

#### いまから100年前

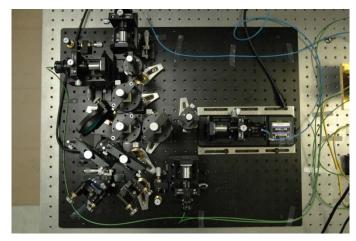
物質が原子・分子からできているとは分かっていなかったように、 光が「光子」からできているとは 思われていなかった。

#### そして現在

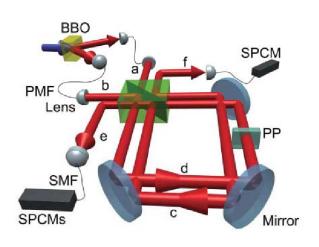
ナノテクノロジーにより、 個々の原子・分子の操作ができるように、 光子一つ一つの操作が 可能になってきた。



#### 光量子情報 光量子をつかって、情報を操る。

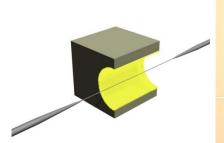


光量子コンピュータ・量子もつれ合い



量子計測(メトロロジー)

#### ナノフォトニクス光量子を、ナノテクで操る。



ナノ光ファイバ 回折限界での 光閉じこめ。

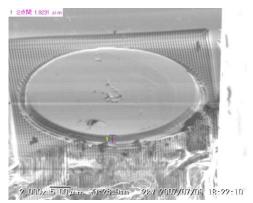


diameter: 178µm

微小球共振器 Q~10,000,000!



低温実験(4K)



ダイアモンド 微小共振器

#### Contents

- 第量子情報処理とその現状
- 光光子を用いた量子計算
- #量子制御ノットゲート
  - △2光子量子干渉を利用
- 出光量子回路「量子もつれ合いフィルター」
- #量子メトロロジーへの応用
  - △もつれ光子干渉で、標準量子限界を超える
- #まとめと今後の展望

## ひろがる 量子情報通信・処理



#### ∺量子情報通信・処理

#### 量子力学の基本的な性質

- 量子重ねあわせ状態
- 不確定性原理
- 量子もつれ合い

などを直接に用いる 新しい情報通信・処理

イオントラップ

単一光子(スクイーズド光)

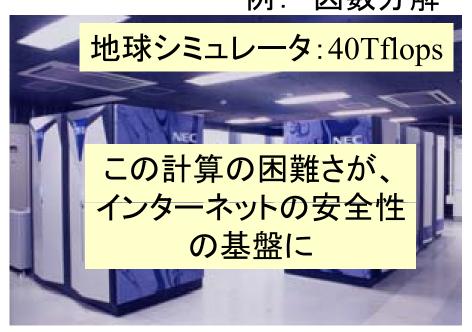
量子ドット

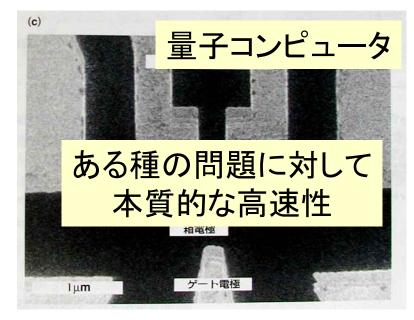
# 量子コンピュータ

桁数が増えると共に、計算時間が爆発的に増える問題

例: 因数分解

 $323 = 17 \times 19$ 





200桁 10年

1万桁 1000億年

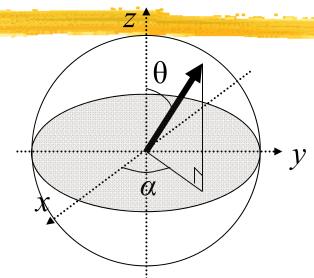
200桁 数分

1万桁 数時間

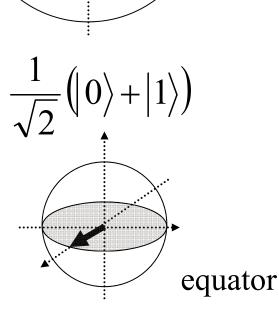
#### 量子ビット

#### #量子ビット

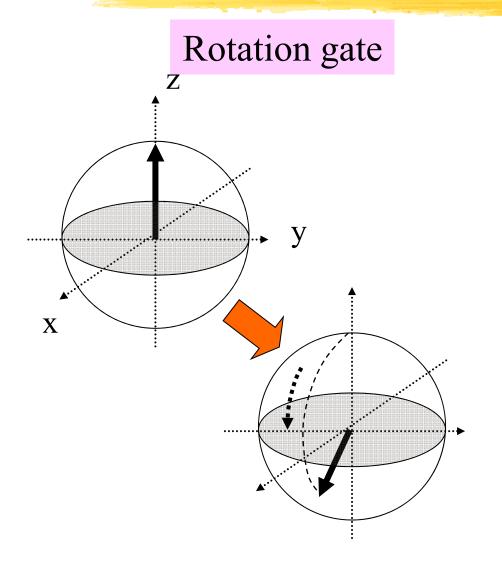
$$|a\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + \exp(i\alpha)\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$$



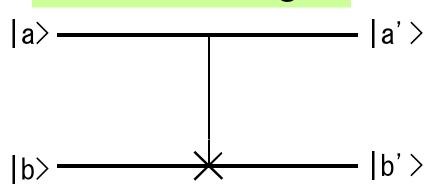
$$|a\rangle = |0\rangle \qquad |a\rangle = |1\rangle \qquad \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$



# 量子計算の基本ゲート

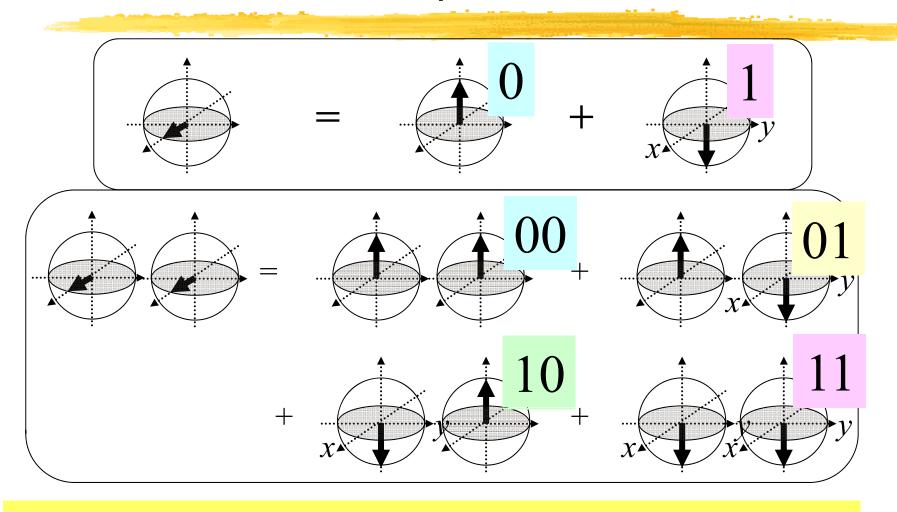


#### Controlled-Not gate



b>	a'> b'>
0>	0>  0>
1>	0>  1>
0>	1>  1>
1>	1>  0>
	0>  1>  0>

## Quantum parallelism



N qubit



Superposition of  $2^N$  different states

## 参考文献 ブルーバックス「量子コンピュータ」



第1章 量子計算でできること 第2章「量子」とはなにか 第3章 量子の不思議 第4章「量子」を使った計算機 第5章 量子アルゴリズム 第6章 実現にむけた挑戦 第7章 量子コンピュータの周辺に 広がる世界と量子暗号

#### Contents

- #量子情報処理とその現状
- 第光子を用いた量子計算
- #量子制御ノットゲート
  - △2光子量子干渉を利用
- 光光量子回路「量子もつれ合いフィルター」
- #量子メトロロジーへの応用
  - △もつれ光子干渉で、標準量子限界を超える

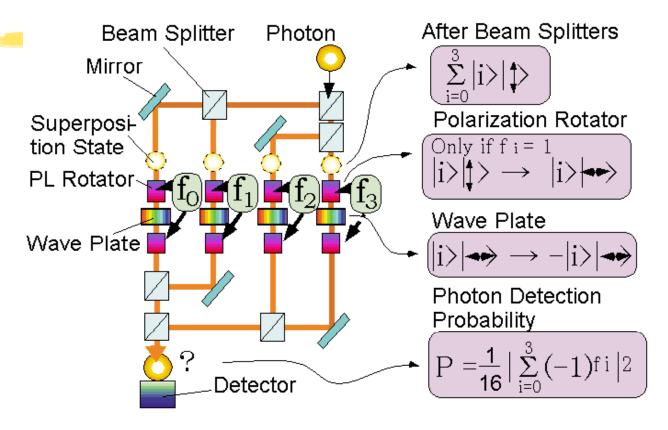
## 光子を用いた量子コンピュータ

- 〇 単一の量子の状態検出が比較的容易。
- 〇 長距離伝送が可能 (量子通信との融合)
  - × 2つの光子間の量子ゲート操作が困難 (単一光子レベルでの量子スイッチ)

## 光量子回路(小規模量子コンピュータ)

- ・量子鍵配布、量子通信に重要な役割
- →多光子もつれあい状態の生成
- →量子もつれ合いの純化

#### <u>Linear Optics Quantum Computation</u> <u>(previous version)</u>



We have performed a three-qubit Linear Optics QC (Deutsch-Jozsa) using linear optics.

(Theory: Takeuchi, Physcomp 96 (1996), experiment: PRA 61 052302 (2000))

Problems of previous idea: Exponential expansion of the scale.

#### **Quantum Computation using Linear Optics**

#### **Scalable Linear Optics QC using photons**

<u>Linear Optics QC using a single photon</u>

Exponential scale-up

Takeuchi, PhysComp96(1996),PRA 61 (2000) 052302

Cerf et.al, PRA57(1998)R1477, Kwiat et.al, J. Mod. Opt(2000)

#### <u>Using Q-Teleportation</u> Polynomial scale-up

Gottesman & Chuang, Nature 402 (1999) 390

|lpha
angle $|\chi\rangle$ 

Scalable Efficient LOQQ Polynomial scale-up

Knill, Laflamme & Milburn, Nature 409 (2001) 46

半透鏡 十単一光子源十光子数検出器

## アプローチ1:線形光学素子を用いる方法

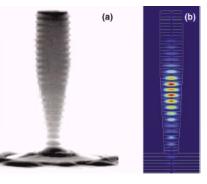
Knill, Laflamme & Milburn, Nature 409 (2001) 46

- •線形光学素子(半透鏡)
- •単一光子源

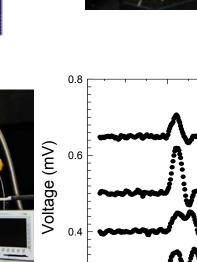


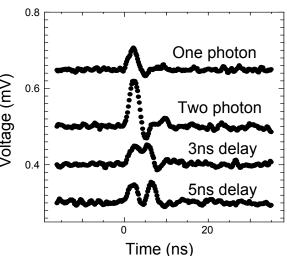
•同時入射光子数を判別

を組み合わせた 光学回路で制御ノット が可能。



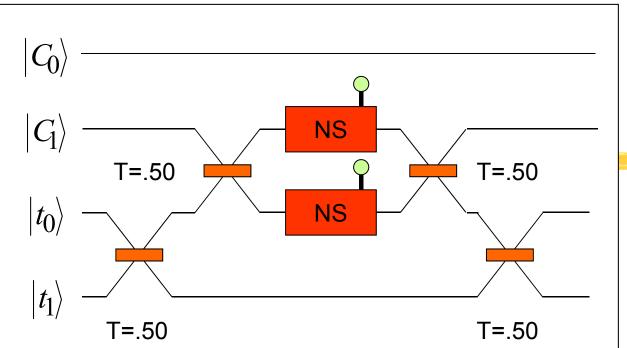
M. Pelton et. al., PRL 2002

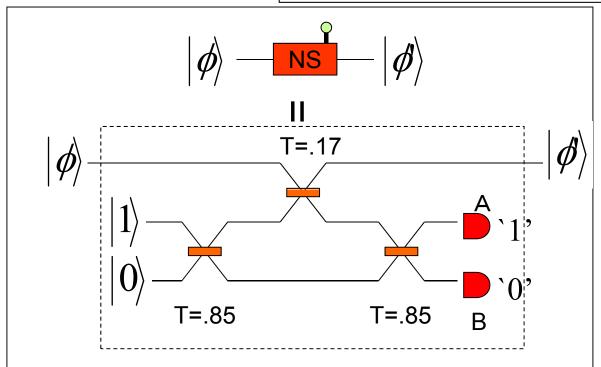




S. Takeuchi, APL. 74 (1999) 1063

KLMの 制御ノッ トゲート





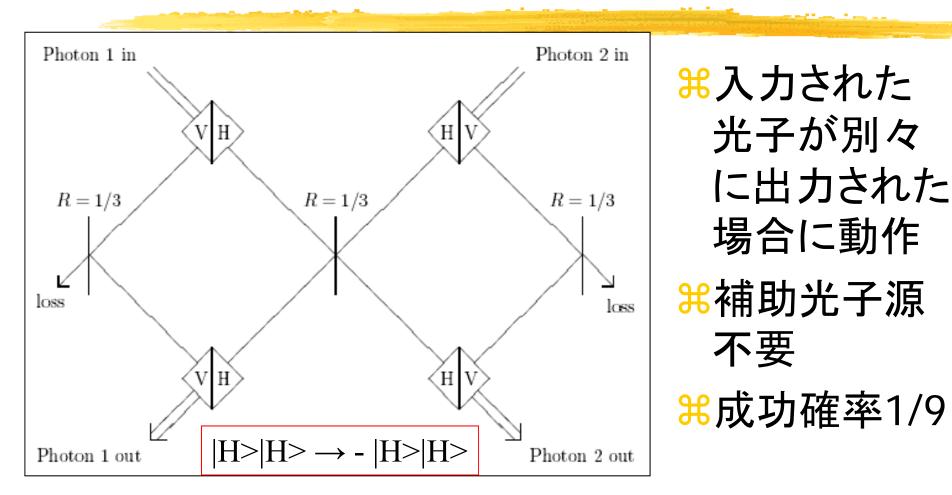
- 大変複雑な光路干渉計が必要
- •補助光子源が必 要
- •成功確率 1/16

#### Contents

- #量子情報処理とその現状
- 光光子を用いた量子計算
- 発量子制御ノットゲート
  - △2光子量子干渉を利用
- 光光量子回路「量子もつれ合いフィルター」
- #量子メトロロジーへの応用
  - △もつれ光子干渉で、標準量子限界を超える

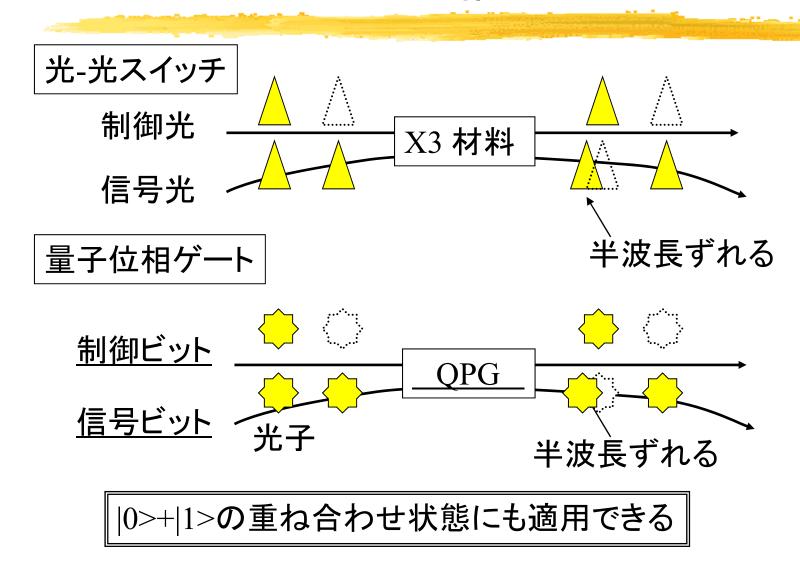
#### 線形光学素子のみを用いた制御ノット

H. F. Hofmann and S. Takeuchi, Phys. Rev. A 66 024308 (2002).

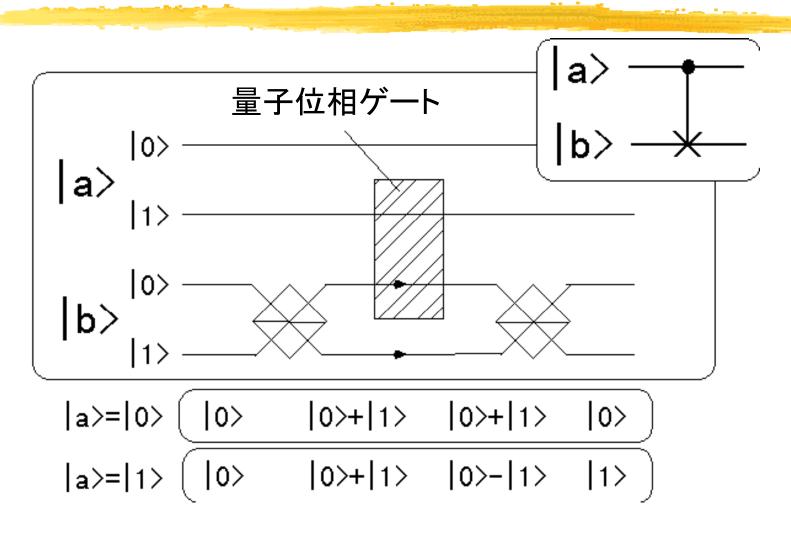


The same idea was also independently proposed by T.C.Ralph et.al. PRA **65** 012314 (2002)., demonstration O'Brien et. al., *Nature* 

## 量子位相ゲート



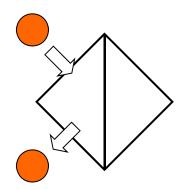
## 量子位相ゲートと干渉計による 制御ノットゲート



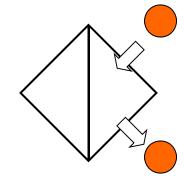
# I.L.Chuang and Y. Yamamoto, Phys. Rev. A (1996)

# 量子ゲートの仕組み1 反射率 *1/3* のビームスプリッタ

R = 1/3



$$U|1,0\rangle = \sqrt{\frac{1}{3}}|1,0\rangle$$

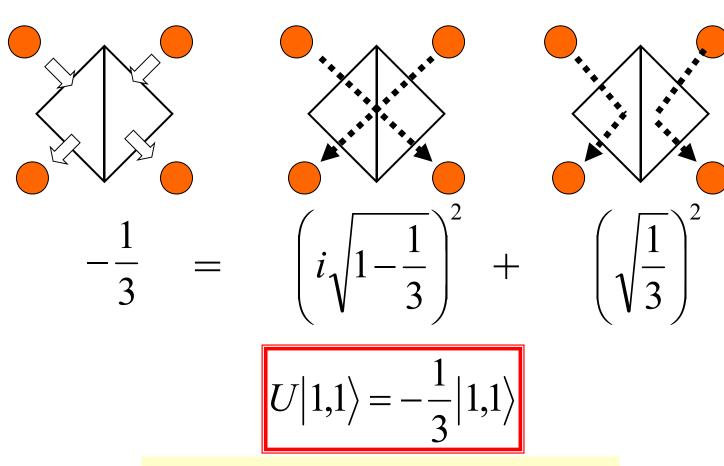


$$U|0,1\rangle = \sqrt{\frac{1}{3}}|0,1\rangle$$

Linear case:

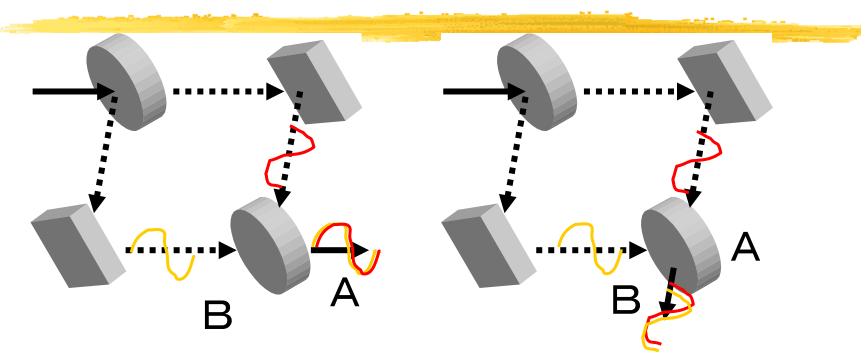
$$U|1,1\rangle = \frac{1}{3}|1,1\rangle$$

## 量子位相ゲートとして作用する 反射率 1/3 のビームスプリッタ



量子位相ゲートと同様に動作

## 干渉計と安定性



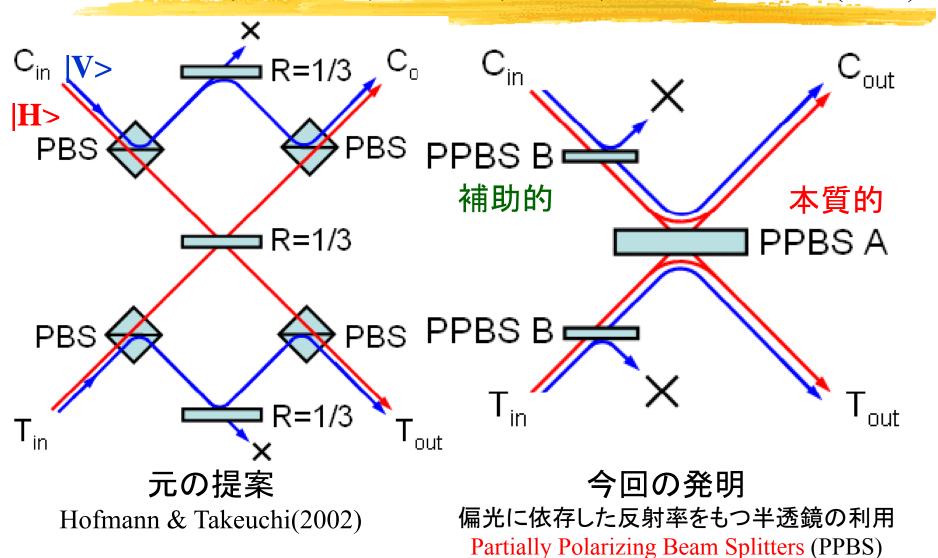
両方の経路の長さがまったく同じ場合。

片方の経路が、半波長だけ なった場合。(1波長は700ナノメートル)

困難:経路長のゆらぎを数ナノメートル以下に制御する必要。

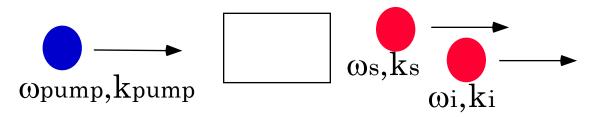
#### Demonstration of an optical quantum controlled-NOT gate without path interference

Okamoto, Hofmann, Takeuchi, Sasaki, PRL 95, 210506 (2005).



## Twin Photons by SPDC

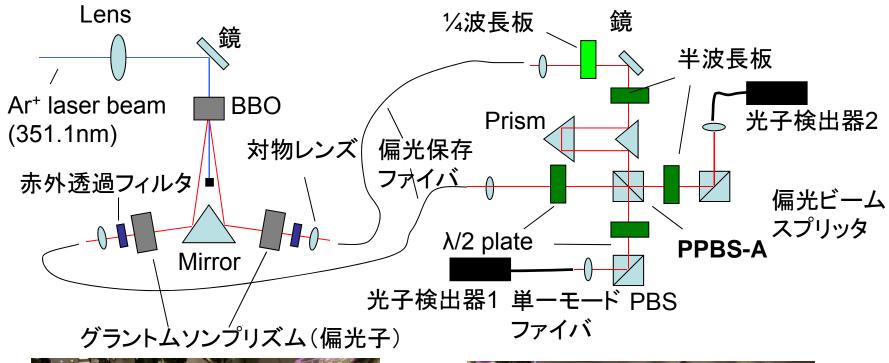
Nonlinear Crystal

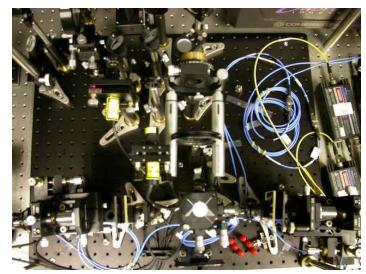


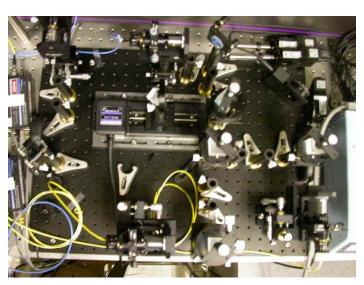
 $\omega_{\text{pump}} = \omega_{\text{s}} + \omega_{\text{i}}, \text{ kpump} = k_{\text{s}} + k_{\text{i}}$ 

- $\mathbb{H}$  The twin photons are created at the same time ( $\sim$  fs).
  - The signal photon creation time can be determined by idler photon detection.
    - C. K. Hong and L. Mandel, Phys. Rev. Lett., **56**, 58 (1986).
  - Generation of sub-Poisson light
    P. R. Tasper, J. G. Rarity, and J. S. Satchell, Phys. Rev. A, **37**, 2963 (1986).

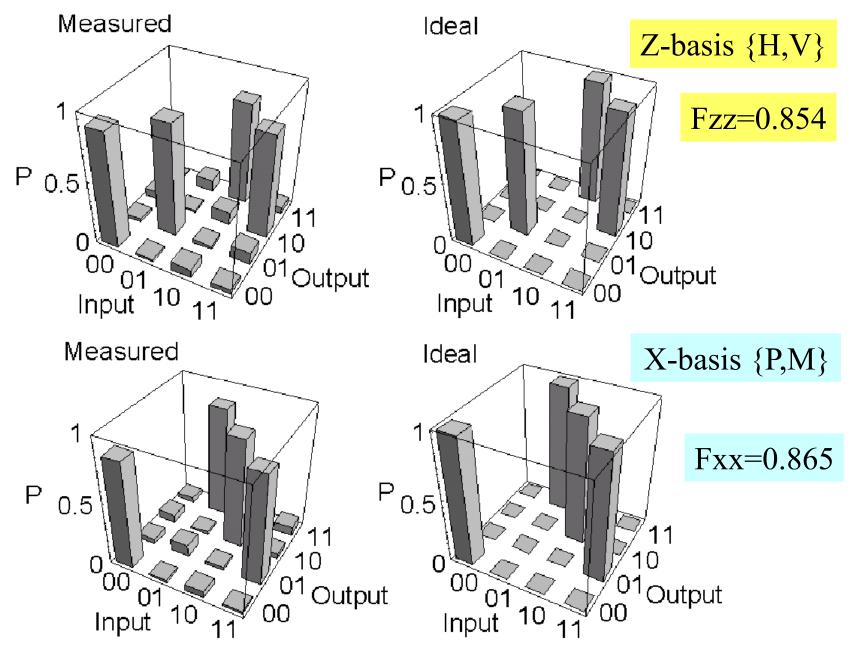
# 実験セットアップ







# 測定結果



## 量子過程忠実度(Quantum Process Fidelity)

The complementary classical fidelities  $F_{11}$  and  $F_{22}$  define an upper and a lower limit of the quantum process fidelity (H.F. Hofmann, PRL 94, 160504(2005)),

$$F_{11} + F_{22} - 1 \le F_{\text{process}} \le \text{Min}\{F_{11}, F_{22}\}$$

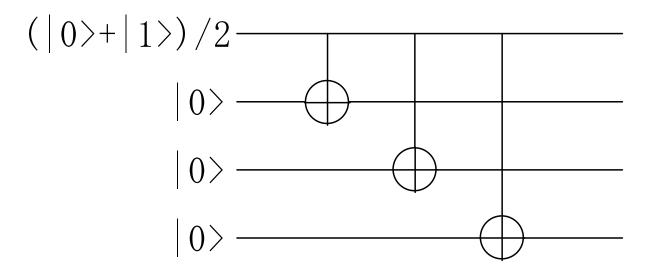
入力一出力状態の必要な組み合わせ数

新方法: 32 (input 4, output 4, X2)

量子過程トモグラフィ: 256 (input 16, output 16)

量子過程忠実度 :  $71.9\% \le F_{\text{process}} \le 85.4\%$  量子もつれ能力  $C_{\text{gate}} \ge 0.44$ 

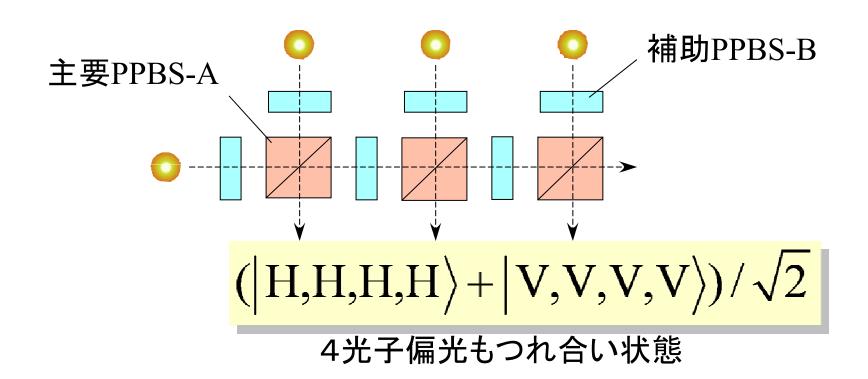
# 4光子GHZ状態作成用量子回路



出力: 4 光子GHZ 状態 (|0>|0>|0>|0>+|1>|1>|1>|1>)/2

# 光子量子回路の実現が視野に

例:3つの制御ノットゲートを用いて、4光子GHZ状態をつくる。 単に、PPBSを必要個数ならべるだけで可能に。



#### Contents

- #量子情報処理とその現状
- 光光子を用いた量子計算
- #量子制御ノットゲート
  - △2光子量子干渉を利用
- 第光量子回路「量子もつれ合いフィルター」
- #量子メトロロジーへの応用
  - △もつれ光子干渉で、標準量子限界を超える

# 光量子回路とは

- 光光子1個1個を情報単体として用いる

量子ゲートを複数用いた 光量子回路である 「量子フィルター」を実現

1光·

○ が

Okamoto, Hofmann, Takeuchi, Sasaki, **PRL 95**, 210506 (2005).

Output

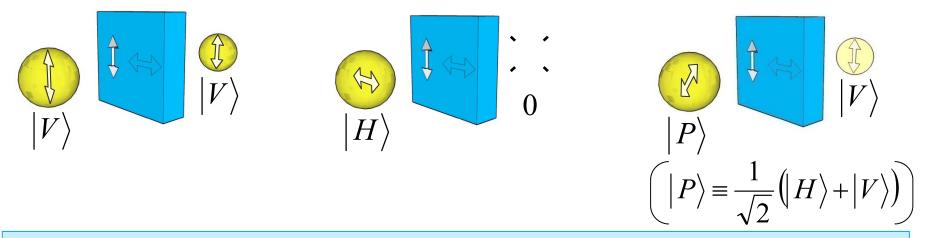
#### ₩2光子間量子ゲート

- △線形光学素子+ある特定事象の選択
- △単一光子レベルでの非線形光学

#### Polarization filter

A typical example of single-qubit filters

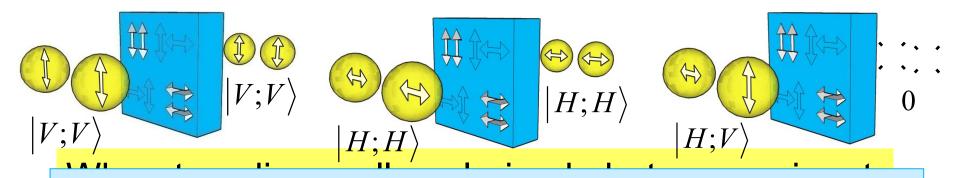
A certain (ex. vertical) component of a polarization state is filtered out.



One of the most indispensable tool used for manipulation of photonic qubits; state preparation, initialization, measurement based protocols (e.x. Zeno effect), and more.

# Entanglement filter

A two-qubit polarization filter, which transmits photon pairs only if they share the same horizontal or vertical polarization. Note: the quantum coherence between H;H and V;V preserved.

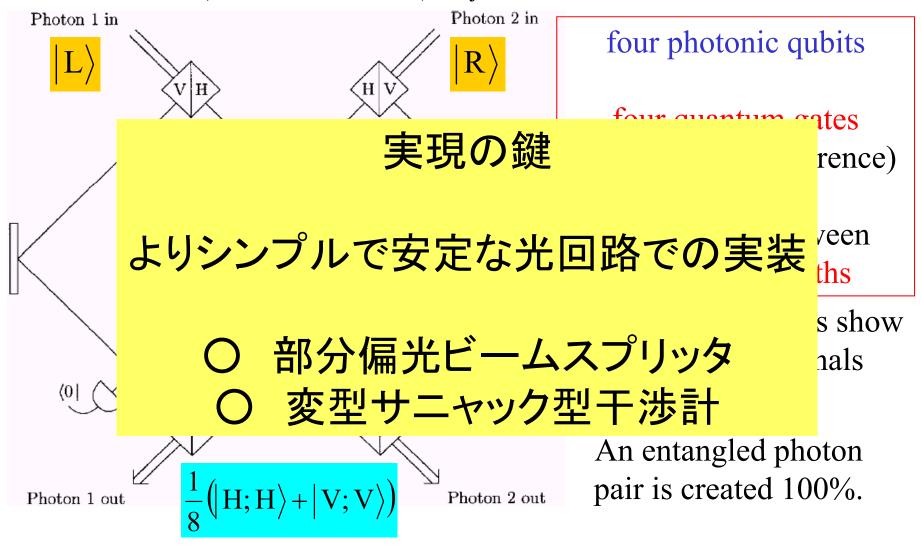


The filter will be the indispensable tool for entanglement-based quantum protocols; creation & purification of entanglement, entanglement-based projection measurement, and more...

The output is an entangled photon pair.

## Non-destructive quantum entanglement filter

H. F. Hofmann, and S. Takeuchi, Phys. Rev. Lett. 88 147901 (2002).



- •One of the world-largest Optical Quantum Circuit
- •Indispensable device for QIP using entangled photons

#### CNOT gate without path-interference

Okamoto, Hofmann, Takeuchi, Sasaki, PRL 95, 210506 (2005).

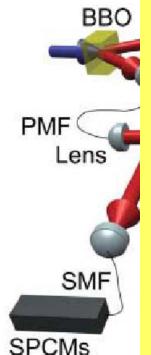


Original Proposal Hofmann & Takeuchi, PRA(2002)

## Beating the Standard Quantum Limit with Four-Entangled Photons

Tomohisa Nagata, Ryo Okamoto, 1,2 Jeremy L. O'Brien, 3,4 Keiji Sasaki, Shigeki Takeuchi Takeuchi

Science, 316, 726 (2007).



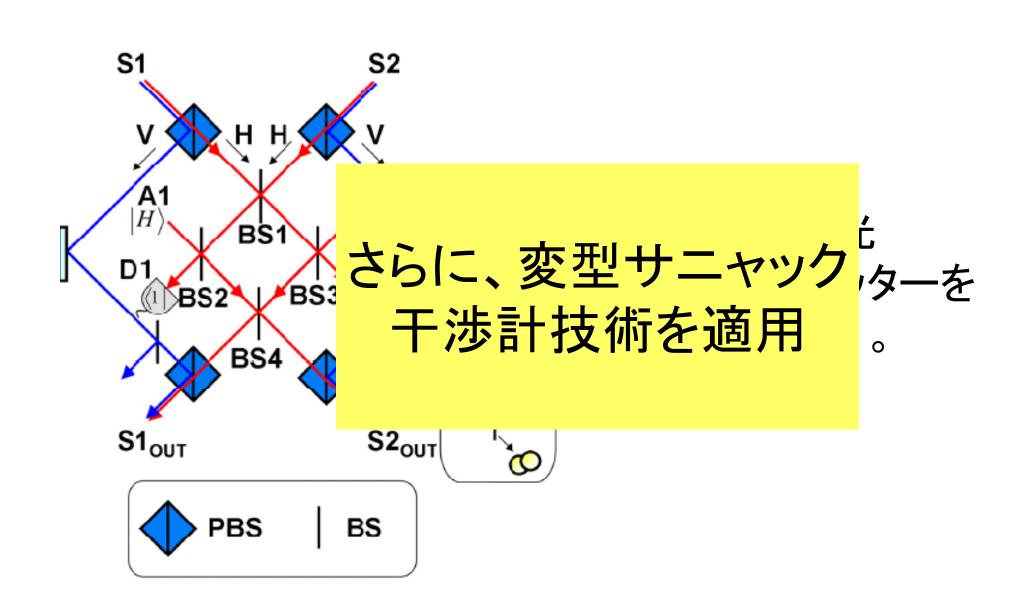
変型サニャック型干渉計

経路が空間的に異なったままで 超安定な干渉を実現 (24時間に渡り変動なし)

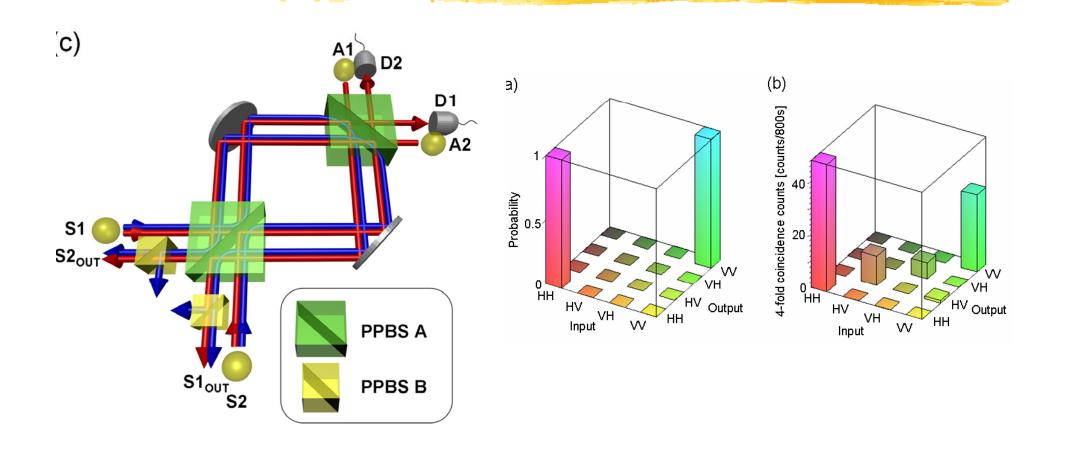
$$(\left|4\right\rangle_{c}\left|0\right\rangle_{d}+\left|0\right\rangle_{c}\left|4\right\rangle_{d})/\sqrt{2}$$

$$V = 91 \pm 6\% > V_{th} = 81.6\%$$

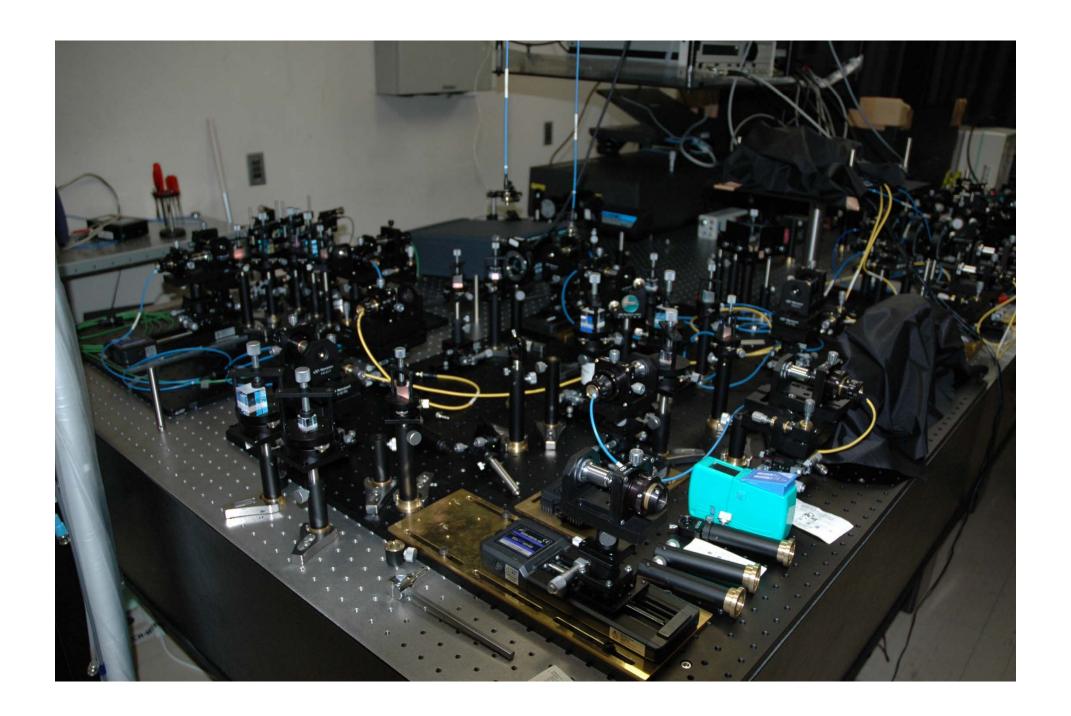
PP Angle (deg)



### Realization of quantum filter



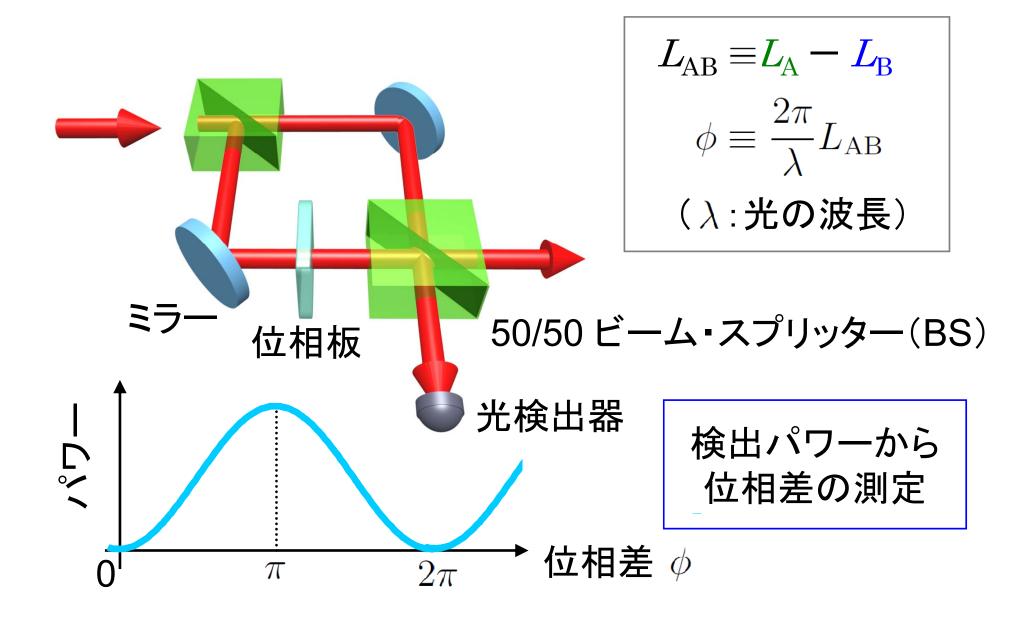
Okamoto, O'Brien, Hofmann, Nagata, Sasaki and Takeuchi, *Science* **323** (2009) 483.



#### Contents

- 光光子を用いた量子計算
- #量子制御ノットゲート
  - △2光子量子干渉を利用
- 光光量子回路「量子もつれ合いフィルター」
- #量子メトロロジーへの応用
  - △もつれ光子干渉で、標準量子限界を超える

### 光干渉計

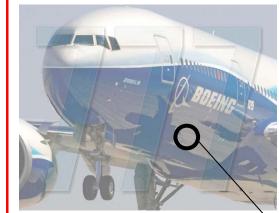


## 干渉計の利用

#### 重力波検出





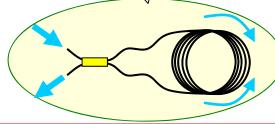


http://www.boeing.com/

#### 角速度センサ











The VLT Array on the Paranal Mountain



Wide-Field IR-View of Eagle Nebula (Messier 16) (VLT ANTU + ISAAC)

ESO PR Photo 37a/01 (20 December 2001)

© European Southern Observator

天体観測

ESO PR Photo 14a/00 (24 May 2000)

© European Southern Observar

### 感度と精度

- ・ 測定精度は、測定を繰り返せば(=より多くの光子を用いれば)任意に上げられる。
- しかし、「光子1つあたりで得られる精度」=感度には、限界がある。



高感度フィルム

少ない光量でも 撮影できる

## 位相測定の精度

$$\phi = \phi_0 \pm \Delta \phi$$

 $\phi = \phi_0 \pm \Delta \phi$   $\Delta \phi$  をより小さくするには?

古典測

- 入力

- 精度

もつれ合い光子を用いると、 測定精度が 1/√N から 1/ N.  $1 \text{ Pyh} \rightarrow 1 \text{ Hyph}$ 

量子測必要な光パワーが10億分の1に。

- 入力: n光子もつれ合い状態
- 精度の限界:

$$\Delta \phi \approx \frac{1}{n}$$

 $\Delta \phi \approx \frac{1}{2}$  (ハイゼンベルク限界)

#### もつれあった4光子により 位相測定の量子限界を打ち破る

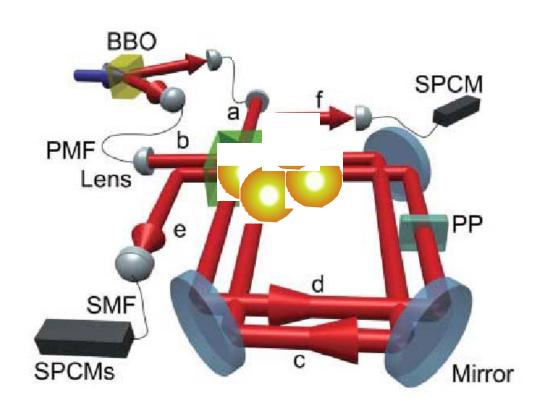
- 標準量子限界をうち破るのに十分な4光子干渉 実験に成功。3つ以上の光子による実験ではじめて。
  - 明瞭度 91%  $> V_{th} = 82 \%$
- ・2つの量子干渉(量子ゲート)と1つの経路干渉 計を含んだ回路
  - 多光子量子回路の実現へ大きなステップ

Nagata, Okamoto, O'Brien, Sasaki and Takeuchi, Science, 316, 726 (2007).

## Beating the Standard Quantum Limit with Four-Entangled Photons

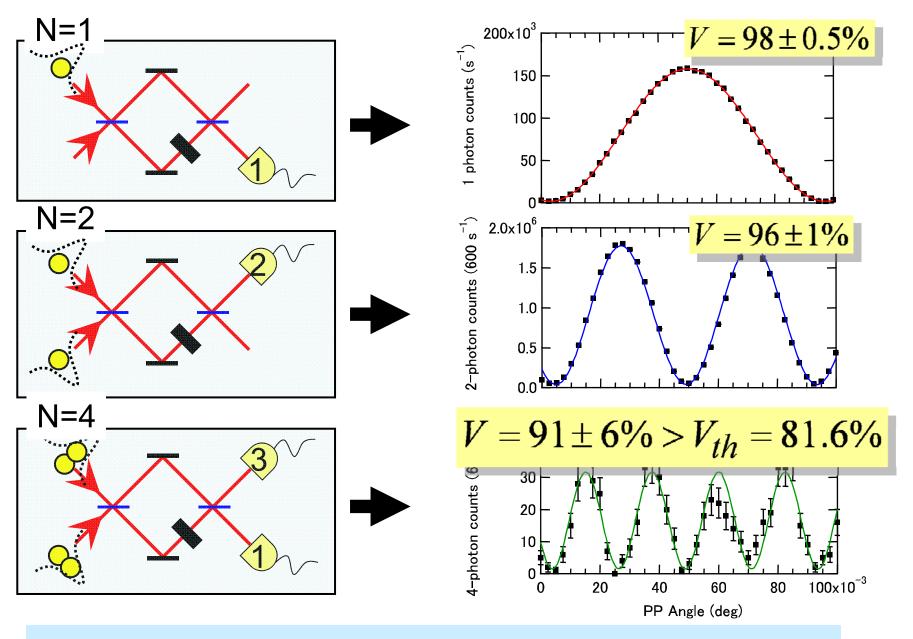
Tomohisa Nagata, Ryo Okamoto, 1,2 Jeremy L. O'Brien, 3,4 Keiji Sasaki, Shigeki Takeuchi, 2\*

**Science,** 316, 726 (2007).



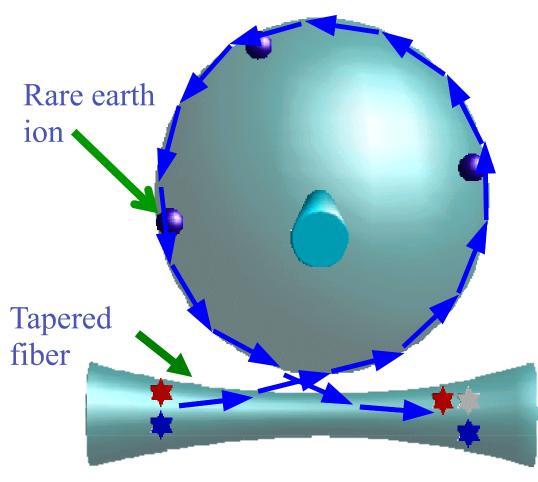
$$(\left|4\right\rangle_{c}\left|0\right\rangle_{d}+\left|0\right\rangle_{c}\left|4\right\rangle_{d})/\sqrt{2}$$

$$V = 91 \pm 6\% > V_{th} = 81.6\%$$



 $V_{th}$  to Beat the standard quantum limit is overcome!

# Quantum phase gates using a single two level system in a microsphere resonator



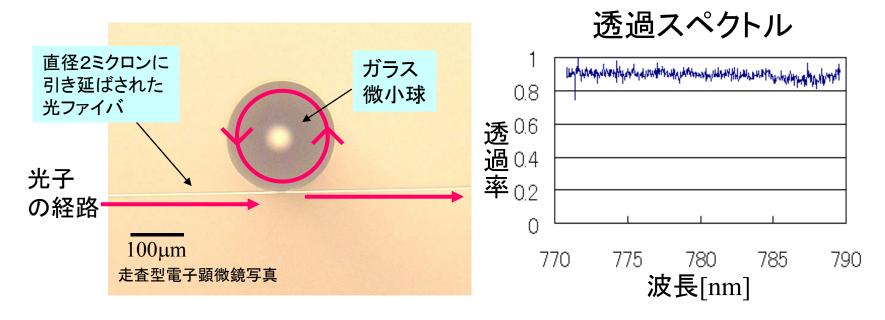
Quantum phase gates (QPGs) using microsphere with a stem

#### Microsphere with a stem

#### <u>Microspheres</u>

- •High Q value
- •Small mode volume
- •Easy fabrication
- •By using piezo actuator, position control in nm accuracy is possible.
- •High efficient input/output of light are realized by controlling a distance of tapered fiber and microsphere.

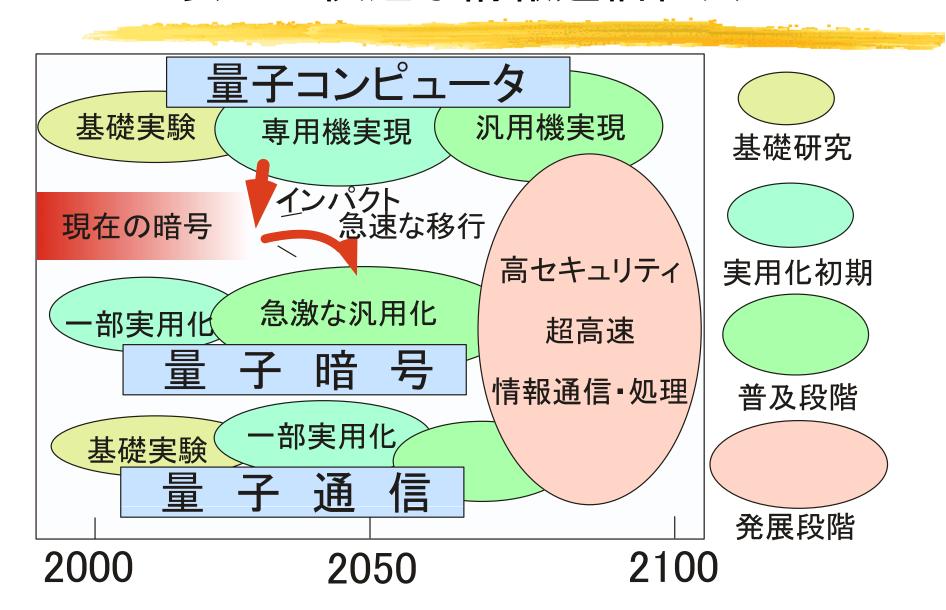
## テーパファイバ・微小球結合系 の実現



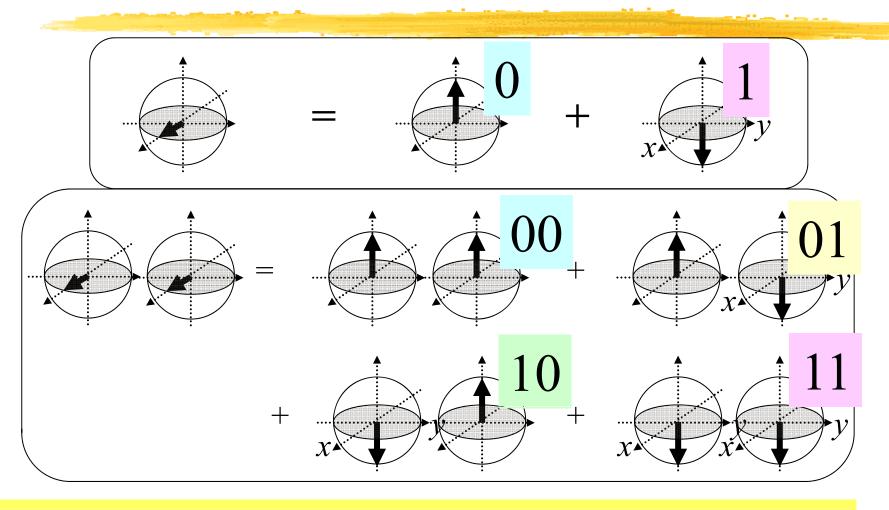
透過率90%以上で、 かつ偏光を保存するテーパファイバを実現

Konishi, Fujiwara, Takeuchi, Sasaki, Appl. Phys. Lett. 89, 121107 (2006)

# 量子情報通信・処理の将来と、安全で快適な情報通信社会



### Quantum parallelism



N qubit



Superposition of  $2^N$  different states

### まとめ

- 光光子を用いた量子回路の研究は始まったばかり。
- ☆遠い目標は、量子コンピュータの実現。しかし、超高感度の測定技術の実現をはじめ、様々なターゲットが存在。
- ₩様々な量子(光子、電子、その他)の「量子状態」(巨大なヒルベルト空間、密度行列空間)を直接、自在に操る、理解することは大きな(科学共通の)目標。