

光共振器による単一光子のタイミング制御 およびホモダイン測定による検証

東京大学工学部 古澤研究室

吉川純一

東京大学古澤明研究室

東京大学



工学部6号館



芹川昂寛氏

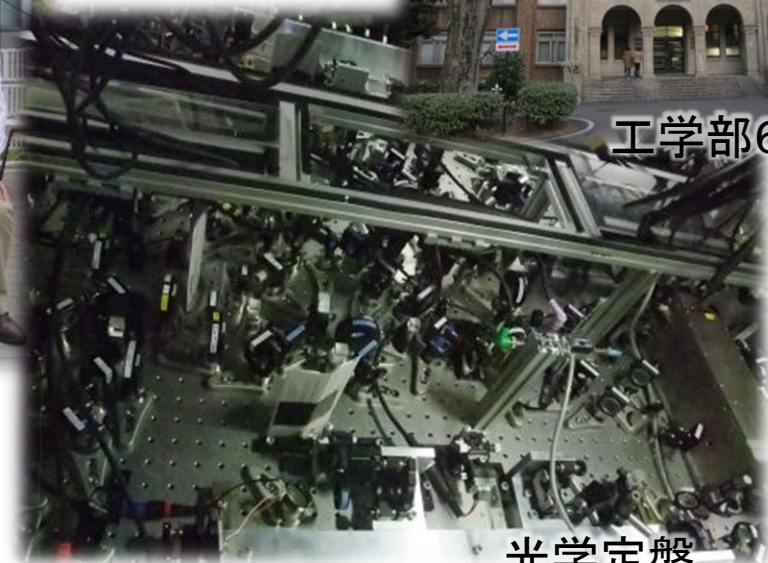
橋本洋輔氏

塩沢優氏

吉川

牧野兼三氏

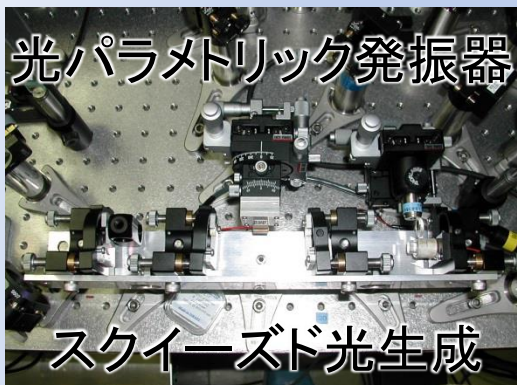
古澤明先生



光学定盤

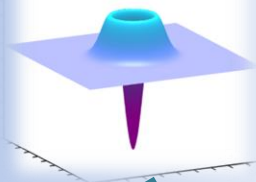
量子光学実験のツール

量子状態生成

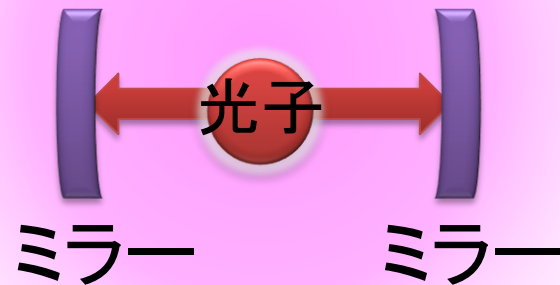


光子検出器による
光子引き去り

非ガウス型状態



光共振器による
メモリー



ビームスプリッターによる
線形相互作用

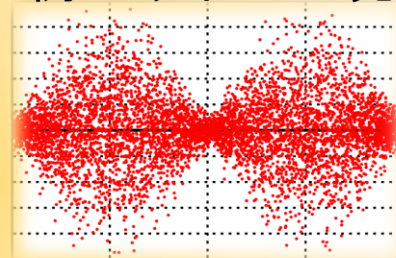
量子エンタングルメント



ホモダイン測定



例: スクイーズド光



量子状態検証

測定結果のフィードフォワード

量子テレポーテーション

Lee et al. Science 332, 330 (2011)

Takeda et al. Nature 500, 315 (2013)

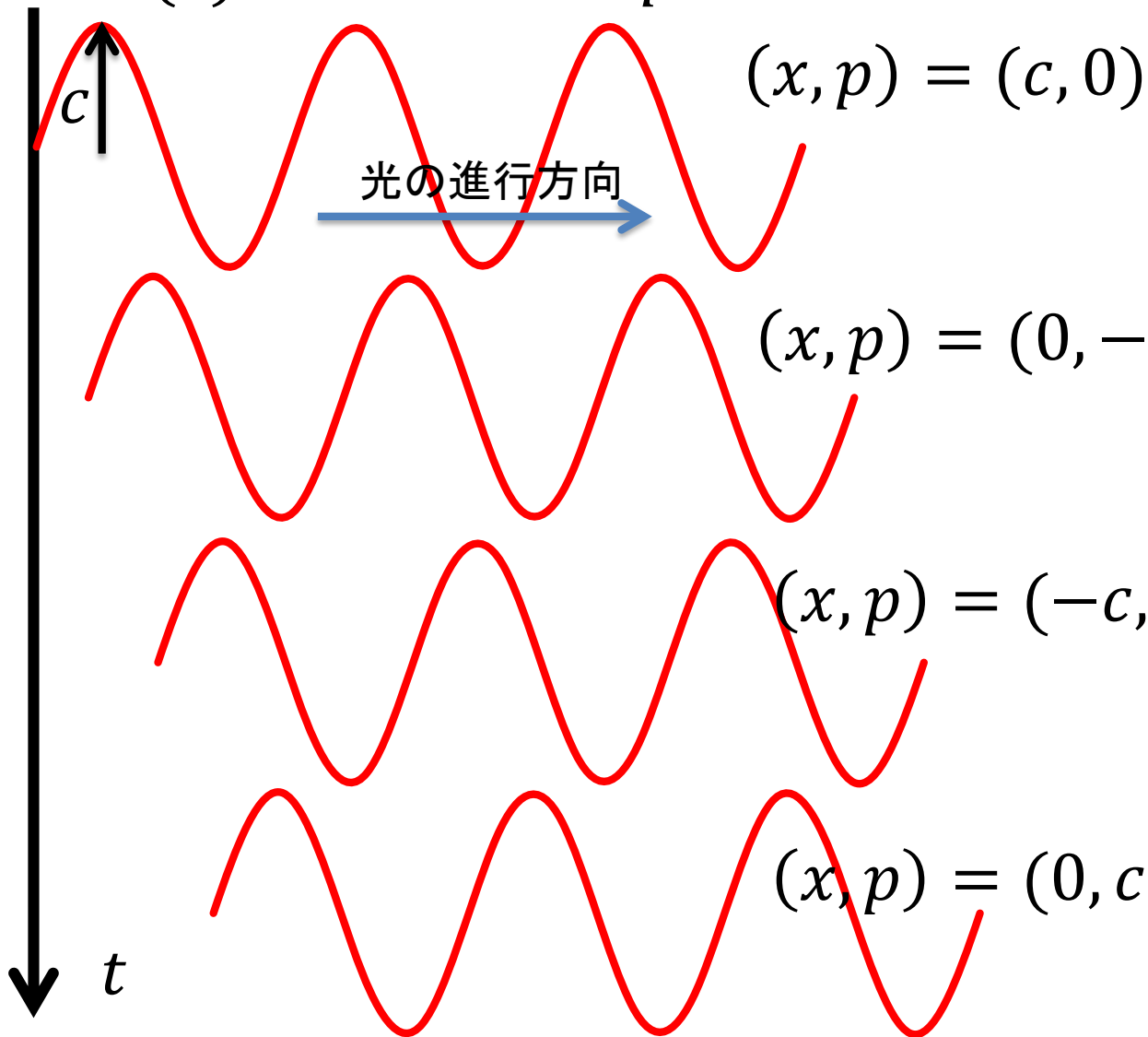
内容

- 量子光学, Wigner関数, ホモダイン測定
- 伝令付きの(heralded) 量子状態生成
- 光共振器による光子の保存実験
J. Yoshikawa et al. Physical Review X 3, 041028 (2013)
- タイミング制御された二光子の干渉実験

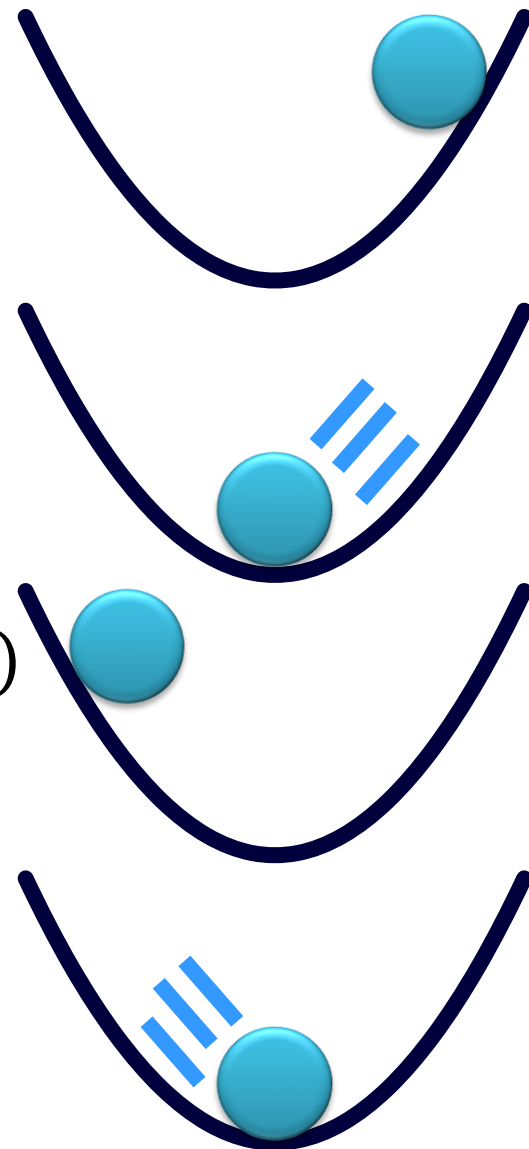
光の直交位相振幅

光は等速の波！

$$A(z) = x \cos kz - p \sin kz$$



Cf. 調和振動子



量子化

直交位相振幅 \hat{x}, \hat{p}

光の場

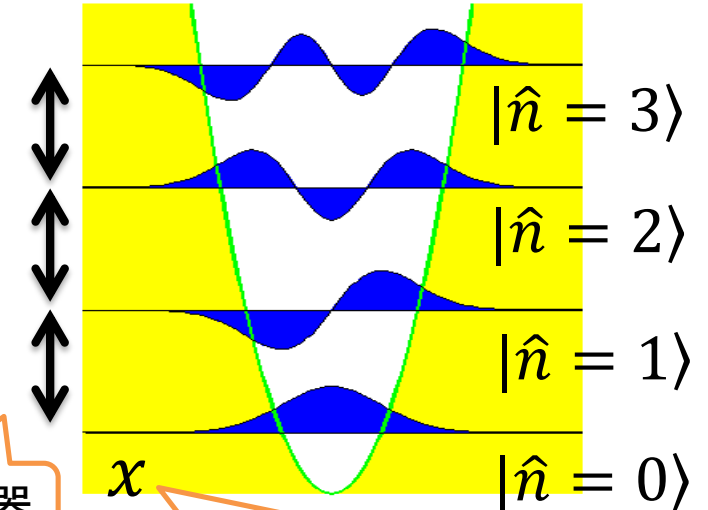
$$\hat{A} = \hat{x} \cos kz - \hat{p} \sin kz$$

直交位相振幅の交換関係 $[\hat{x}, \hat{p}] = i$

ハミルトニアン $\mathcal{H} \propto \hat{x}^2 + \hat{p}^2$

➡ 不確定性関係 $\Delta(\hat{x})\Delta(\hat{p}) \geq \frac{1}{2}$

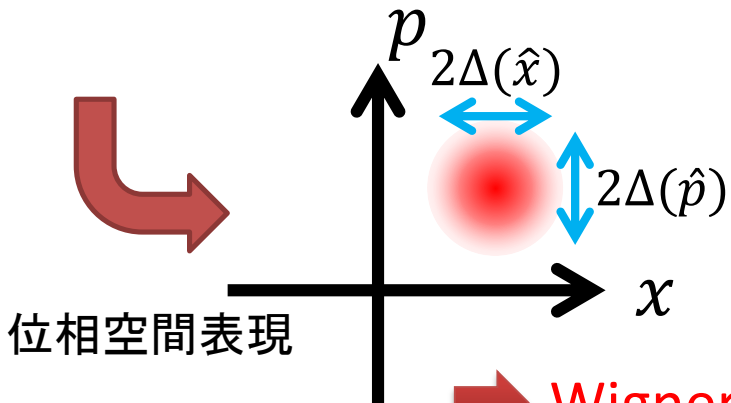
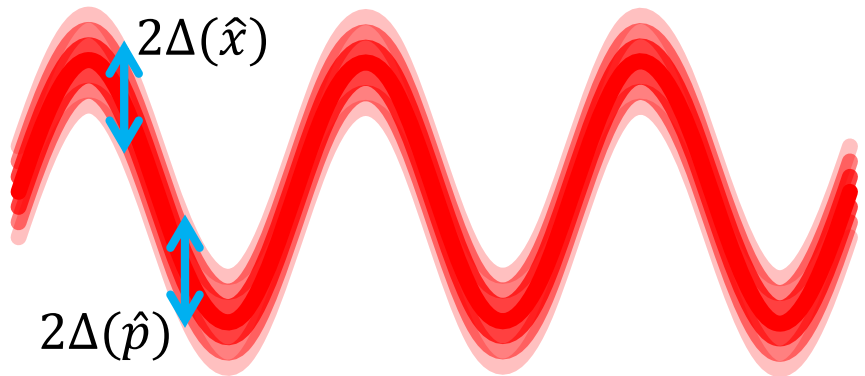
エネルギー離散化 ⇒ 光子



光子検出器

ホモダイン測定器

$\hat{a} \propto \hat{x} + i\hat{p}$ 粒子描像: 消滅演算子
波動描像: 複素振幅演算子



位相空間表現

➡ Wigner 関数表現

量子化

直交位相振幅 \hat{x}, \hat{p}

光の場

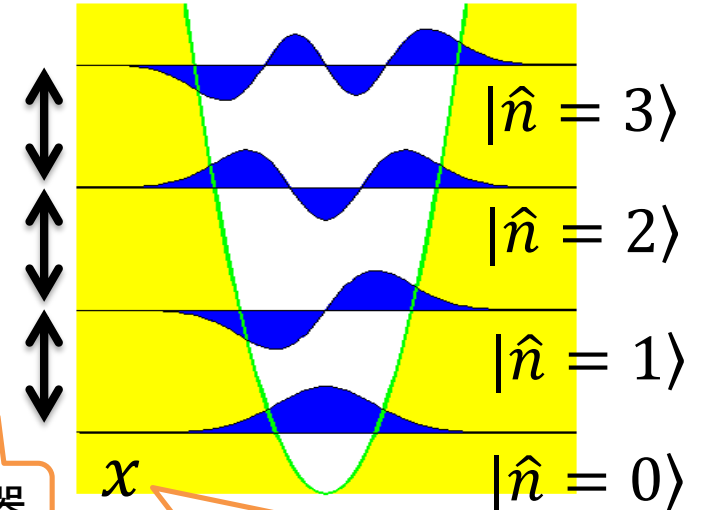
$$\hat{A} = \hat{x} \cos kz - \hat{p} \sin kz$$

直交位相振幅の交換関係 $[\hat{x}, \hat{p}] = i$

ハミルトニアン $\mathcal{H} \propto \hat{x}^2 + \hat{p}^2$

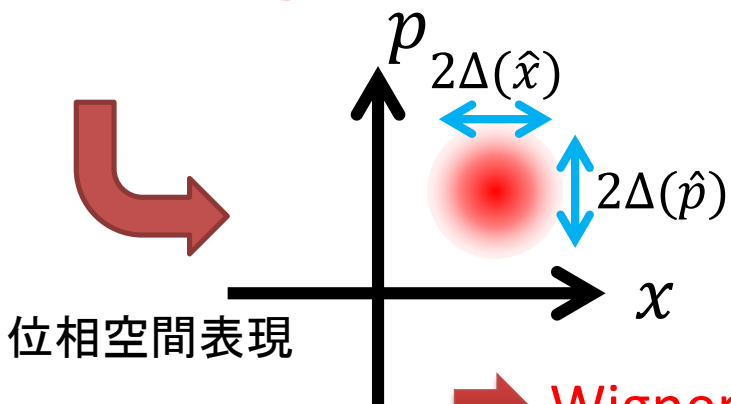
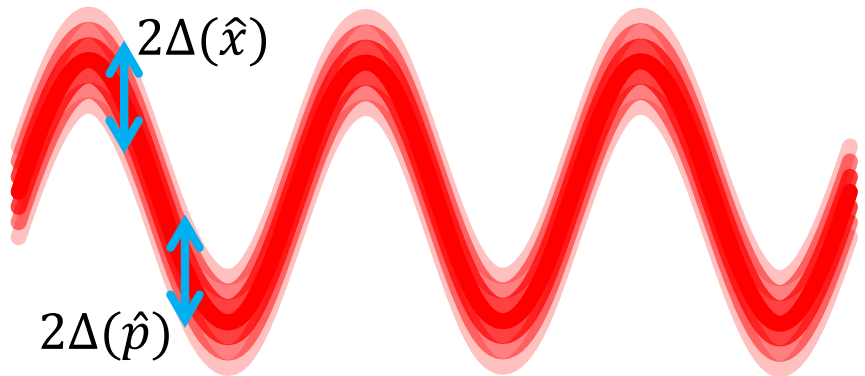
➡ 不確定性関係 $\Delta(\hat{x})\Delta(\hat{p}) \geq \frac{1}{2}$

エネルギー離散化 ⇒ 光子



ホモダイン測定器

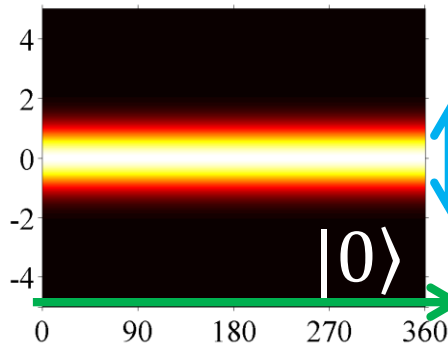
$\hat{a} \propto \hat{x} + i\hat{p}$ 粒子描像: 消滅演算子
波動描像: 複素振幅演算子



位相空間表現

➡ Wigner 関数表現

様々な光の量子状態



真空状態

真空場揺らぎ

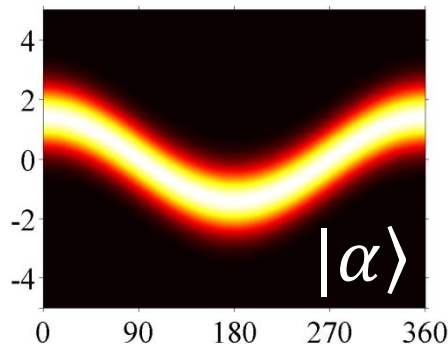
θ (degree)

$$|\psi\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} C_n |\hat{n} = n\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} dx \psi_{\theta}(x) |\hat{x}_{\theta} = x\rangle$$

任意位相振幅 $\hat{x}_{\theta} := \hat{x} \cos \theta + \hat{p} \sin \theta$

ホモダイン測定器

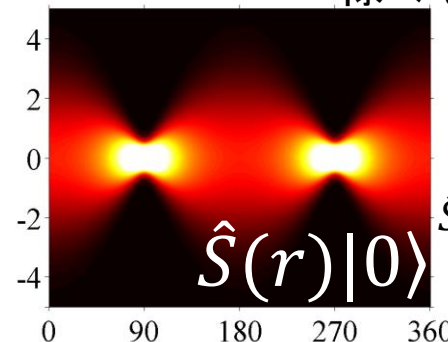
確率密度 $|\psi_{\theta}(x)|^2$



コヒーレント状態

$$|\alpha\rangle = e^{-|\alpha|^2/2} \sum_n \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle$$

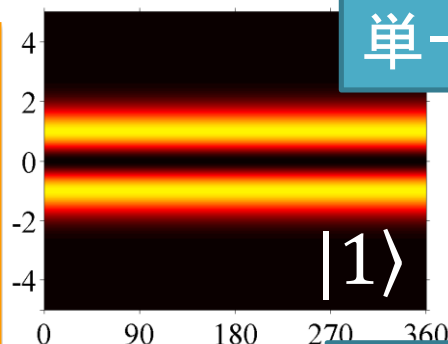
様々な光子数状態の重ね合わせ



スクイーズされた真空状態

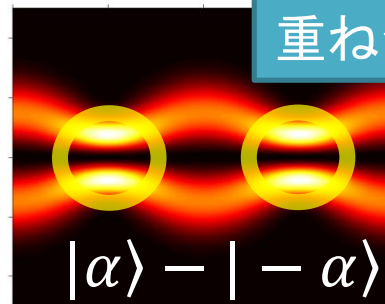
$$\hat{S}(r)|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{\cosh r}} \sum_n \frac{\sqrt{2n!}}{n!} \left(\frac{\tanh r}{2}\right)^n |2n\rangle$$

ガウス型状態



単一光子状態

コヒーレント状態の重ね合わせ



重ね合わせによる量子干渉

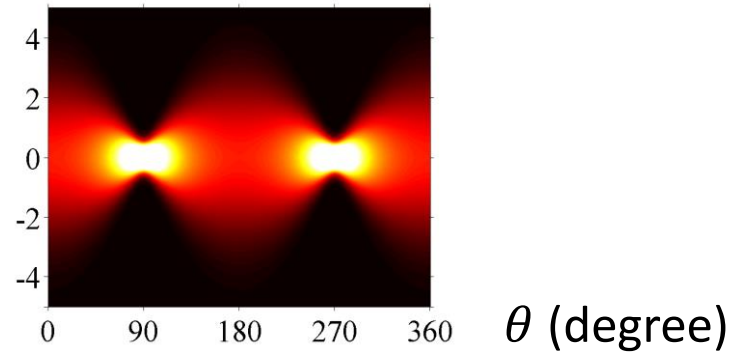
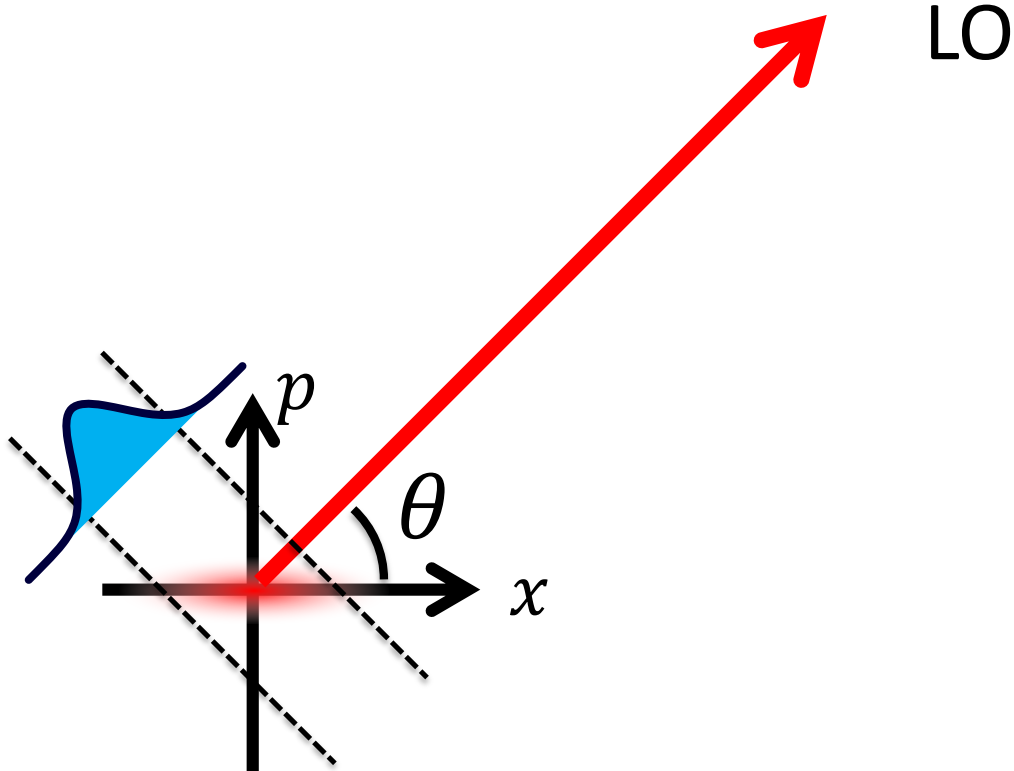
光子検出
確率的過程

非ガウス型状態

ホモダイン測定

局部発振光 (Local Oscillator, LO) の周波数での
回転座標系における直交位相振幅 $\hat{x} \cos \theta + \hat{p} \sin \theta$ の測定

LOとの干渉を利用



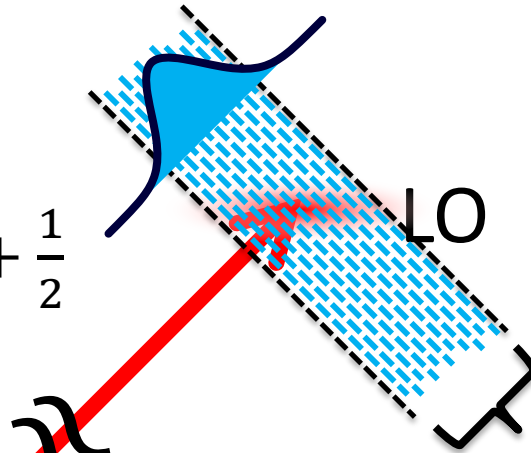
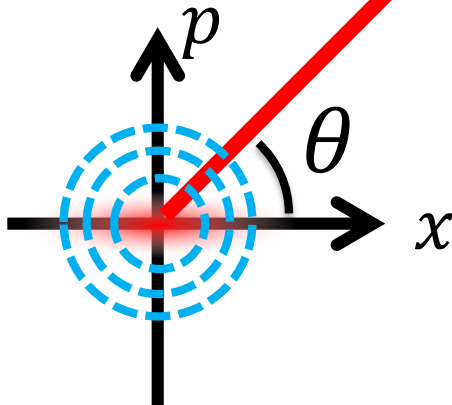
ホモダイン測定

局部発振光 (Local Oscillator, LO) の周波数での
回転座標系における直交位相振幅 $\hat{x} \cos \theta + \hat{p} \sin \theta$ の測定

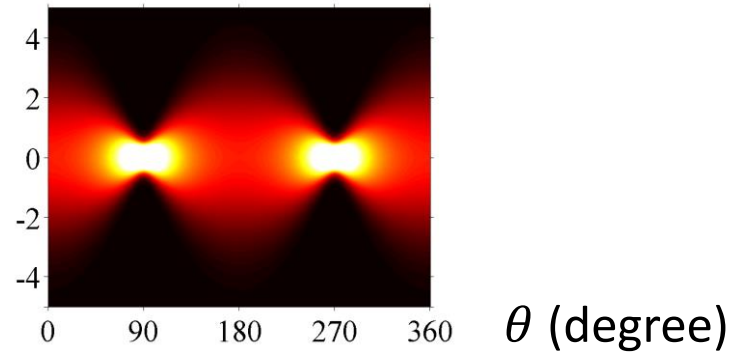
LOとの干渉を利用

$$\hat{n} = \hat{a}^\dagger \hat{a} \propto \hat{x}^2 + \hat{p}^2 + \frac{1}{2}$$

半径 \sqrt{n} の同心円の
どこにいるか



ほとんど連続に見える



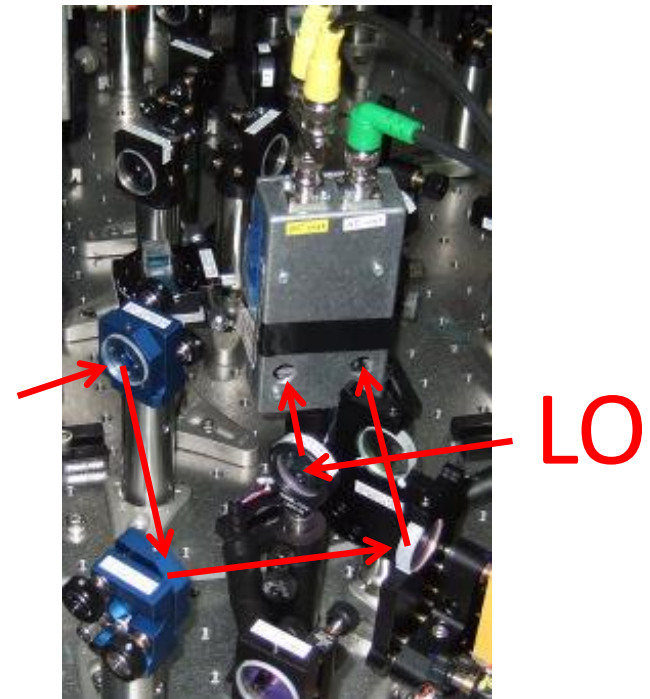
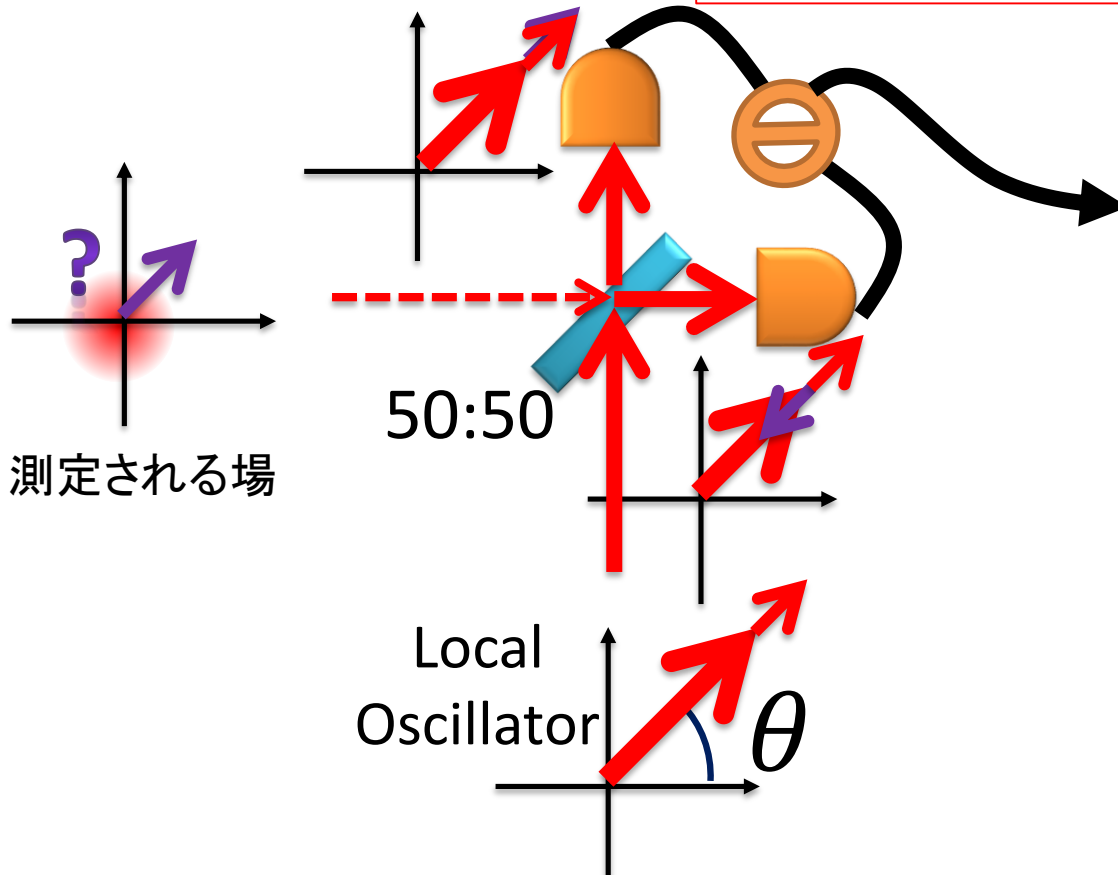
バランス型ホモダイン測定

ビームスプリッター

$$\begin{pmatrix} \hat{a}_A^{out} \\ \hat{a}_B^{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{a}_A^{in} \\ \hat{a}_B^{in} \end{pmatrix}$$

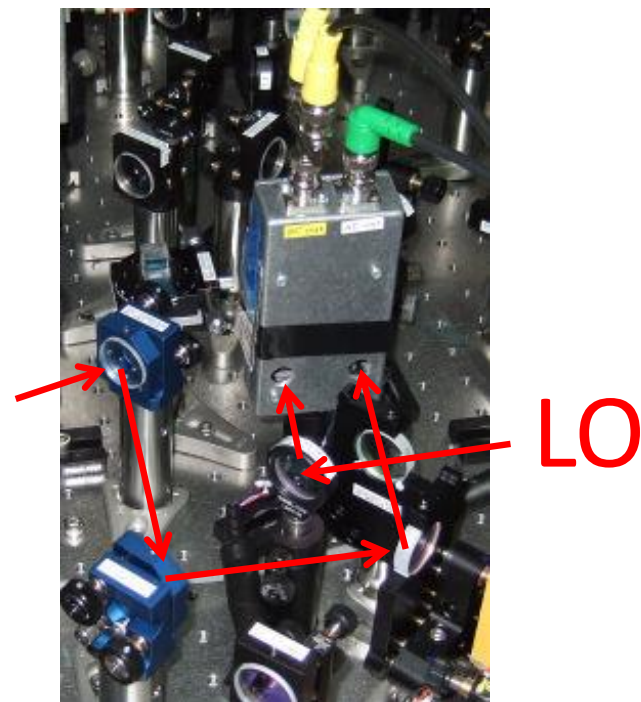
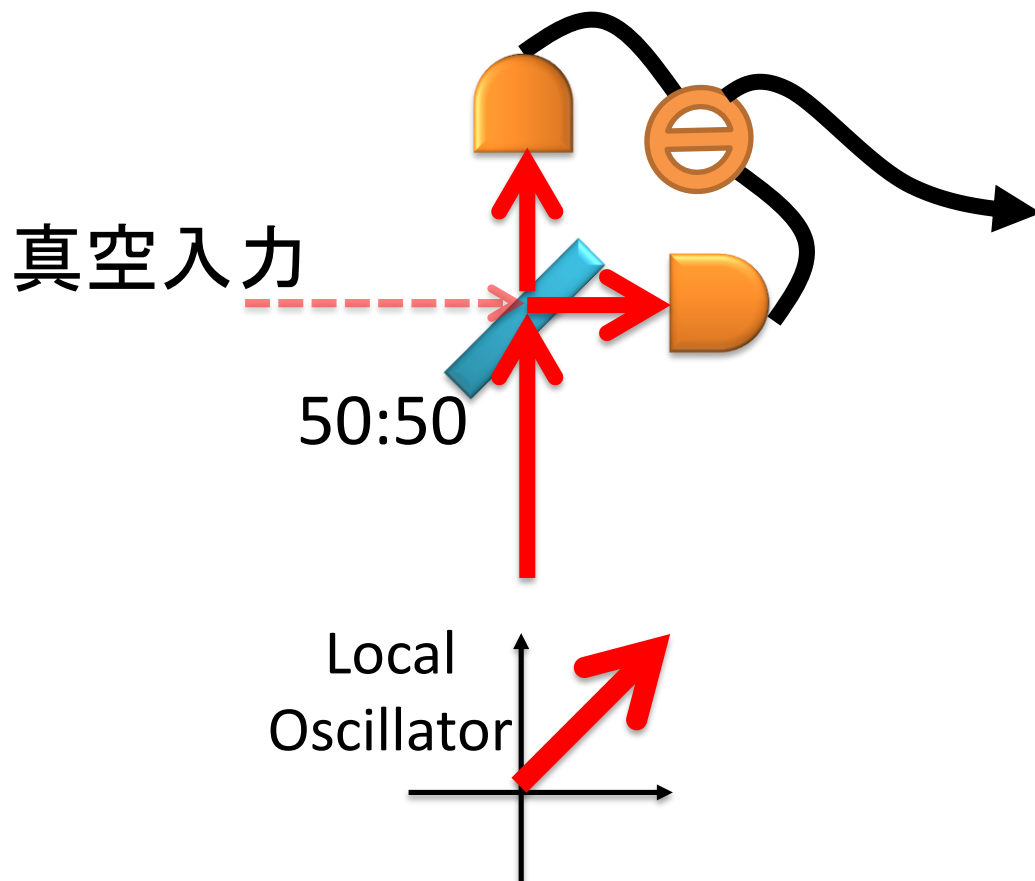
光電流の差を取る

LOノイズ Common Mode \Rightarrow 消える
測定場 Normal Mode \Rightarrow 残る

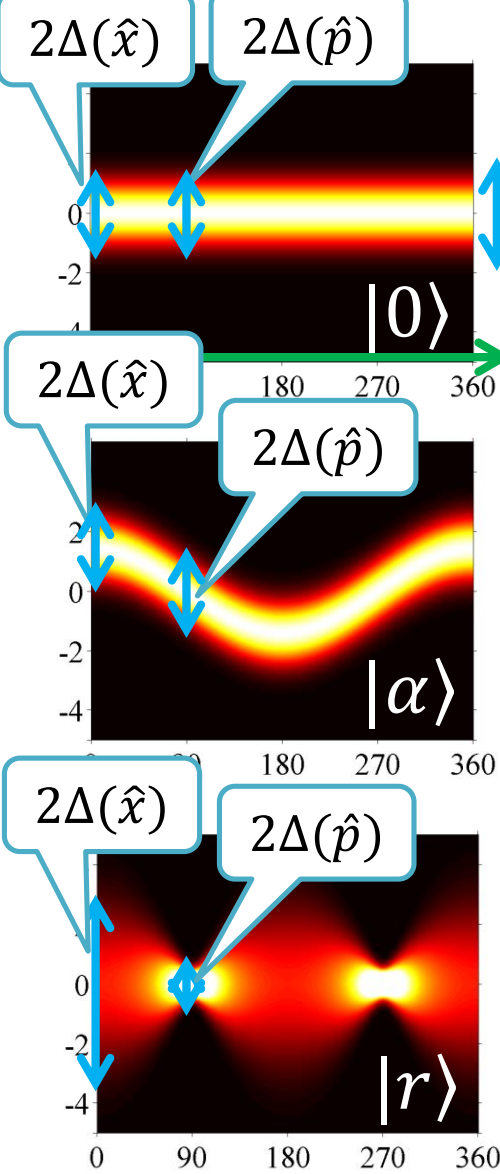


バランス型ホモダイン測定

真空場揺らぎの測定は
局部発振光の光子が
ランダムにどちらに行くかというノイズと等価



位相空間表現？



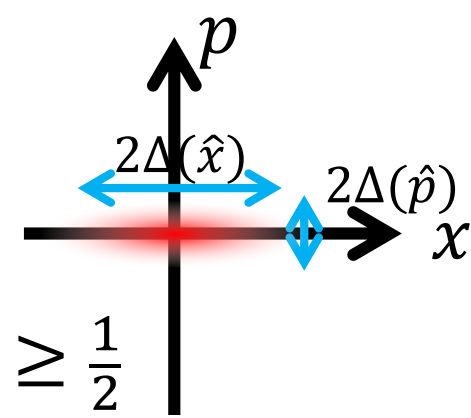
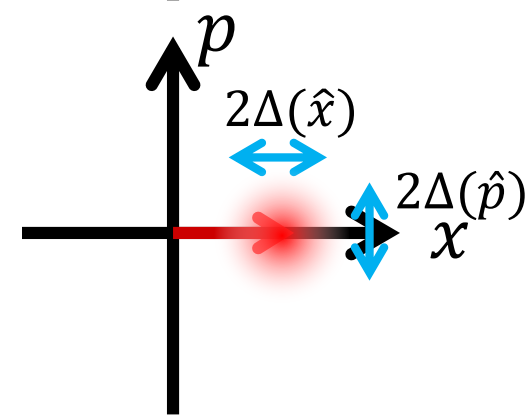
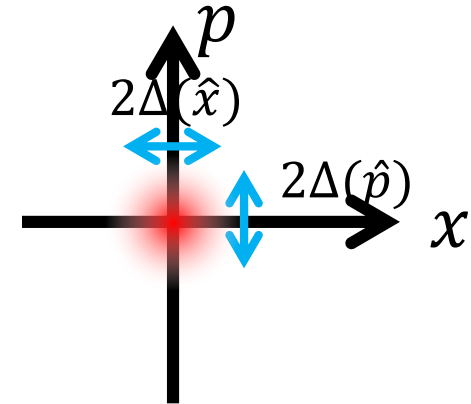
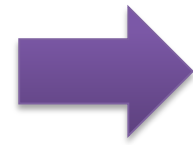
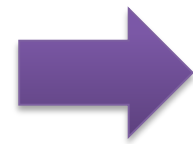
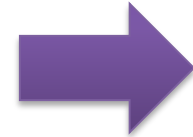
真空状態

真空場揺らぎ

θ (degree)

コヒーレント状態

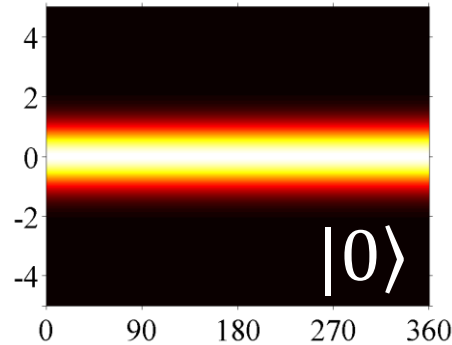
スクイーズされた真空状態



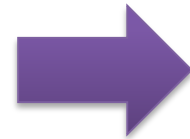
$$\Delta(\hat{x})\Delta(\hat{p}) \geq \frac{1}{2}$$

Wigner 関数 (擬確率分布)

直交位相振幅 $\hat{x} \cos \theta + \hat{p} \sin \theta$



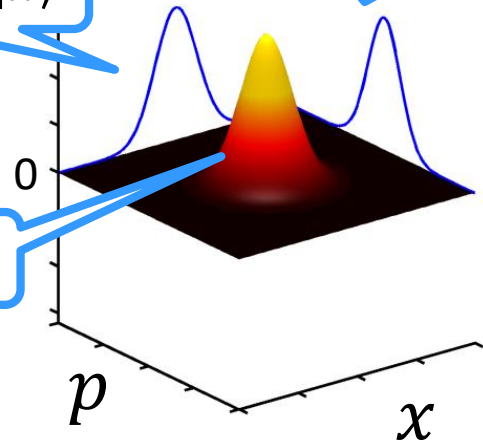
真空状態



$$P(x) = \langle x | \hat{\rho} | x \rangle$$

$$P(p) = \langle p | \hat{\rho} | p \rangle$$

Wigner 関数



定義

$$W(x, p) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \exp(ip\xi) \left\langle x - \frac{\xi}{2} \left| \hat{\rho} \right| x + \frac{\xi}{2} \right\rangle$$

擬確率分布関数

性質

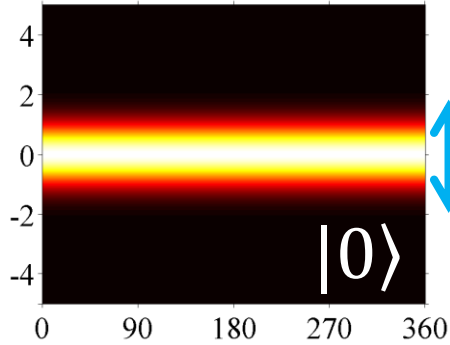
$$\langle x | \hat{\rho} | x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} dp W(x, p)$$

$$\langle p | \hat{\rho} | p \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} dx W(x, p)$$

古典的な
2変数同時確率分布
と同じ関係

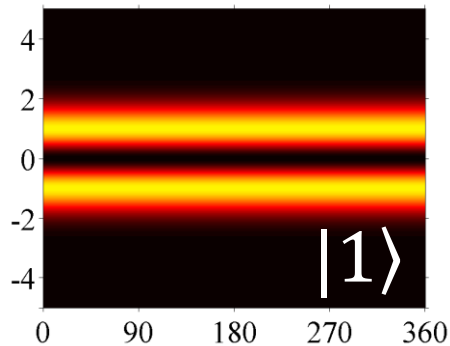
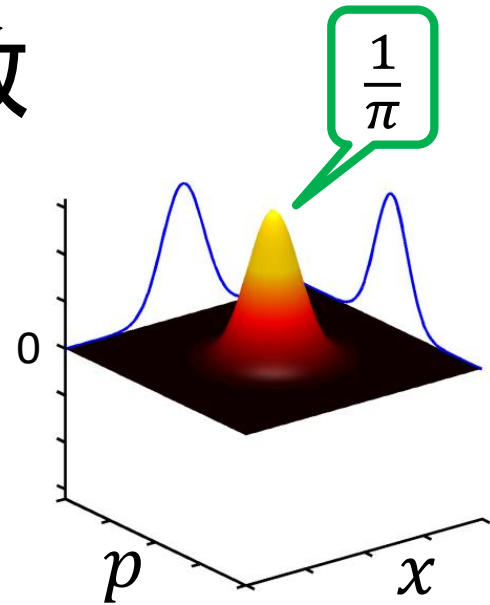
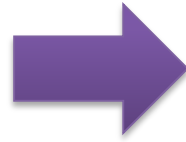
Wigner 関数

直交位相振幅 $\hat{x} \cos \theta + \hat{p} \sin \theta$

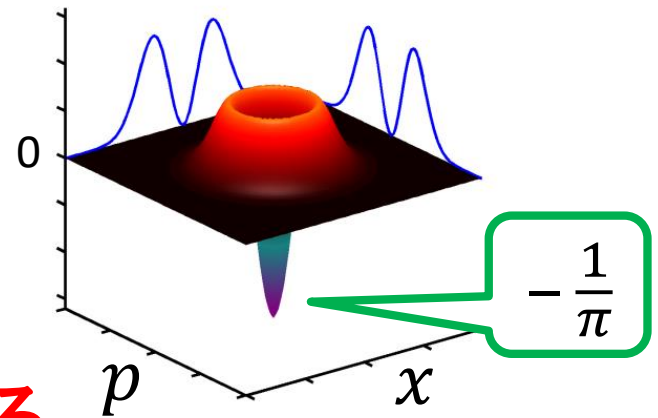
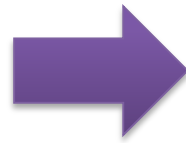


真空状態

真空場揺らぎ



単一光子状態



不確定性関係 ⇒ 負の値を取り得る

負の値は古典的な同時確率分布では現れないので
強い非古典性の証明

$$(1 - \eta)|0\rangle\langle 0| + \eta|1\rangle\langle 1|$$

$$\eta > 0.5 \text{ で } W(0,0) < 0$$

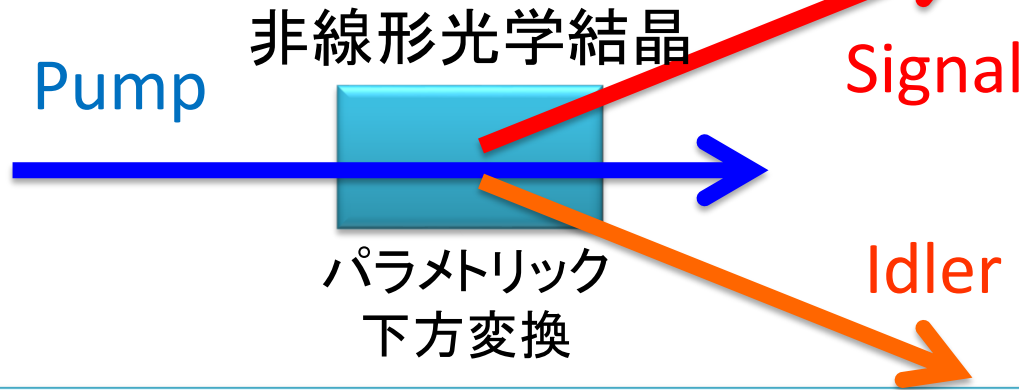
内容

- 量子光学, Wigner関数, ホモダイン測定
- 伝令付きの(heralded) 量子状態生成
- 光共振器による光子の保存実験
J. Yoshikawa et al. Physical Review X 3, 041028 (2013)
- タイミング制御された二光子の干渉実験

二次の非線形光学効果

屈折率 波長変換

非線形分極 $P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \dots$



$$\hat{H}^{(2)} \propto \hat{a}_p^\dagger \hat{a}_s \hat{a}_i + \hat{a}_p \hat{a}_s^\dagger \hat{a}_i^\dagger$$

エネルギー保存

$$\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i$$

運動量保存(位相整合)

$$\hbar\vec{k}_p = \hbar\vec{k}_s + \hbar\vec{k}_i (+m\Lambda)$$

擬似位相整合

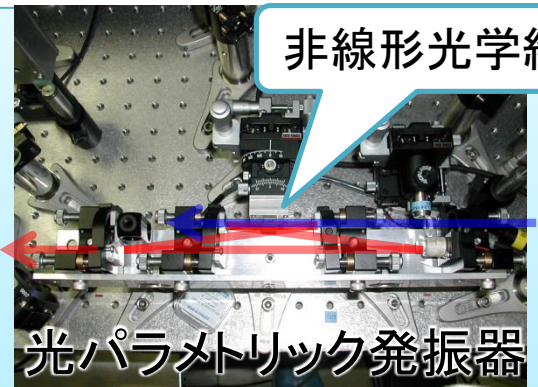
パラメトリック近似 $\hat{a}_p \rightarrow \alpha_p$

縮退 \Rightarrow スクイズド光

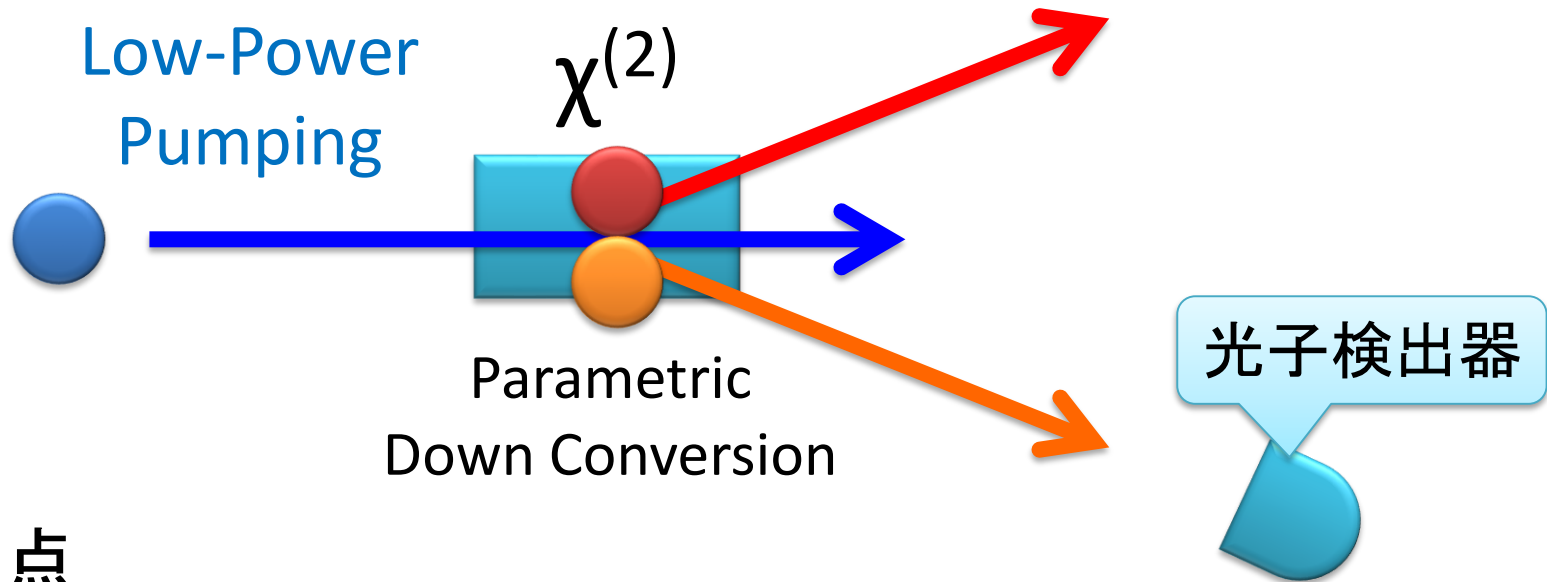
$$\hat{S}(r)|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{\cosh r}} \sum_n \frac{\sqrt{2n!}}{n!} \left(\frac{\tanh r}{2}\right)^n |2n\rangle$$

非縮退 \Rightarrow Einstein-Podolsky-Rosen エンタングルメント

$$\hat{S}_{1,2}(r)|0,0\rangle = \frac{1}{\cosh r} \sum_n (\tanh r)^n |n, n\rangle$$



伝令付き単一光子生成



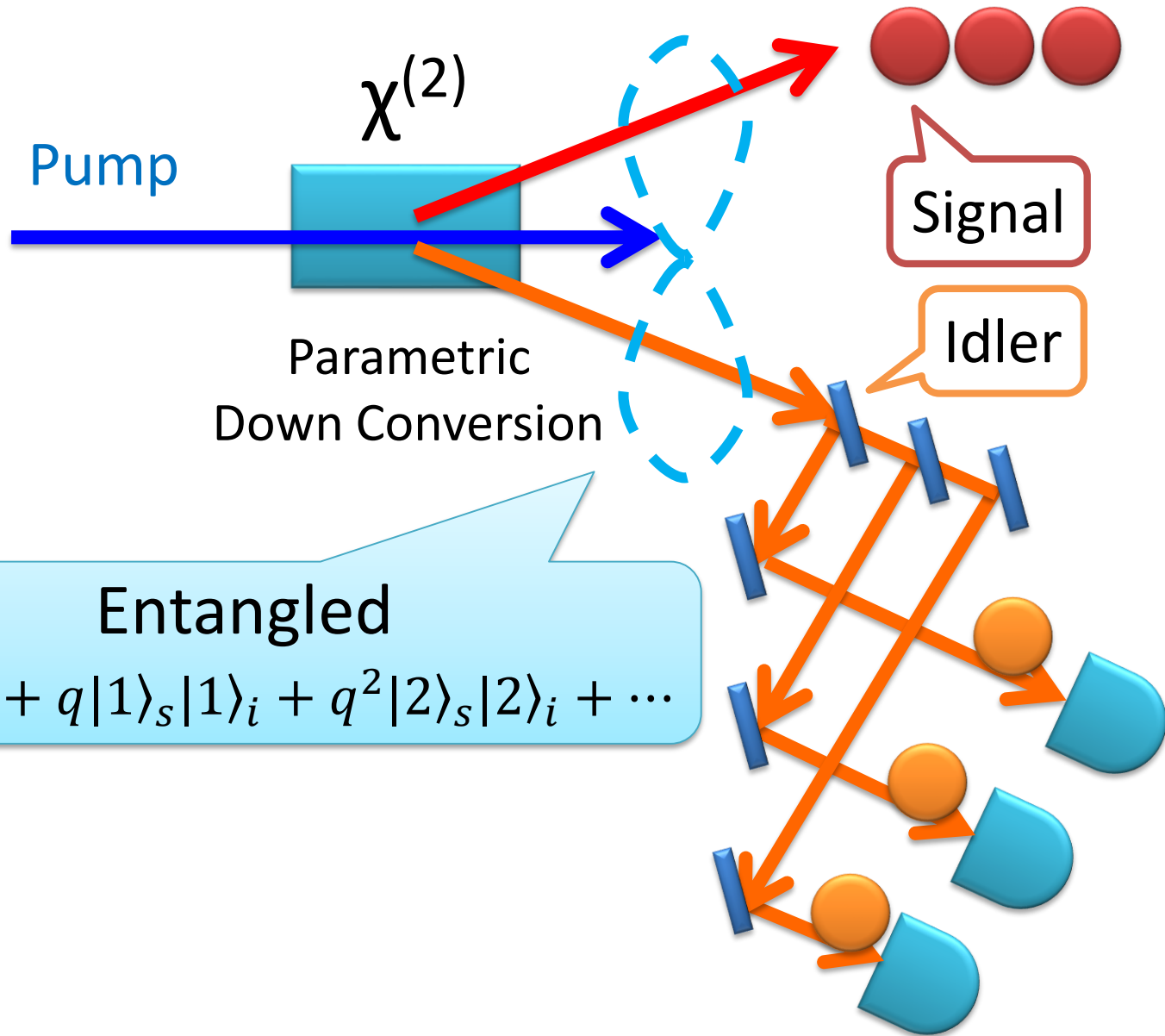
欠点

- 確率的生成

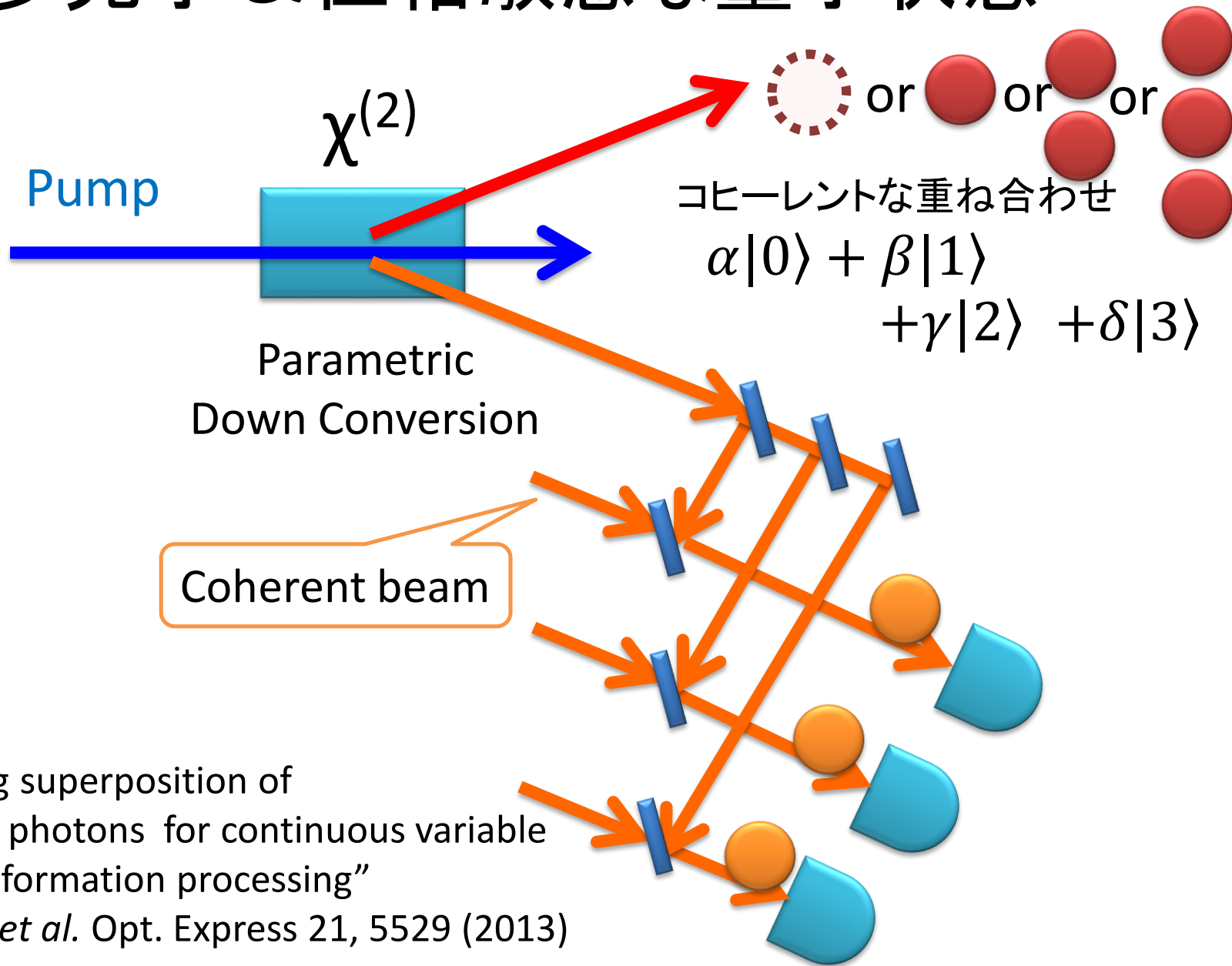
利点

- 高い純度 $\langle 1|\hat{\rho}|1\rangle > 0.5 \rightarrow$ 負の Wigner 関数 $W(0,0) < 0$
- 波長選択の自由性 \rightarrow 擬似位相整合

多光子 & 位相敏感な量子状態



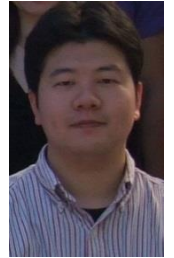
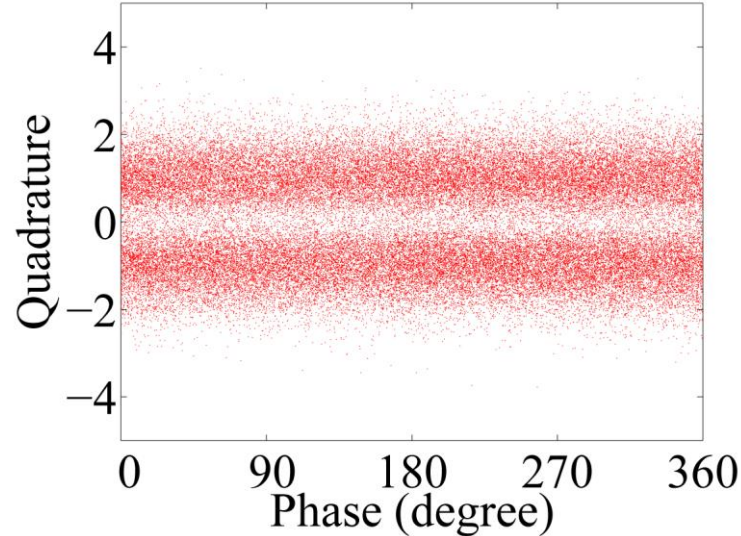
多光子 & 位相敏感な量子状態



“Generating superposition of up-to three photons for continuous variable quantum information processing”

M. Yukawa *et al.* Opt. Express 21, 5529 (2013)

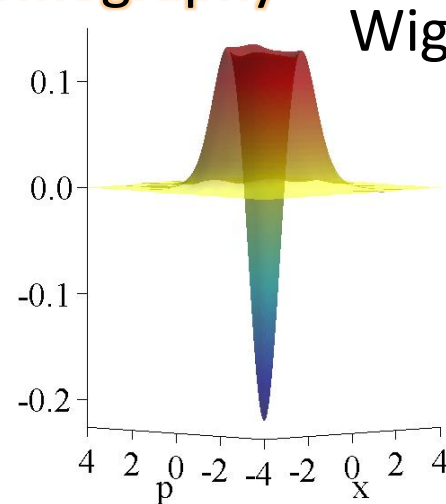
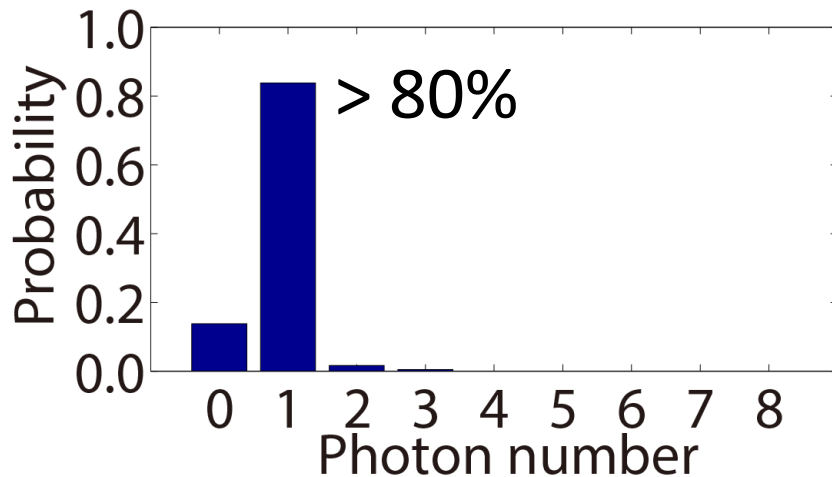
伝令付き単一光子状態



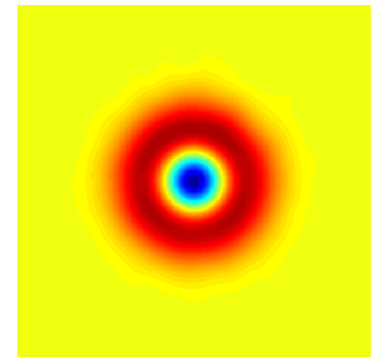
Y. Miwa *et al.*
Physical Review Letters
113, 013601 (2014)



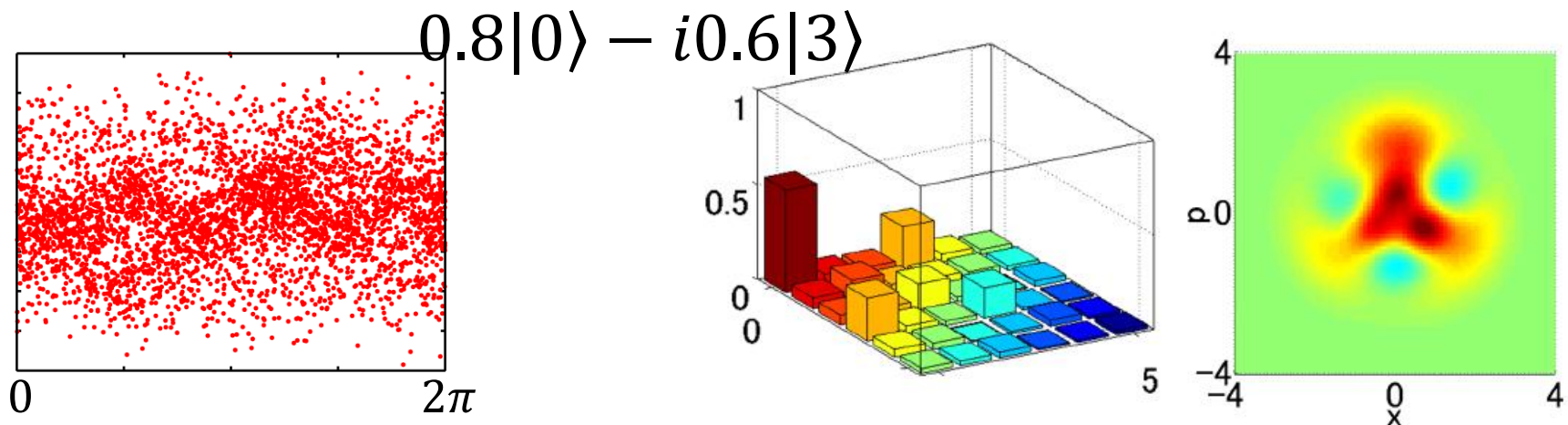
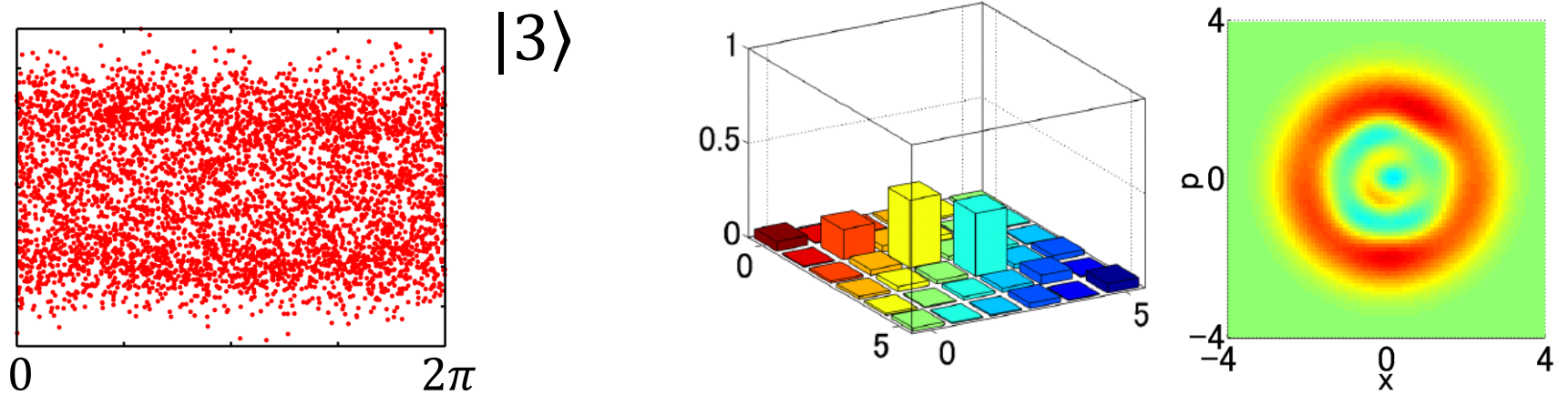
Quantum Tomography



Wigner Function



様々な非ガウス型量子状態生成

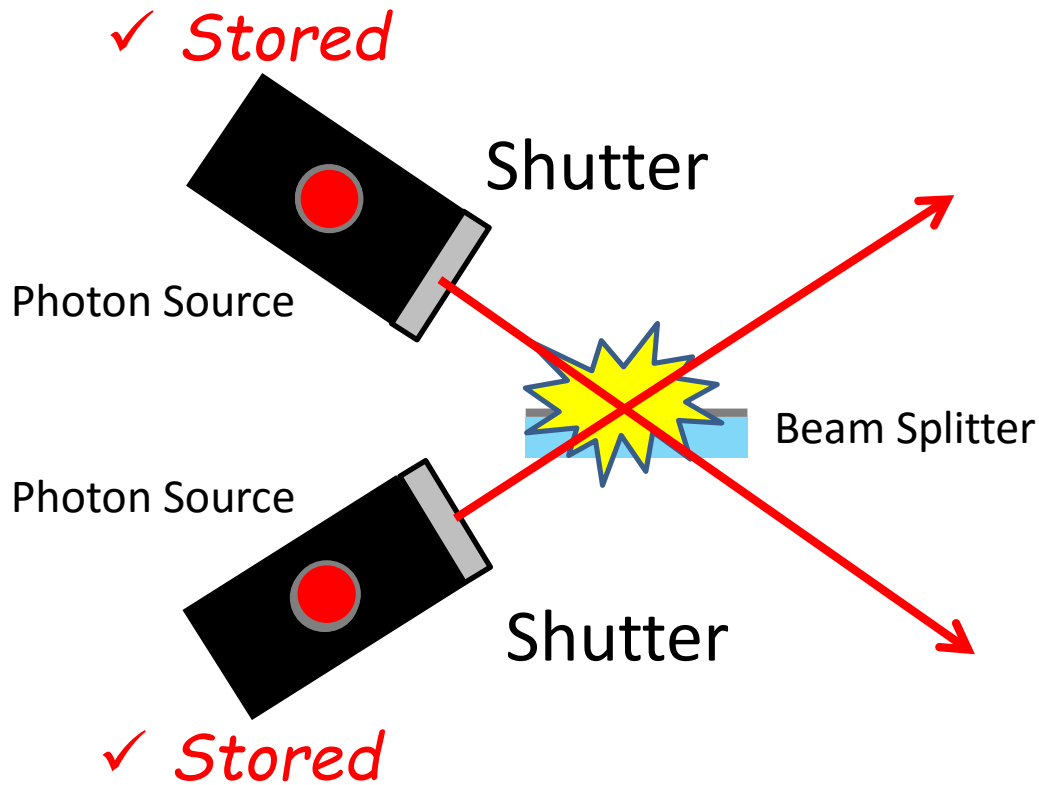


確率的方法を量子メモリーと
組み合わせて効率化？

M. Yukawa et al.,
Opt. Express 21, 5529 (2013)



メモリーの利用の例： 二光子干渉

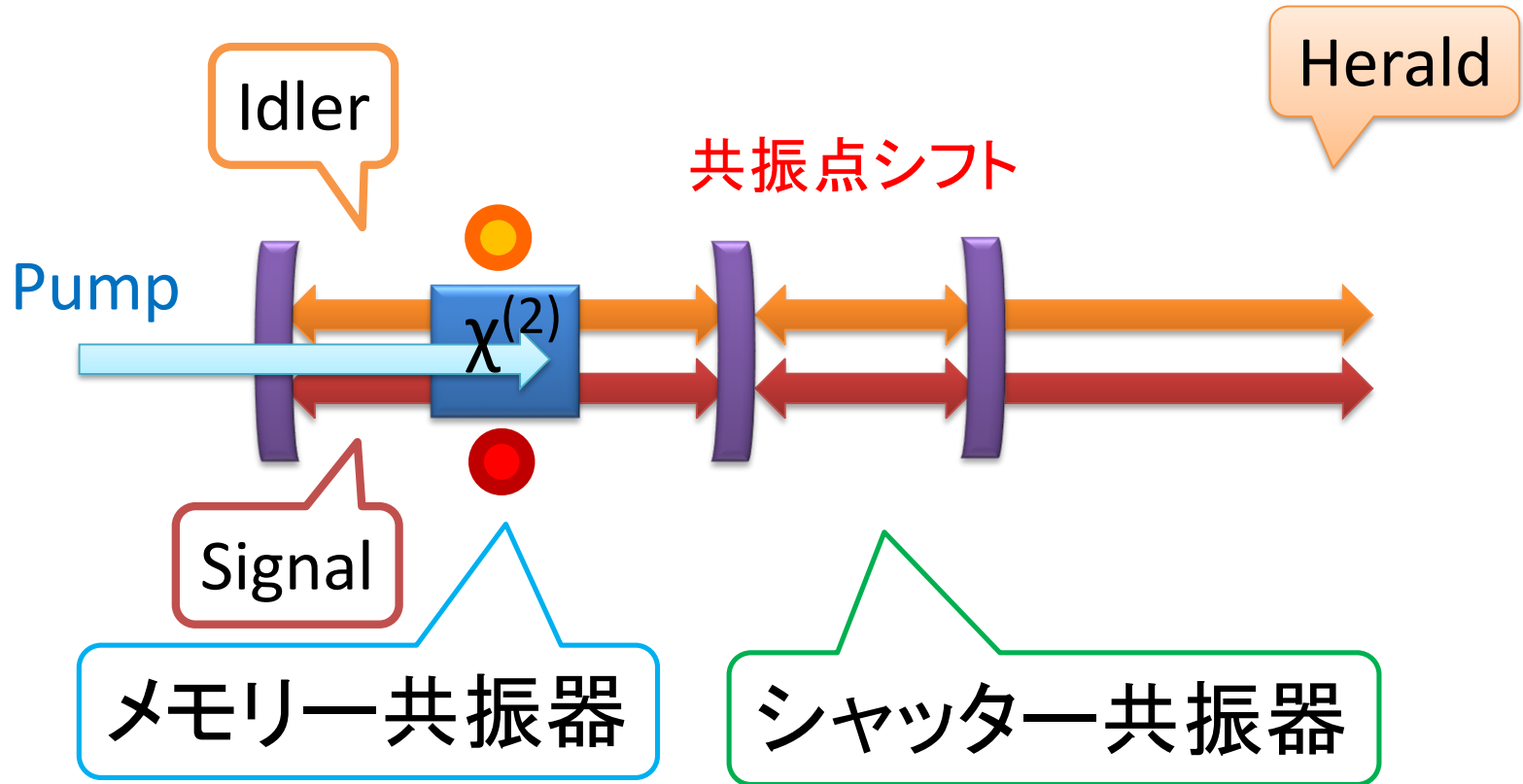


➡ 光子の効率的な利用

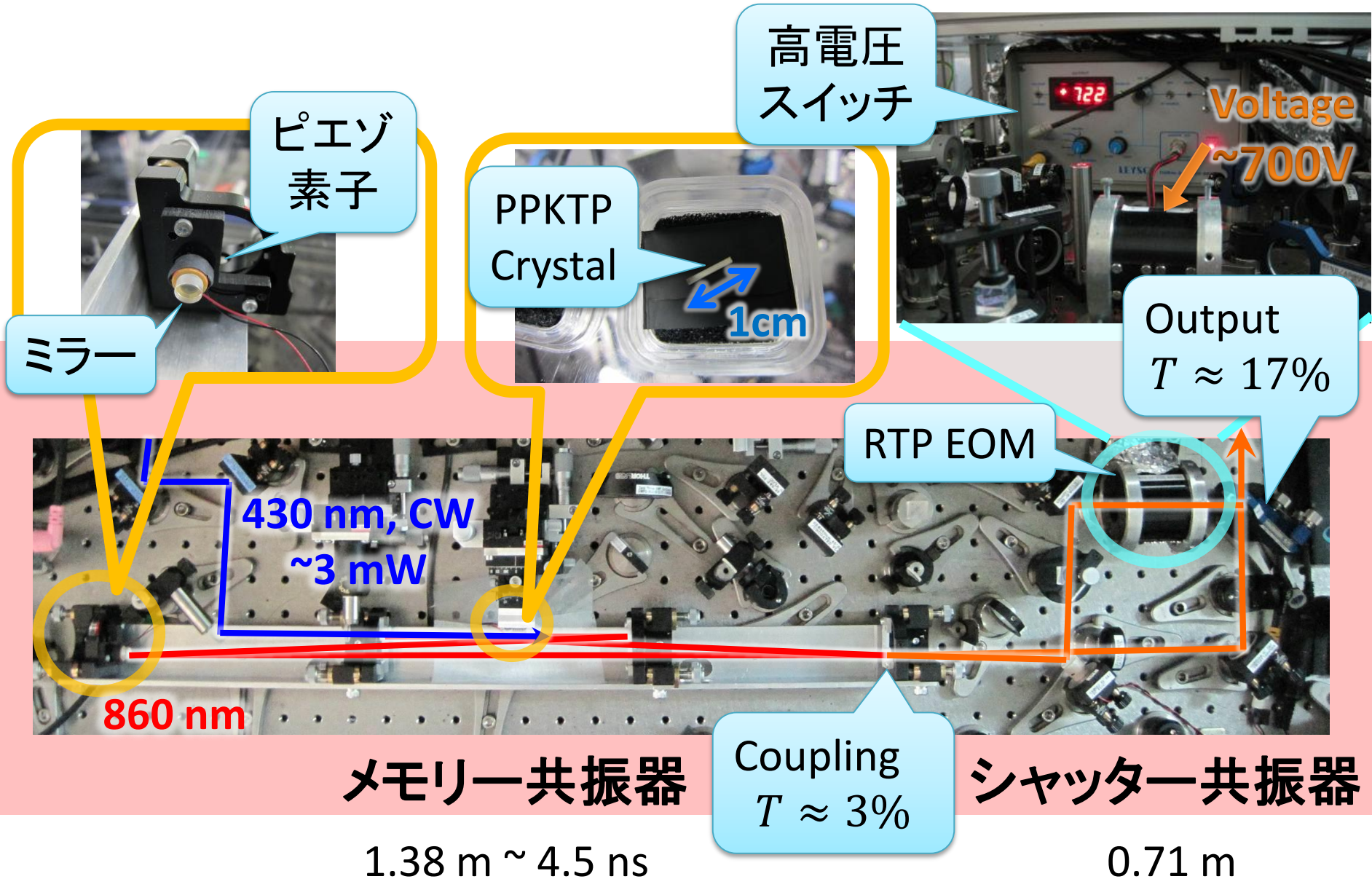
内容

- 量子光学, Wigner関数, ホモダイン測定
- 伝令付きの(heralded) 量子状態生成
- **光共振器による光子の保存実験**
J. Yoshikawa et al. Physical Review X 3, 041028 (2013)
- タイミング制御された二光子の干渉実験

共振器内への光子保存



連結共振器



ピエゾ素子

ミラー

PPKTP Crystal

1cm

高電圧スイッチ

Voltage $\sim 700 \text{ V}$

Output $T \approx 17\%$

RTP EOM

430 nm, CW
 $\sim 3 \text{ mW}$

860 nm

メモリ共振器

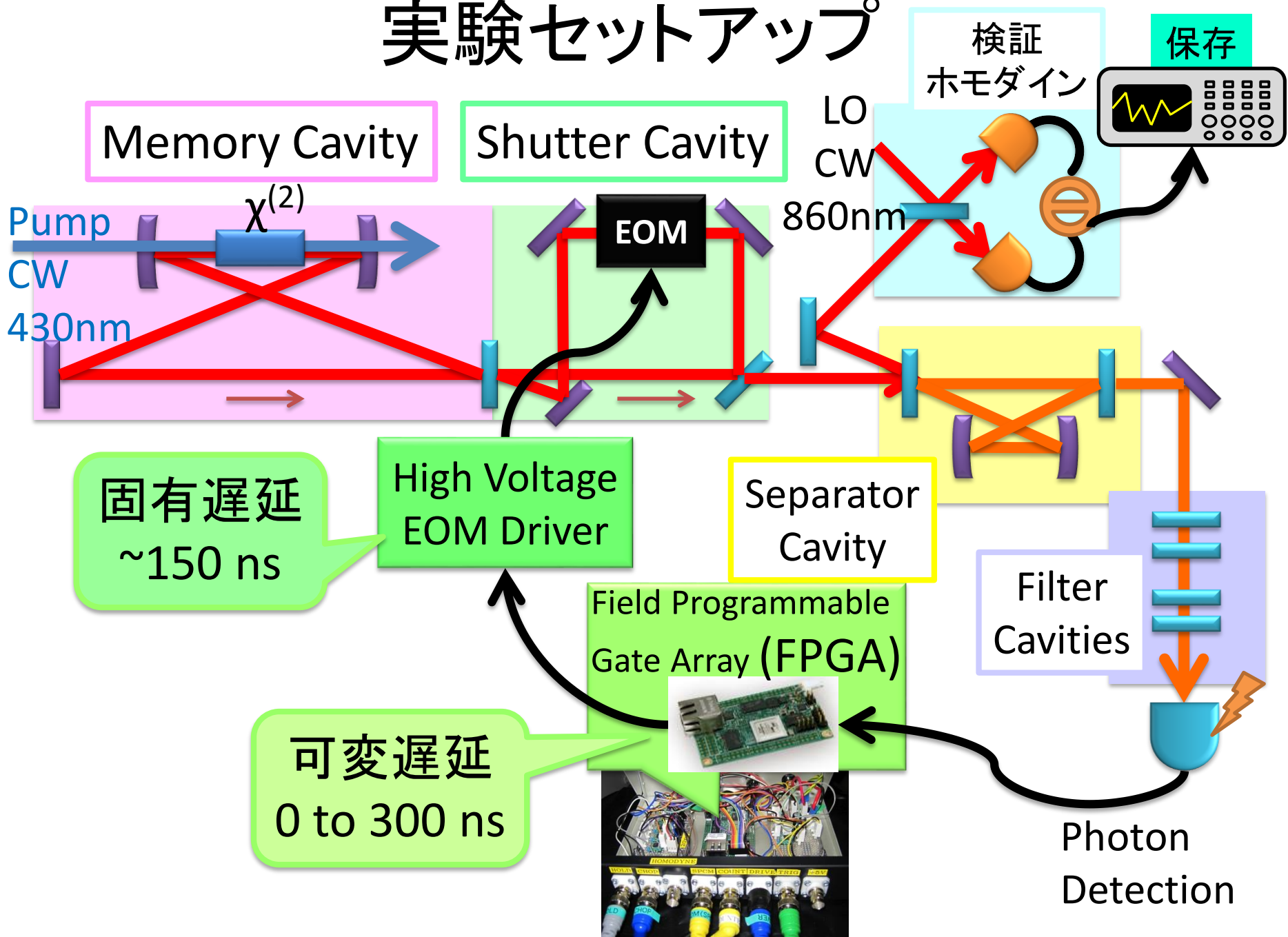
$1.38 \text{ m} \sim 4.5 \text{ ns}$

Coupling $T \approx 3\%$

シャッター共振器

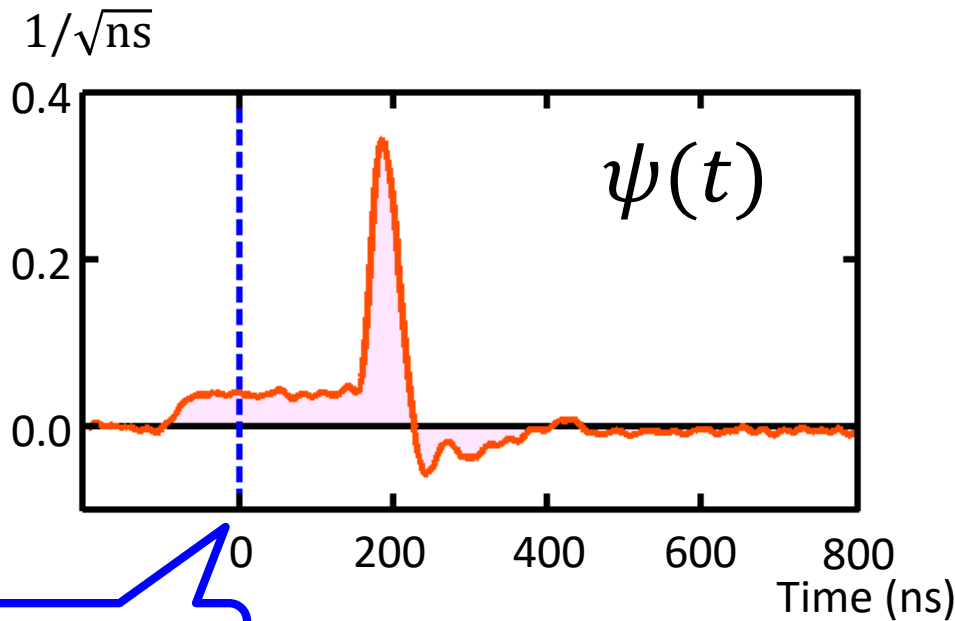
0.71 m

実験セットアップ

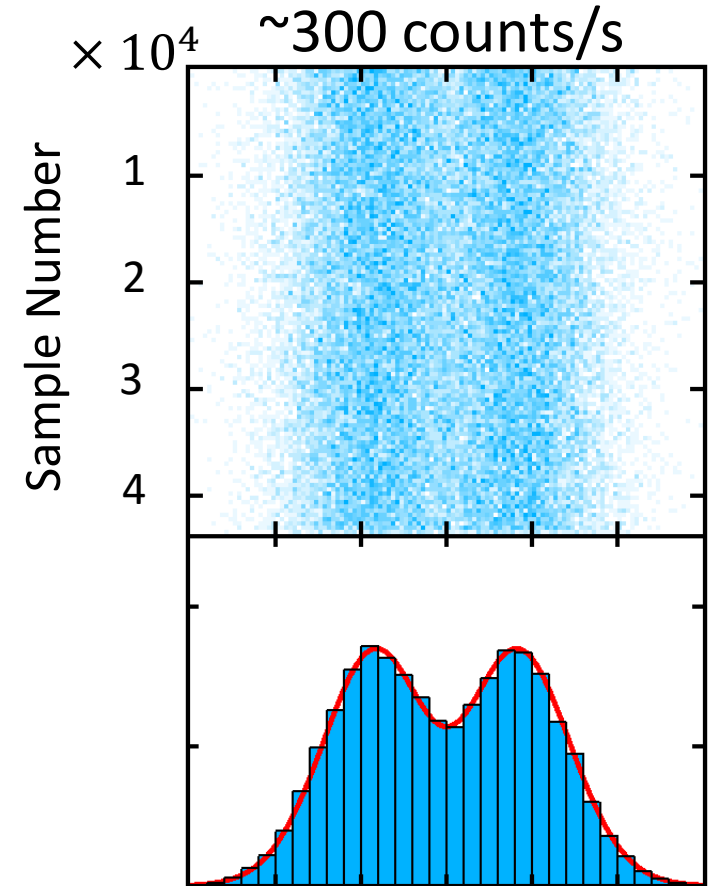
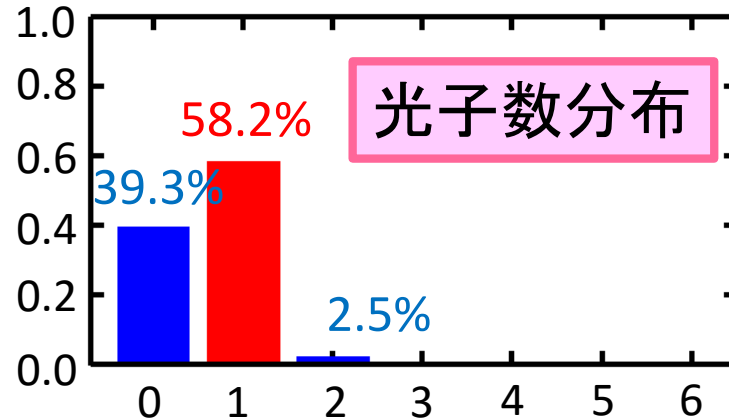


Results: 最小遅延 (~150 ns)

放出光子波束の縦モード



伝令信号



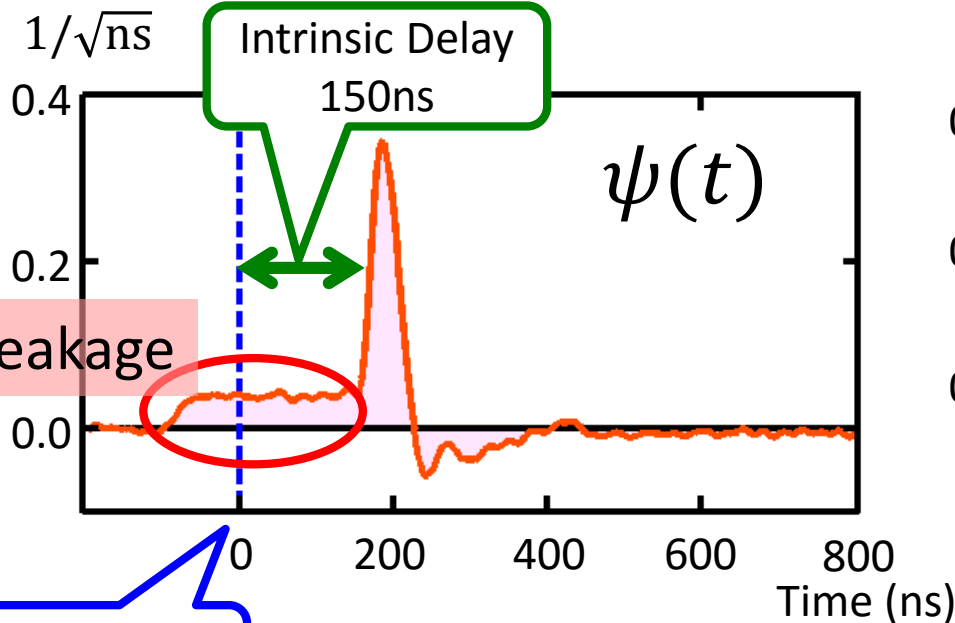
直交位相振幅

J. Yoshikawa et al.

Physical Review X 3, 041028 (2013)

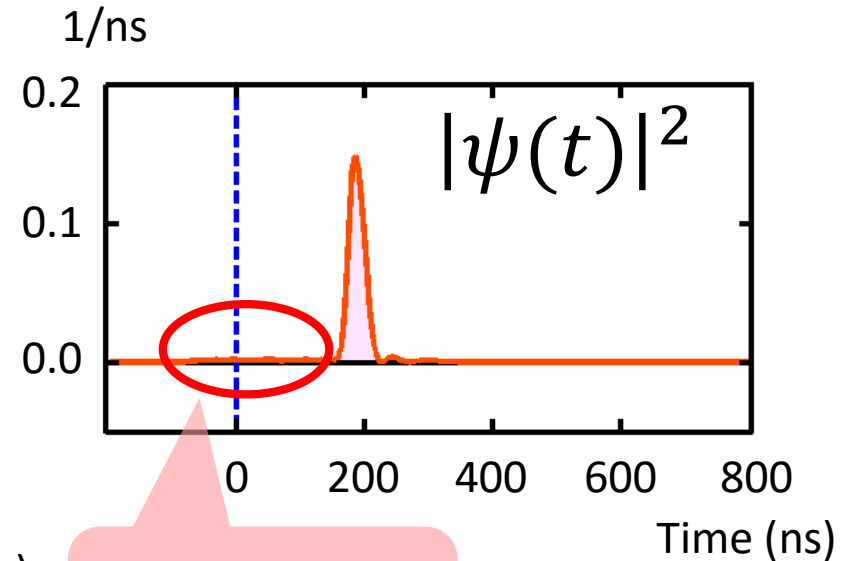
Results: 最小遅延 (~150 ns)

放出光子波束の縦モード



伝令信号

光子確率密度



Small
Contribution

J. Yoshikawa et al.

Physical Review X 3, 041028 (2013)

結果まとめ

J. Yoshikawa et al.

Physical Review X 3, 041028 (2013)

Delay

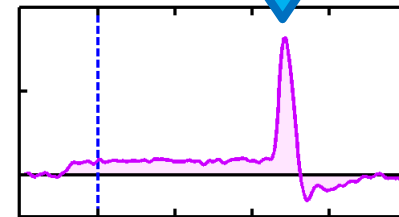
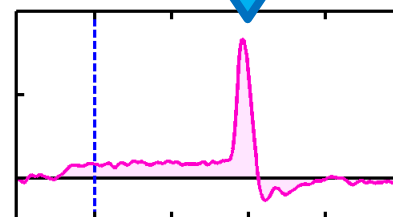
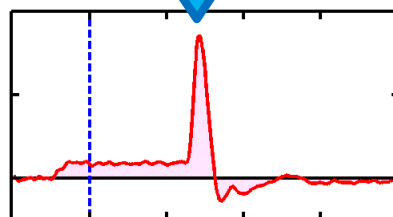
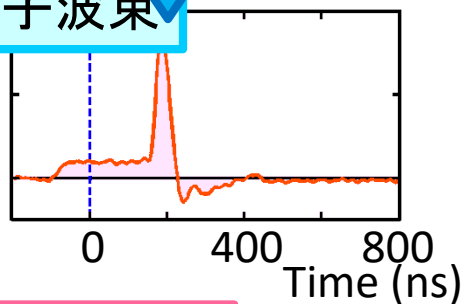
150 ns

250 ns

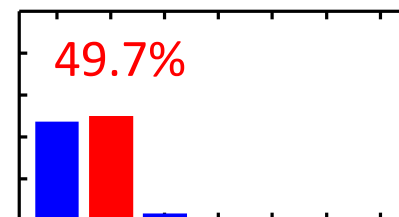
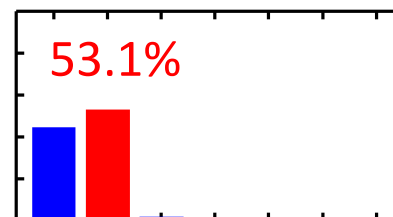
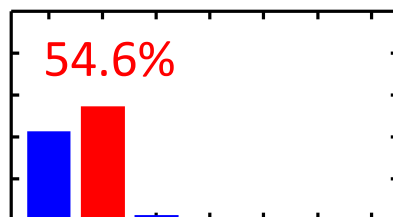
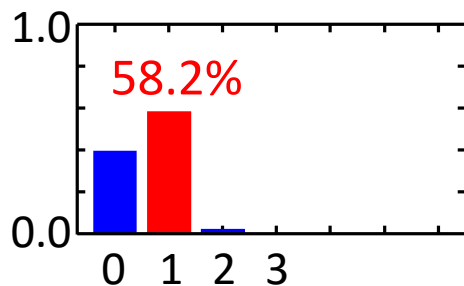
350 ns

450 ns

光子波束

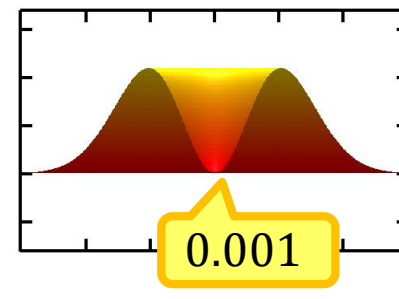
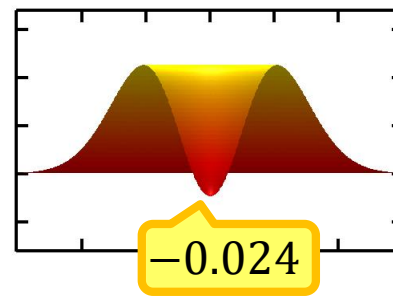
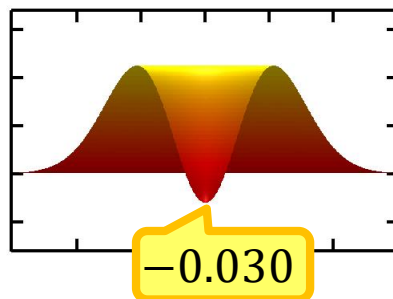
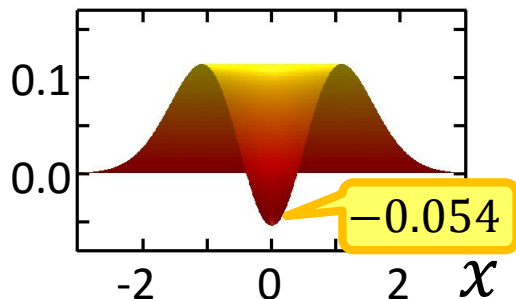


光子数分布



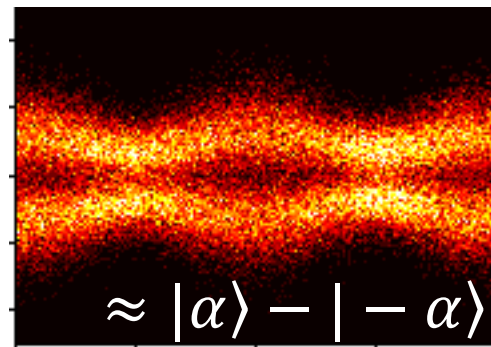
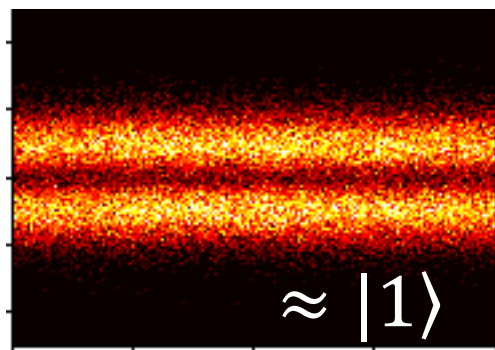
放出タイミングコントロール

Wigner 関数

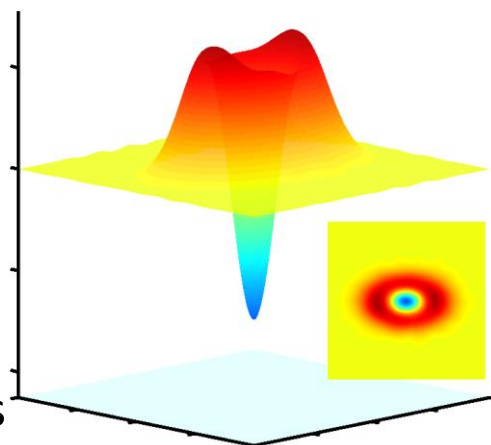
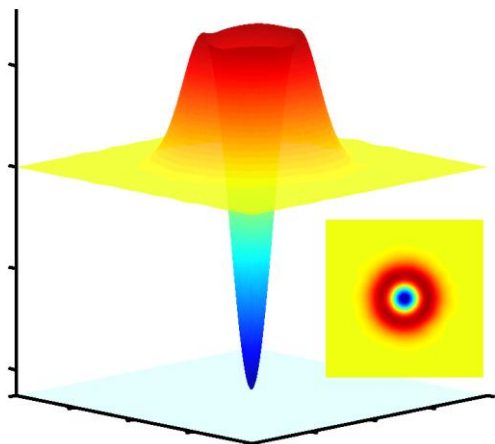
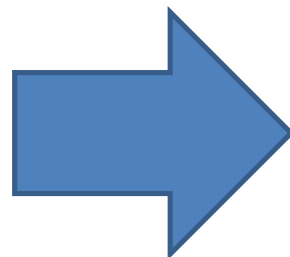


高純度の維持

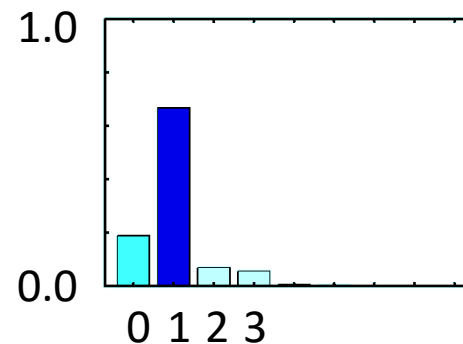
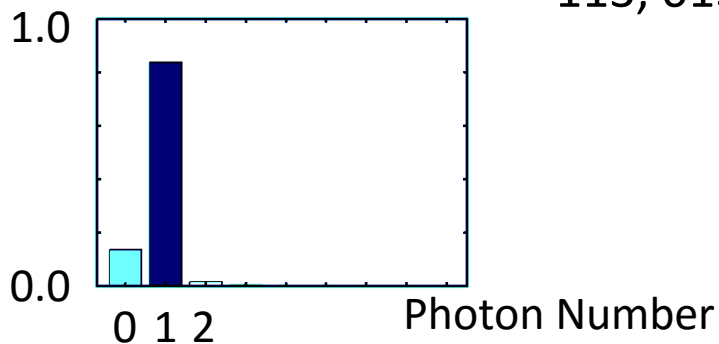
余談：単一光子からシュレーディンガーの小猫へ



Squeeze



Y. Miwa *et al.*
Physical Review Letters
113, 013601 (2014)

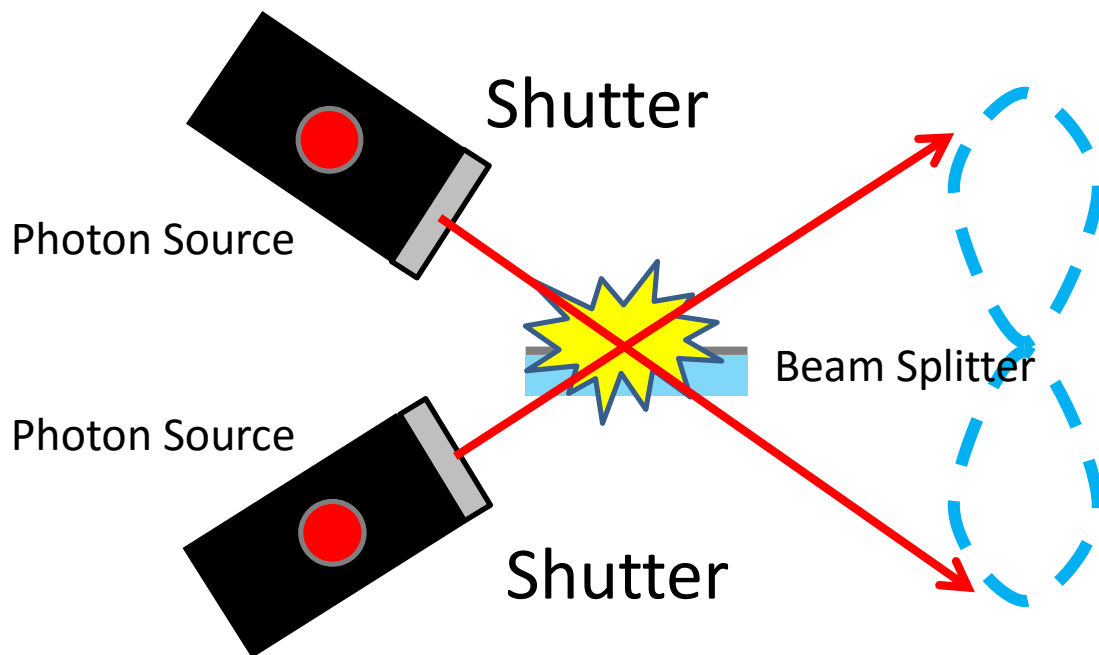


内容

- 量子光学, Wigner関数, ホモダイン測定
- 伝令付きの(heralded) 量子状態生成
- 光共振器による光子の保存実験
J. Yoshikawa et al. Physical Review X 3, 041028 (2013)
- タイミング制御された二光子の干渉実験

タイミングコントロールした二光子干渉

✓ *Stored*



Entangled

$$|2,0\rangle - |0,2\rangle$$

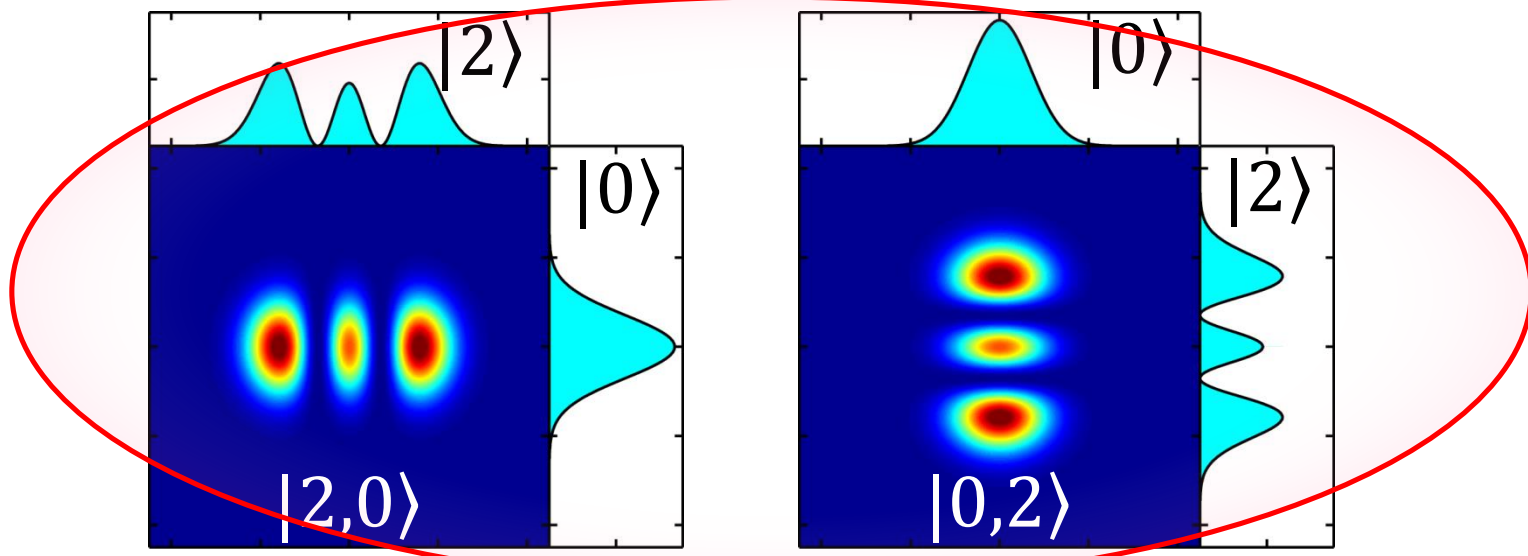
Hong-Ou-Mandel
State



ホモダイン測定で
検証

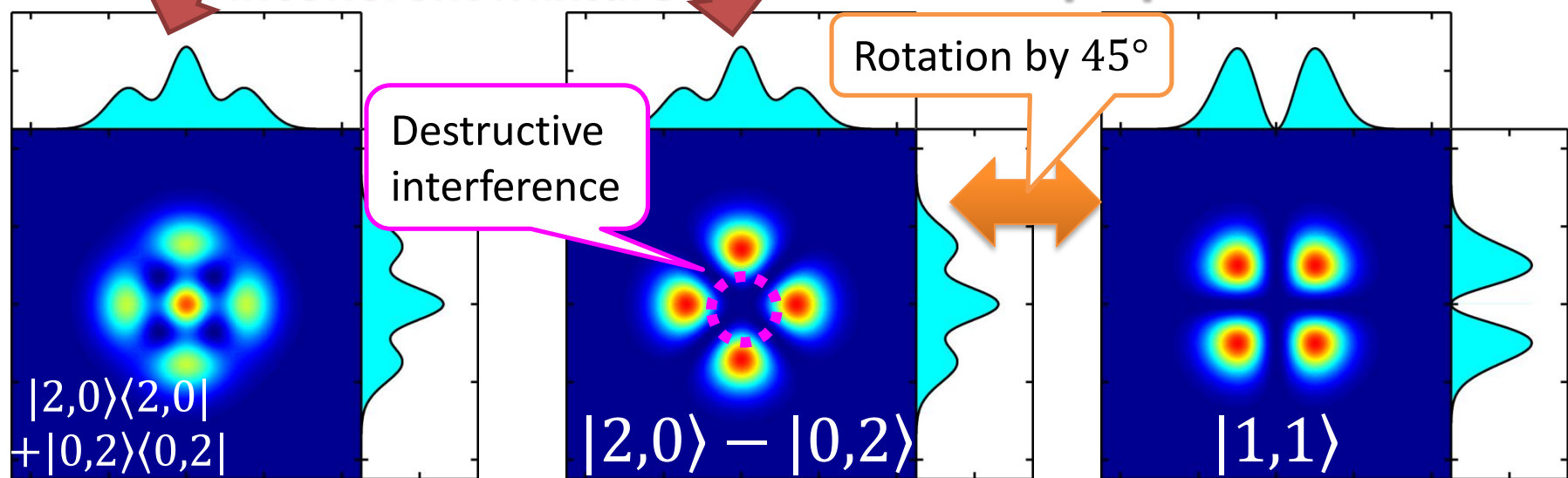
✓ *Stored*

理想状態の直交位相振幅分布



Incoherent Mixture

Coherent Superposition



実験セットアップ

Homodyne Detection
6 phases for each
($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$)
 $6 \times 6 = 36$ in total

HR -> Input Measurement
50:50 -> Output Measurement

