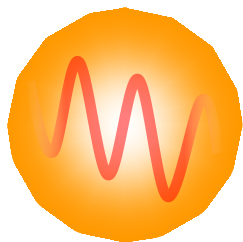




Q-LEAP 人材育成プログラム  
量子技術教育のためのオンラインコース・サマースクール開発プログラム

*Hamiltonian*



# 光・量子計算 (量子ビット)

---

東京大学  
武田 俊太郎

$|0\rangle + |1\rangle$

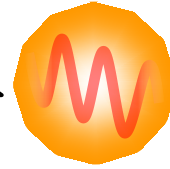
# 1. 導入

- 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

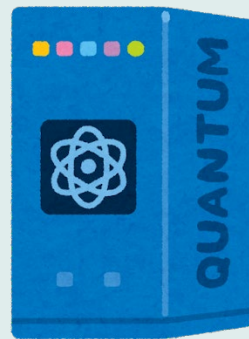
- 1980年代中頃～：様々な量子情報処理への応用

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

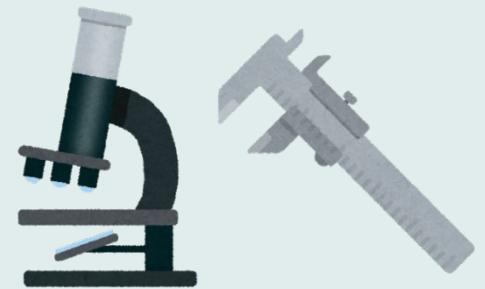
量子暗号



量子計算



量子計測

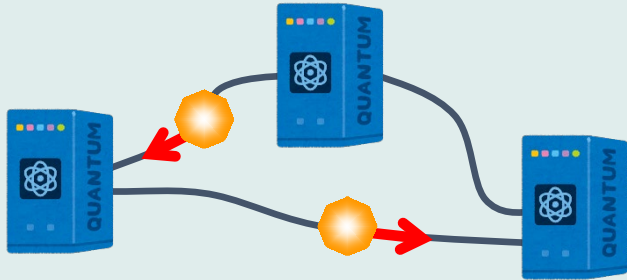


⇒光は今でも量子技術の中心的役割を担う

# 1. 導入

## ● 光量子ビットの特徴

① 空間を光速で移動



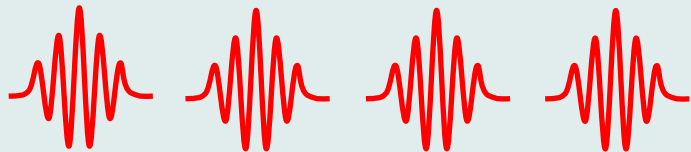
◎ 通信に最適

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

# 2. 量子ビット

- 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

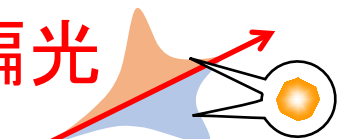
◎ 光のロスにロバスト (ロスで  $|0\rangle_A |0\rangle_B$  に変化し区別可能)

## 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

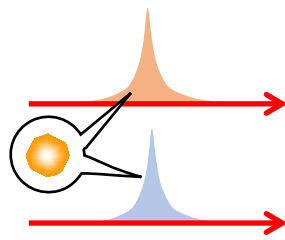


## ② 経路量子ビット

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

経路1

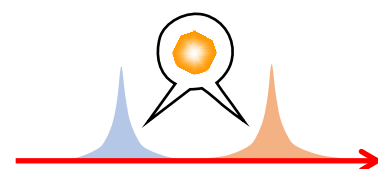
経路2



## 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



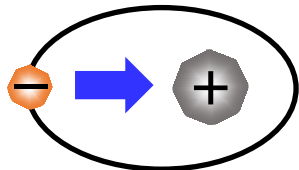
①~③は相互変換可能⇒以後は②で議論

# 3. 初期化

- 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.)

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

ポンプ強度 → 0 ( $\epsilon \rightarrow 0$ )

弱いポンプ光

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

$\omega_1$

$\omega_2$

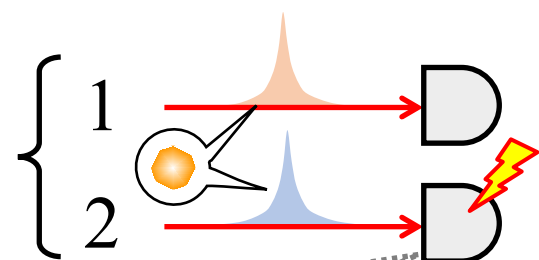
約  $\epsilon^2$  の確率で  
光子を生成

光子検出

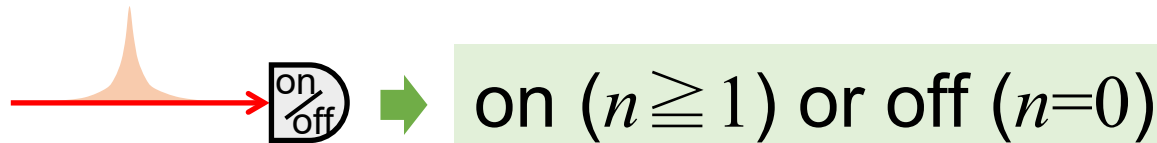
# 4. 測定

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

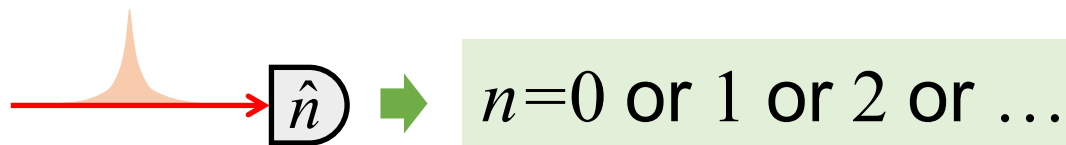
経路量子ビット

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


- 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)



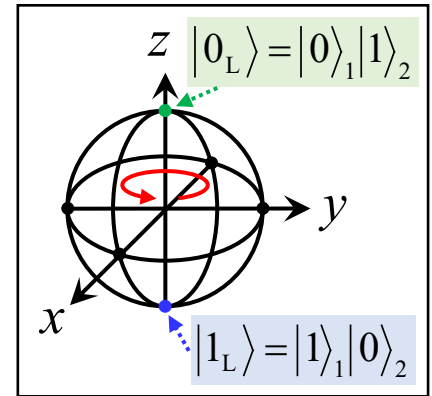
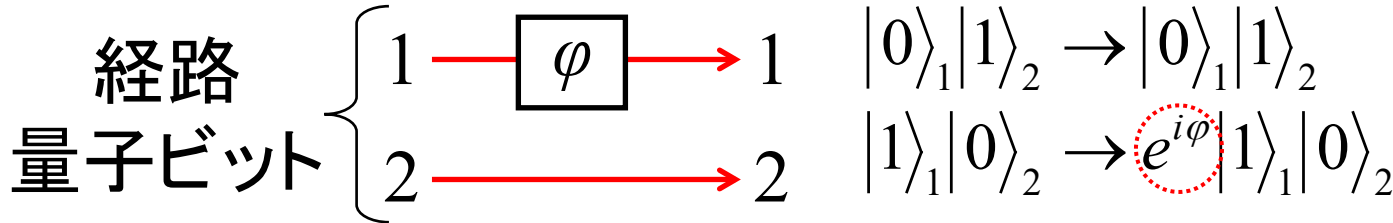
Rev. Sci. Instrum. **82**, 071101 (2011)

# 5. 制御方法

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

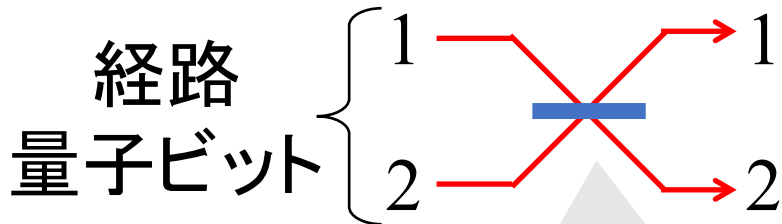
## ①位相シフト

= 光路長の違いで位相がずれる



⇒ 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

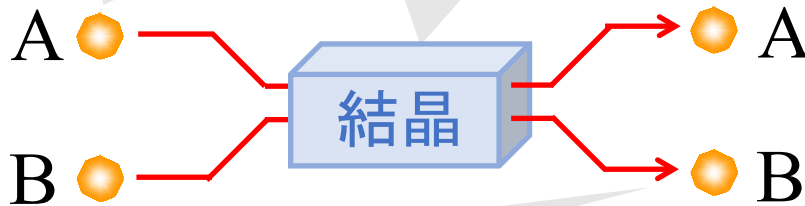
# 6. 量子ビット間相互作用

- 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)



# 6. 量子ビット間相互作用

- 「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

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

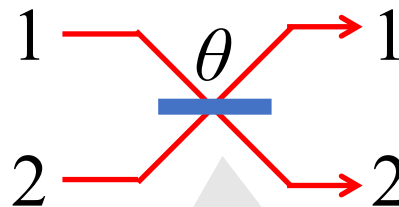
$$\begin{aligned}\theta_1 &= \pi/8 \\ \theta_2 &= \arccos(\sqrt{2}-1) \\ \theta_3 &= -\pi/8\end{aligned}$$

NSS

光子数1

光子数0

ビームスプリッタ

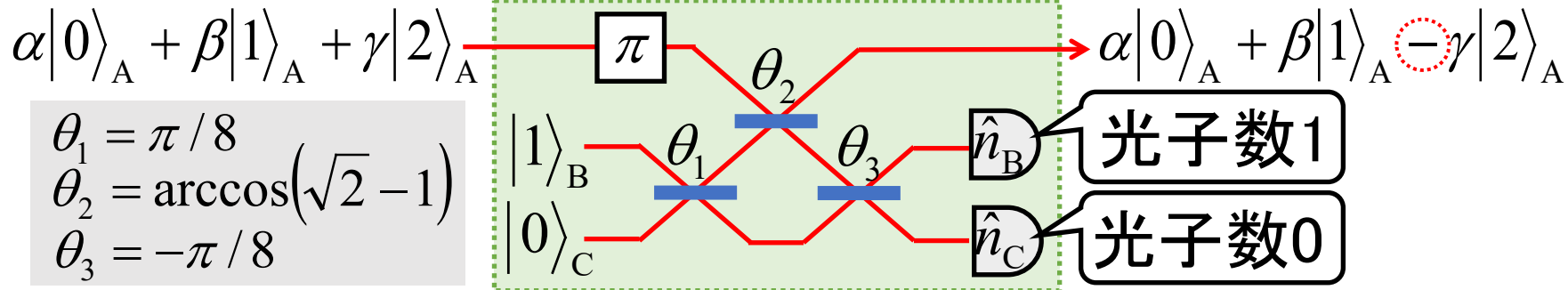


反射率  $\cos^2\theta$

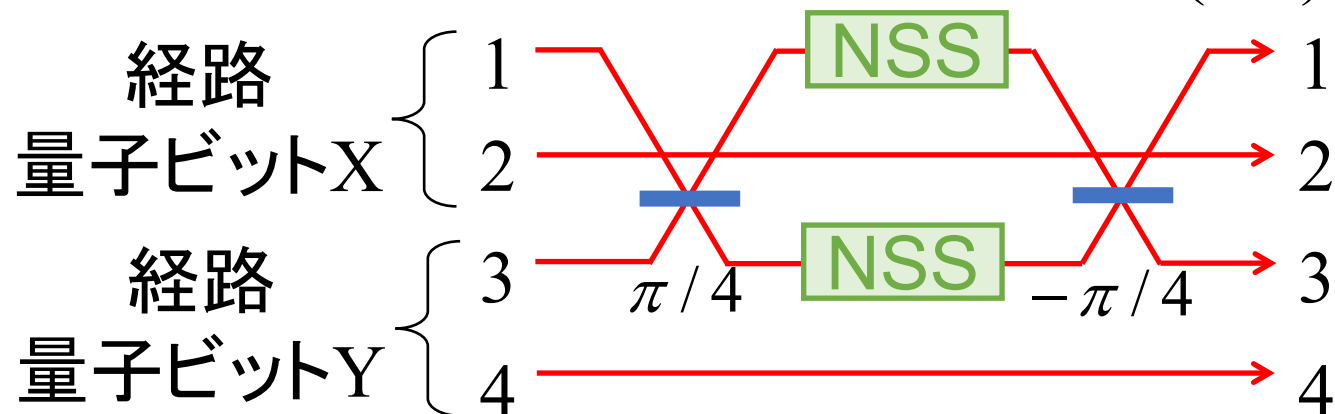
# 6. 量子ビット間相互作用

- 「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



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

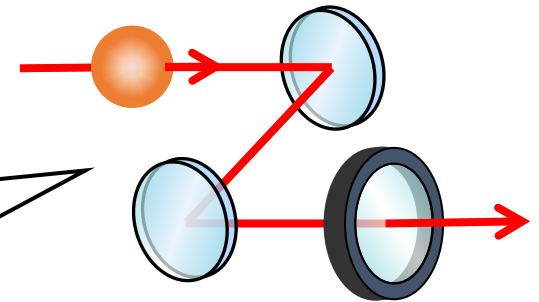


▪ 補助光子数 & 光子検出数  $\rightarrow \infty$  で成功確率  $\rightarrow 1$

# 7. 制御時間

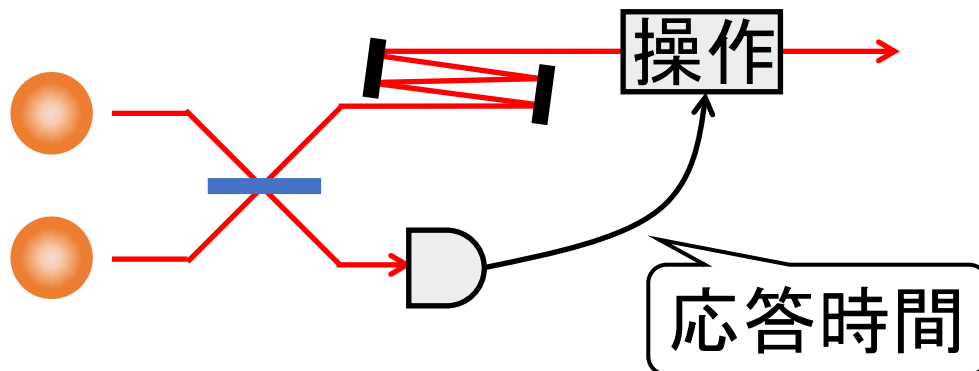
- 量子ビットの制御に要する時間  
= 1ゲート当たりの光回路の長さ

空間光学系だと数cm～数十cm  
⇒ **制御時間**  $\lesssim 1\text{ns}$   
(導波路チップだとより短い)



- 光子検出器の結果に応じた光子の操作が必要な場合  
⇒ 電気回路の応答時間で**数十ns以上**要する場合もある

[Nature 445, 65 (2007)]



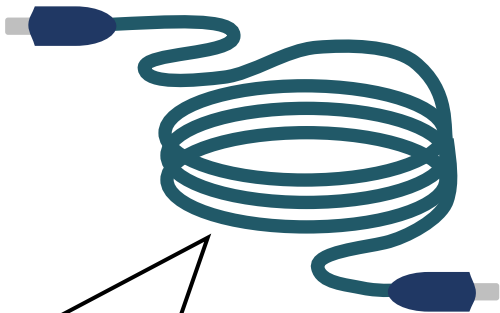
# 8. コヒーレンス時間

- 光子のエネルギーは大きく、環境の熱雑音は無視できる

プランク定数  $h \times$  周波数  $\nu$  (波長 800nm で  $2.5 \times 10^{-19} \text{J}$ )  $\gg$  ボルツマン定数  $k_B \times$  温度  $T$  (温度  $20^\circ\text{C}$  で  $4 \times 10^{-21} \text{J}$ )

- 光の最大のデコヒーレンス要因は光のロス

## 光ファイバ中

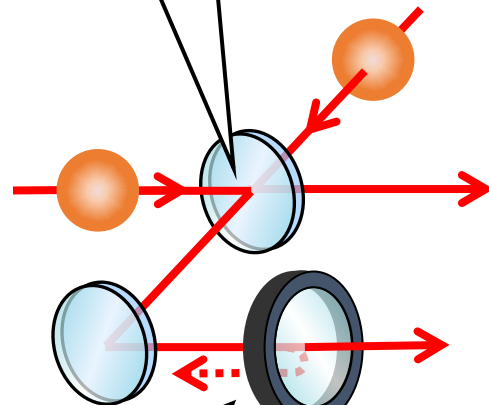


ロス  $\sim 0.2 \text{dB/km}$

コヒーレンス時間  
 $\sim 100 \mu\text{s}$

## 空間光学系

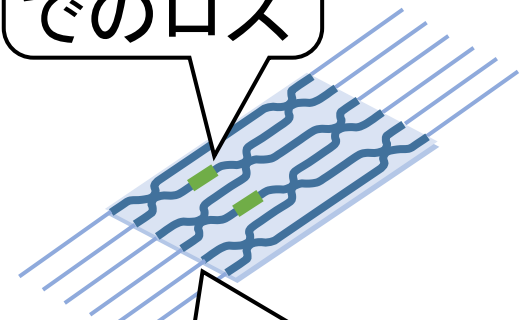
モードマッチ損失



反射ロス

## 導波路チップ

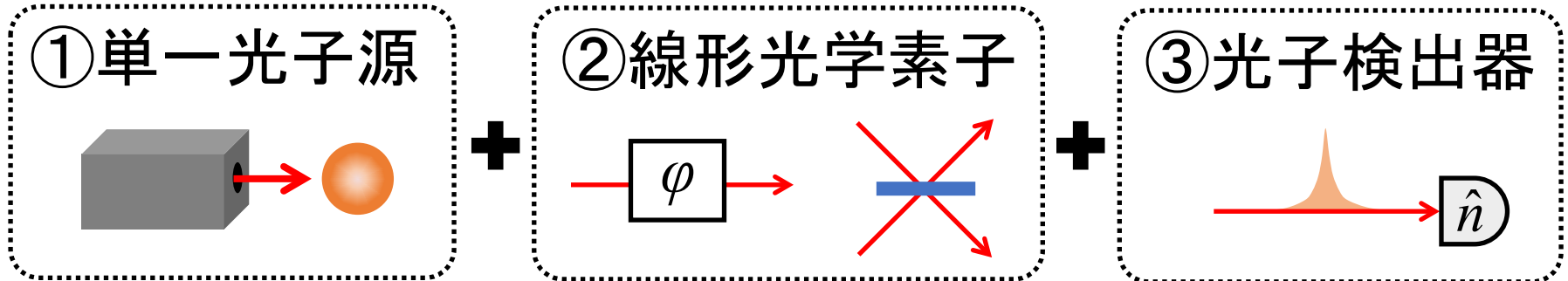
接合界面でのロス



ファイバとの  
結合損失

# 9. 拡張性

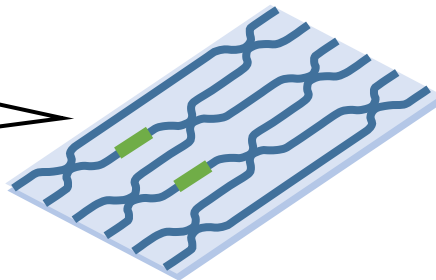
- 「線形光学量子計算」の手法 [Nature 409, 46 (2001)]



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

- 光回路の集積化による拡張性 [Nature Photonics 14, 273 (2020)]  
導波路チップ上に光子源・光回路・検出器を集積化可能  
(ただし計算規模 $\bigcirc$ だと回路規模 $\bigcirc$ なので工夫が必要)

全素子を集積化



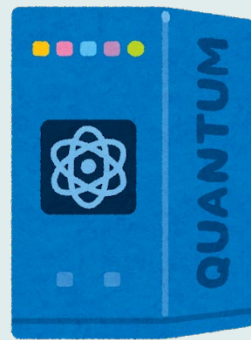
# 10. 応用およびその課題

- 幅広い量子技術への応用 [Nature Photonics 3, 687 (2009)]

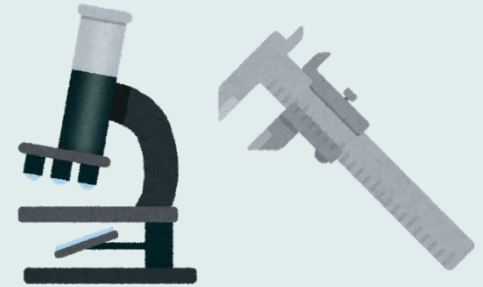
## 量子暗号



## 量子計算



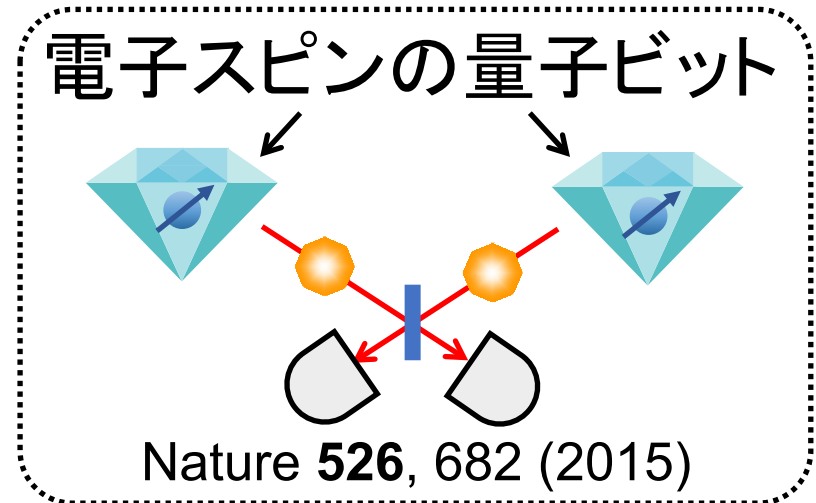
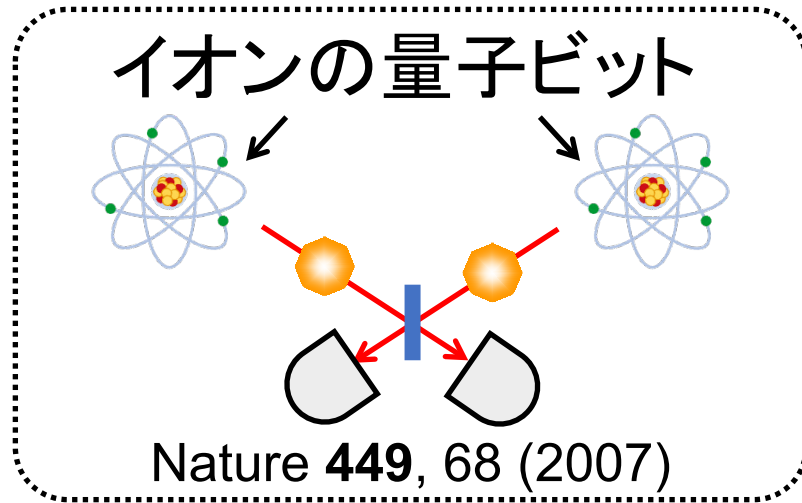
## 量子計測



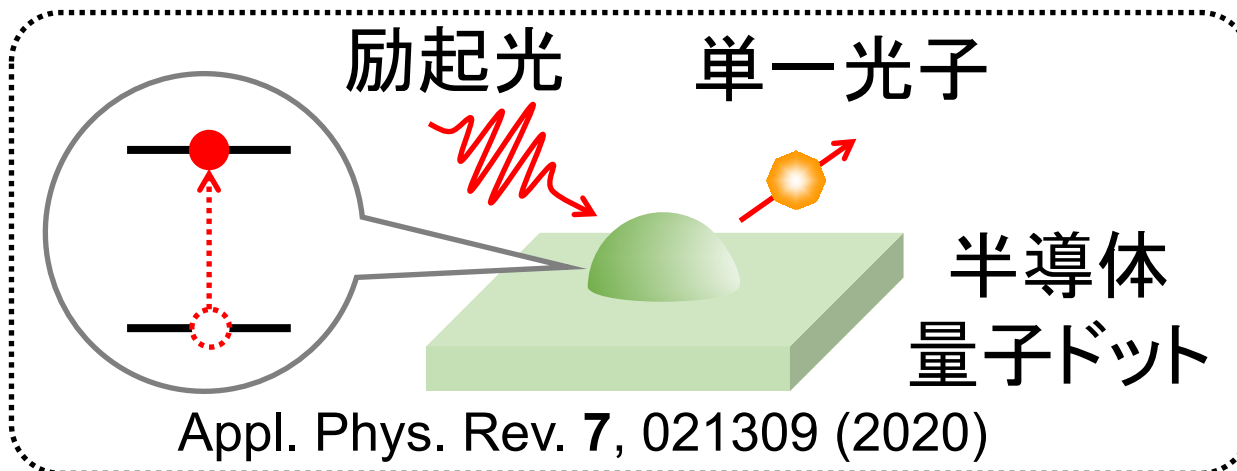
- 共通する課題
  - 光のロスをいかに乗り切るか？
  - 単一光子が確率1で生成できない
- 量子計算の課題
  - 2量子ビットゲートがまだ確率1で実現できていない

# 11. 他の分野とのつながり

- 空間を移動する光子の利点を用い、離れた量子系を接続



- 確率1の単一光子源としての量子ドット



## 12. より深く勉強したい方向けの文献

- 光子の発生や操作など光量子技術全般の短いレビュー  
S. Slussarenko & G. J. Pryde “Photonic quantum information processing: A concise review,” Appl. Phys. Rev. **6**, 041303 (2019)
- 線形光学量子計算についての丁寧な解説  
C. R. Myers & R. Laflamme, “Linear Optics Quantum Computation: an Overview,” arXiv:quant-ph/0512104 (2005)
- 光量子情報処理の教科書  
「新版 量子光学と量子情報科学」  
古澤明、武田俊太郎(サイエンス社、2020年)
- 光量子コンピュータの説明を含む一般向け書籍  
「量子コンピュータが本当にわかる！」  
武田俊太郎(技術評論社、2020年)