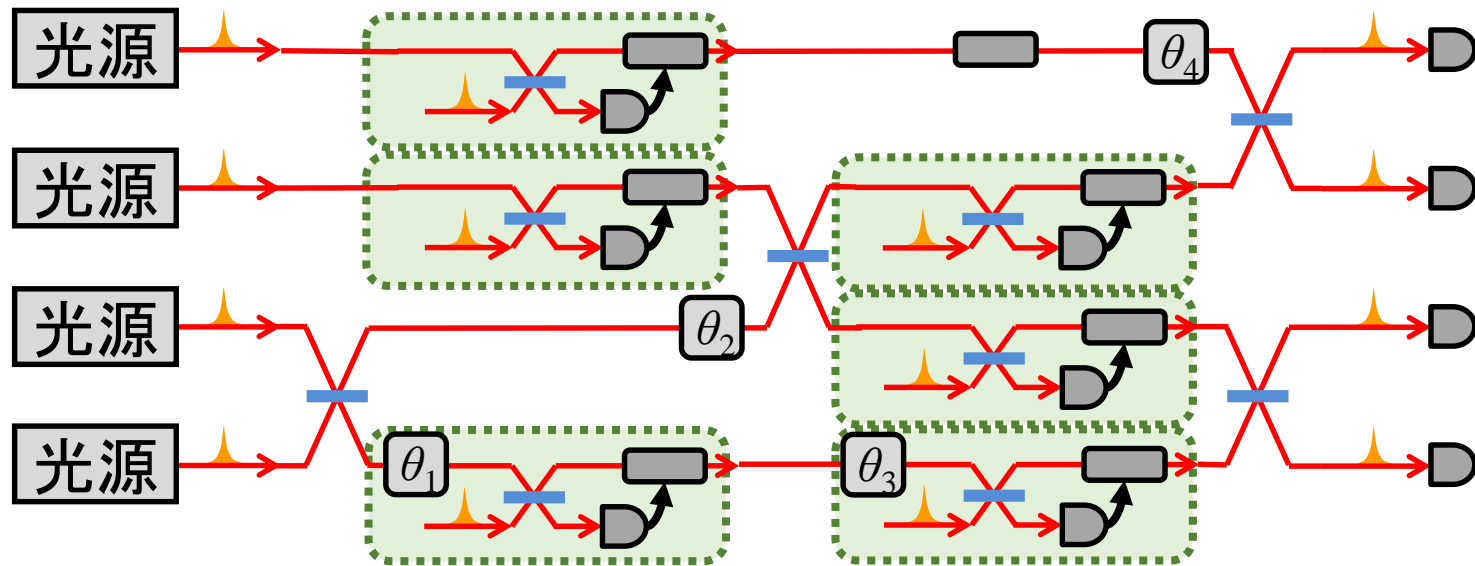
大規模量子もつれを作り
測定の連鎖で計算を実行

Phys. Rev. Lett. **86**, 5188 (2001)

4. ループ型光量子コンピュータ

従来方式

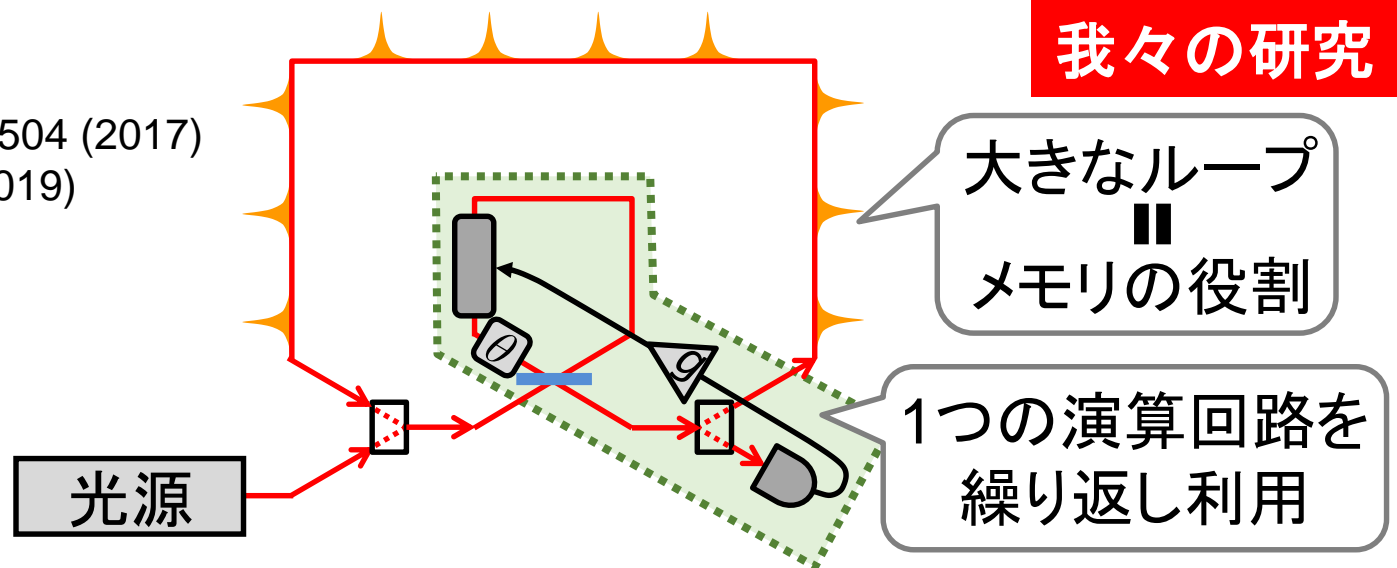
拡張性 ×
汎用性 ×



ループ方式

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

拡張性 ◎
汎用性 ◎



我々の研究

大きなループ
||
メモリの役割

1つの演算回路を
繰り返し利用

光量子コンピュータの総まとめ

光に注目する理由は？

独特の利点



特有の
アプローチ

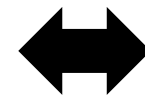
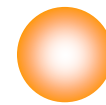
- ①通信可能
- ②室温大気中
- ③高速動作

- ・量子超越？
- ・大規模化？
- ・日本がリード？

実現方法や課題は？

基本構成 { ①光で情報を表す
②光回路で処理
③光検出器

量子ビット 連続量



⇒課題はロスや確率的要素

もっと勉強したい！



実際に研究したい！

武田へメール

takeda@ap.t.u-tokyo.ac.jp

⇒限定公開の研究室
紹介動画も観れます！