#### 光子を用いた量子回路の実現と展望

#### 竹内 繁樹 takeuchi@es.hokudai.ac.jp

北海道大学 電子科学研究所 大阪大学 産業科学研究所 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。



From the web site of the Otedama club in Japan

From www.naranja.co.jp Our ambition is... not playing with Otedamas (bean bags) juggling with photons at will like Otedama.

#### 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。



## Contents

∺量子情報処理とその現状 光子を用いた量子計算 8 量子制御ノットゲート △2光子量子干渉を利用 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







# 量子計算の基本ゲート



### 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 ※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 光量子回路「量子もつれ合いフィルター」 **岩 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

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

#### Linear Optics Quantum Computation (previous version)



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**

Linear Optics QC using a single photon

Exponential scale-up

Takeuchi, PhysComp96(1996),PRA 61 (2000) 052302 , Cerf et.al, PRA57(1998)R1477, Kwiat et.al, J. Mod. Opt(2000)

Using Q-Teleportation Polynomial scale-up

Gottesman & Chuang, Nature 402 (1999) 390

Scalable Efficient LOQC Polynomial scale-up



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

半透鏡 + 単一光子源+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





- •光子数検出器
  - ・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。





S. Takeuchi, APL. 74 (1999) 1063



## Contents

※量子情報処理とその現状

※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 器まとめと今後の展望

#### 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



# 干渉計と安定性



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



 $\omega_{pump} = \omega_s + \omega_i$ ,  $k_{pump} = k_s + k_i$ 

**\mathbb{H}** The twin photons are created at the same time (~ 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 Lens 1⁄4波長板 鏡 鏡 半波長板 BBO Ar<sup>+</sup> laser beam 光子検出器2 Prism (351.1nm) 対物レンズ 偏光保存 ファイバ 赤外透過フィルタ 偏光ビーム スプリッタ  $\mathbf{h}$ λ/2 plate **PPBS-A** Mirror 光子検出器1 単一モード PBS ファイバ グラントムソンプリズム(偏光子)







#### 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)),

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

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%  $\leq F_{\text{process}} \leq 85.4\%$ 量子もつれ能力  $C_{\text{gate}} \geq 0.44$ 

# 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 光量子回路「量子もつれ合いフィルター」 **岩 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

#### 光量子回路とは 光子1個1個を情報単体として用いる 岩その 島子 相関を 島子 ゲートを 田いて 制御 量子ゲートを複数用いた 光量子回路である **光**1光· 「量子フィルター」を実現 ──閃 Output が Okamoto, Hofmann, Takeuchi, Sasaki, ※2光子間量子ゲート PRL 95, 210506 (2005). △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.



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).



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

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

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





#### **Realization of quantum filter**



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



## Contents

∺量子情報処理とその現状 ∺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 光量子回路「量子もつれ合いフィルター」 8 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



# 干渉計の利用



# 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。





- 精度の限界:



## 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<sub>th</sub> =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,<sup>1</sup> Ryo Okamoto,<sup>1,2</sup> Jeremy L. O'Brien,<sup>3,4</sup> Keiji Sasaki,<sup>1</sup> Shigeki Takeuchi<sup>1,2\*</sup>





 $V_{th}$  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

**Microspheres** •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.



#### 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

#### 光子を用いた量子回路の研究は始まったば かり。

送息い目標は、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。