

クレジット：

UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2017 古澤明

ライセンス：

利用者は、本講義資料を、教育的な目的に限ってページ単位で利用することができます。特に記載のない限り、本講義資料はページ単位でクリエイティブ・コモンズ 表示-非営利-改変禁止 ライセンスの下に提供されています。

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

本講義資料内には、東京大学が第三者より許諾を得て利用している画像等や、各種ライセンスによって提供されている画像等が含まれています。個々の画像等を本講義資料から切り離して利用することはできません。個々の画像等の利用については、それぞれの権利者の定めるところに従ってください。

情報社会の工学2:ハード 量子コンピューター

量子テレポーテーションを用いて
量子コンピューターをつくる

量子の制御

東京大学工学部物理工学科

古澤 明

工学部

明るく楽しく研究を行う工学部

http://www.t.u-tokyo.ac.jp

副研究科長 古澤 明

工学部というと、工場で働く人たちを連想するのではないでしょうか？ つまり、工学部では研究をしていないと思っいる人が大半なのではないでしょうか？ 本稿の目的は、工学部では明るく楽しく研究をしているということをお知らせすることです。

みなさんは高校までの科目名である数学、物理、化学、生物の分野ではどういうことをしているのか想像がつくと思います。したがって、理学部では何をやっているのか容易に想像がつくと思います。しかし、工学という科目は高校に無いために、工学部では何をやっているのかよくわからない、あるいは、工場設計を行うための勉強のみをしていると思うのだと思います。実は工学部でも理学部と同じように、高校の科目である

数学、物理、化学、生物に関する研究をしています。ところが、理学部と決定的に違うことがひとつあります。理学部に「制御（コントロール）」という概念はありませんが、工学部では「制御」を行います。つまり、理学部では自然法則に従う現象を観測し、そこから自然法則自身を見つけて出すことを研究していると思えます。一方、工学部ではそのような自然現象に人間の手を加え、制御するという研究を行います。制御すること自身が研究なのです。大きなものでは構造物の制御つまり建築物、航空機、ロケット、化学プラント、少し小さくなると車やロボット、もっと小さいものでは分子マシンや量子を制御する量子コンピュータまで、自然現象を制御し価値を創造するのが工学部なのです。そしてこのような研究は人類社会の発展に貢献、とてつもなく楽しいものなのです。

このように、工学部でも数学、物理、化学、生物の研究を行っています。さらに言うと、自然に人間が手を入れ価値を創造しています。つまり「ものづくり」の研究をしているのが工学部です。これらを含める規模・分野で行うため十六学科も存在し、学生数、教職員数共に東京大学における最大の学部となっています。また見逃してはいけないのは、大学院を含めた外国人留学生の数が約千人となっており、極めて国際的な環境となっていることです。これは他の学部には無い工学部の大きな特徴です。たとえば、毎週金曜日の昼休みにはインターナショナル・フライデー・ラウンジが企画され、外国人留学生と気軽に英語でのおしゃべりが楽しめます。さらに、日本人学生が英語のスキ

文学部

「文」にいざなう

http://www.l.u-tokyo.ac.jp

文学部長 佐藤健二

入学されたみなさんに、文学部という「文」の学部から歓迎と勧誘のごあいさつ。文部という、文字をつらね主語と述語をそなえたいわゆる「文章」がイメージされますが、書かれたものだけではありません。「天文」の語の存在が暗示するように、自然や空間や社会に刻みこまれたものの探究までを指しています。その中心にあって人間固有の意味世界の構築と継承を支えているのが、ことばとい

うメディアです。「ことば」は微妙なことから複雑な感情を説明する力を備え、それぞれの身体に共鳴と了解の感覚をもたらします。それは他者との信頼にもとづく協働をつくりあげ、また個というかけがえのない主体を生みだすでしょう。人間はこの媒体をつかって、理や義をめぐる「思想」を高くかけ、想像力ゆたかに編まれた「文学」の作品を生みだし、記憶や事実の物語としての「歴史」を織りあげ、「社会」という公共性を有する場を立ちあげてきました。

ことばはひとをゆさぶり動かします。中学生のころに読んだ角川文庫の『谷川俊太郎詩集』を思い出します。からだが強くゆり動かされた。紙のうえに印刷された文字しかそこないのに、なぜ、それほど強く身体にひびくのか。不思議に思いました。どんな詩のどんな一節だったかは憶えていません。本を探し、詩句を見つけようとしてみましたが、四十五年前と同じ感動には出会えませんでした。大切なものをなくしてしまったような気がしてすこし悲しかったけれど、ことばの力への驚きは今も私を支えています。

思うに、ことばの力の源は、「伝える」「考える」「感じる」という三つの動詞であらわせるでしょう。手でつかみ相手にじっさいにわたせるのは、適当な重さ大きさの物体でしかありません。これに對し、ことばが連ぶであろう対象はひろく、現実の両手ではつかめないものにまで拡がっています。それは意味や意識やイメージを直接につかむ「もうひとつの手」であり、「伝える」という機能もそこで生まれま

す。

しかし、ことばにはそれ以上の働きがあります。「考える」という活動を可能にするのです。すなわち音声のせなかに状況の記憶をきぎみ、経験として保持し、を通じて記録として参

あらたに編集し、理想をて書き変える。文字と事普及は、単なる外部記憶拡大の歴史ではありません。つまり、それは使

しての身体を超え、社会共同の思考を可能にするひとつの脳」だったの

見落とされがちだが「感じる」機能も大切

皮膚は、自分と環境との

にあって、自己をつつ

かな外皮として存在して

す。と同時に、この外皮

界のありようを感じると

1でした。この皮膜で

は痛みや温度や圧力を感

ける。ことばも同じで

から、ひとはことばに傷

あるいはその温かさに

るのです。ことばは社会

う空間に拡張された身体

り、その熱さや強さや

感じ分ける「もうひとつ

膚」なのです。

であればこそ、情報

ためというだけの「文

解は、平板な矮小化だと

ざるをえません。こと

考という内面現象を媒

外なる世界のありよう

する媒体としてあるか

そ、それぞれの身体に

感覚をさぐり、社会の公

に拡張する力を有する

す。さらにいうなら、

わからなさを明晰に對

し、不可解や不思議の

向かいあう力、あるいは

かかっている常識の集

盾を、論理によって浮

がらせる構築力をもっ

す。その意味で、こと

ぶという実践になくては

ない道具であり、また「

という卒業要件の基礎

るわけです。

なぜ量子コンピューター？

グーグル

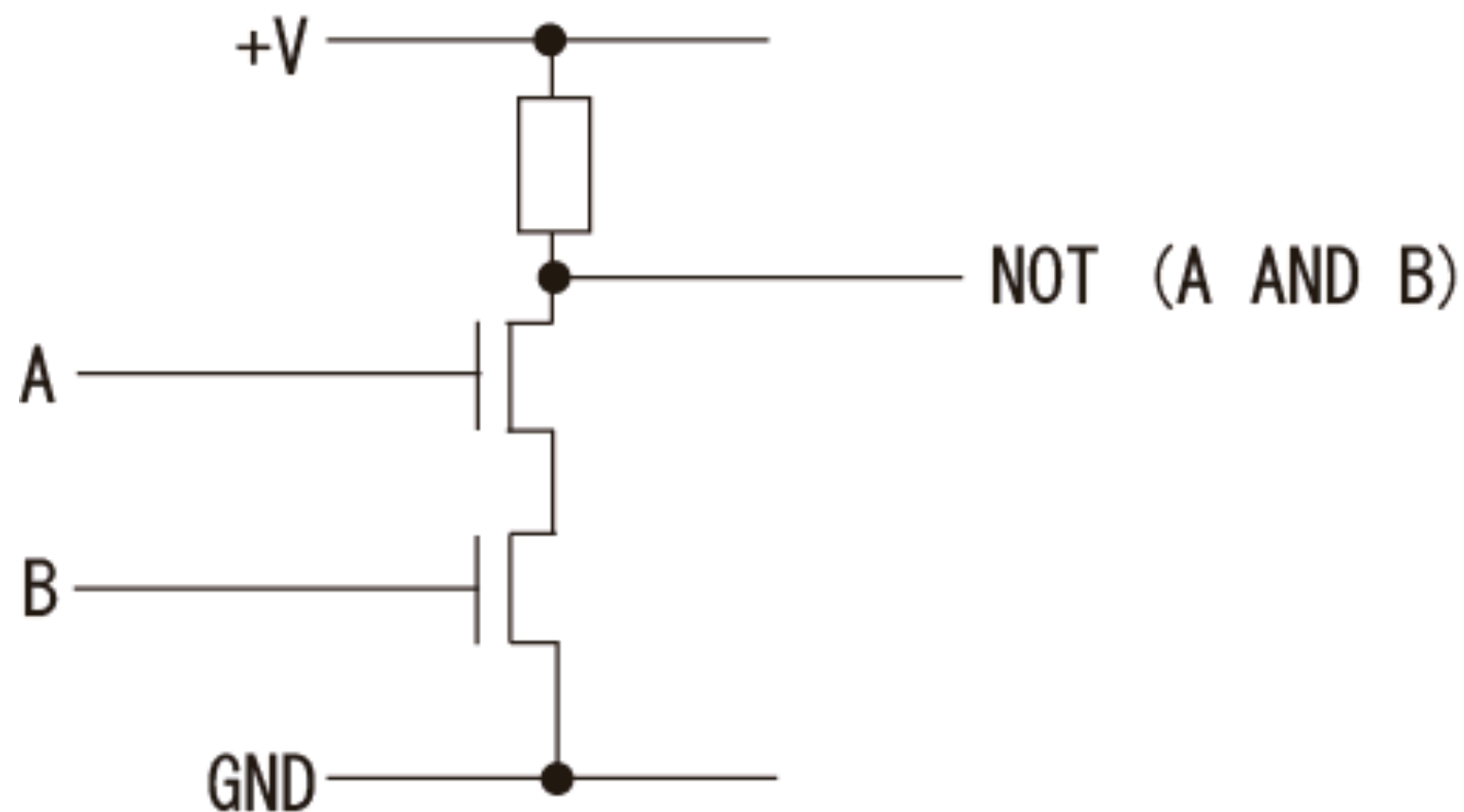
自動運転

量子コンピューター

量子コンピューターは未来の自動車のキーテクノロジー

古典論理ゲート

NANDゲート



量子論理ゲート

$$c_0|01\rangle + c_1|10\rangle \left\{ \begin{array}{c} \text{---} \boxed{\phi} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} c_0|01\rangle + c_1 e^{i\phi} |10\rangle$$

Z軸回り回転ゲート

量子テレポーテーションとは 量子オペアンプ（量子演算増幅器）

光子なし	$ 0\rangle$
光子あり	$ 1\rangle$

古典コンピューター

2進数の足し算回路(半加算器)

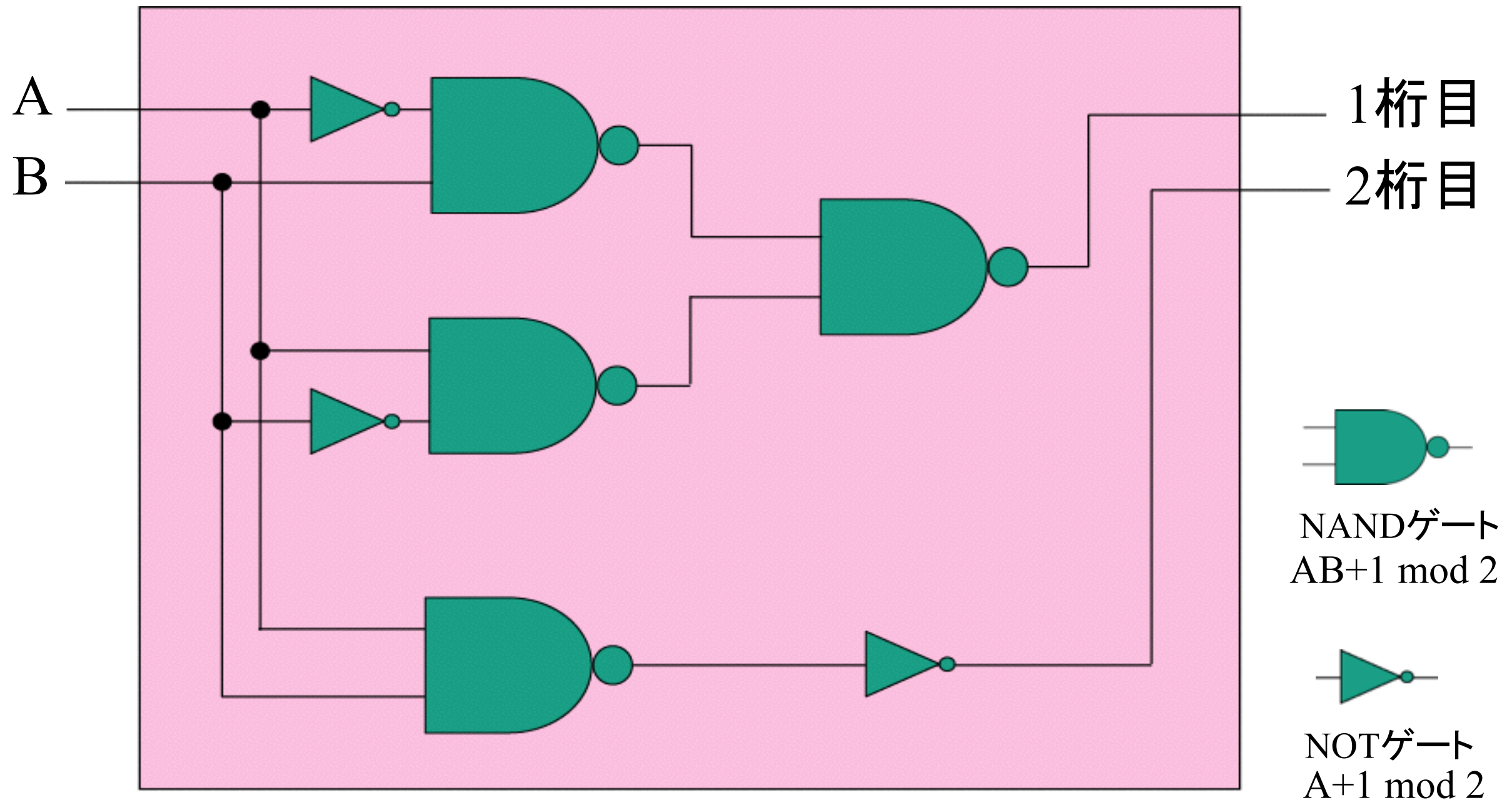
A, B = 0, 1

$$0+0=00$$

$$0+1=01$$

$$1+0=01$$

$$1+1=10$$



量子コンピューター

2進数の足し算回路(半加算器)

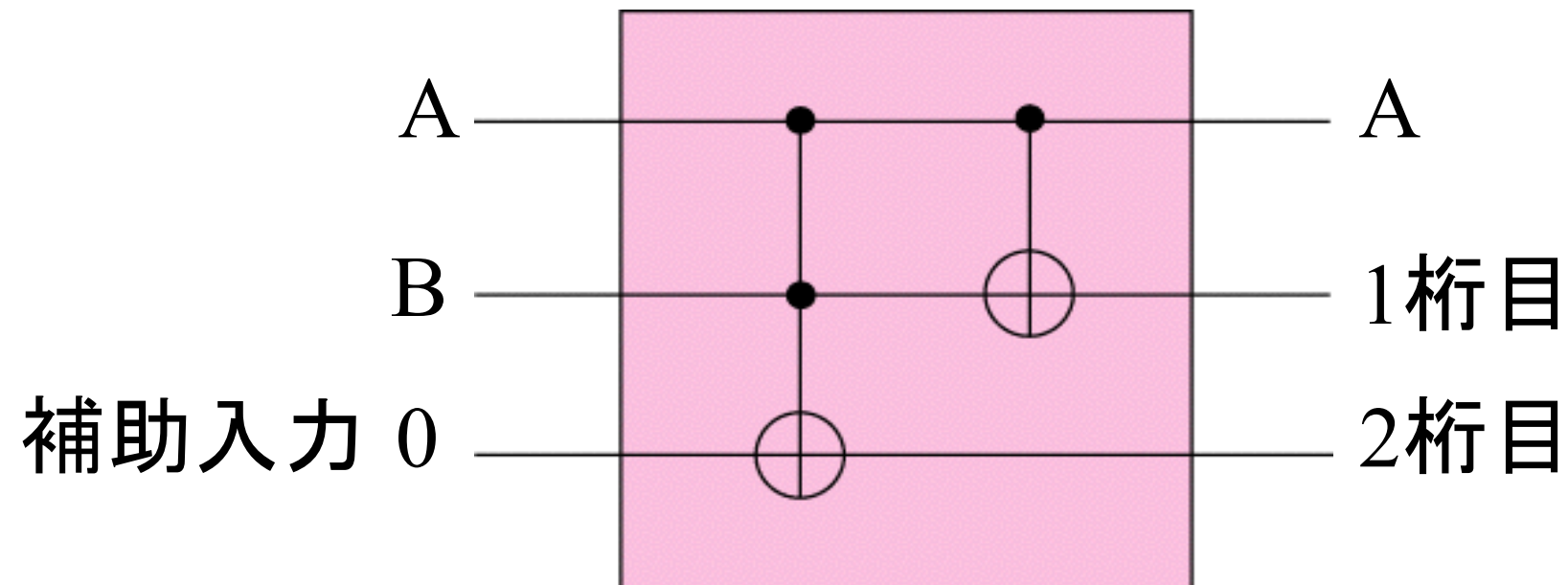
$$A, B = c_0 |0\rangle + c_1 |1\rangle$$

$$0+0=00$$

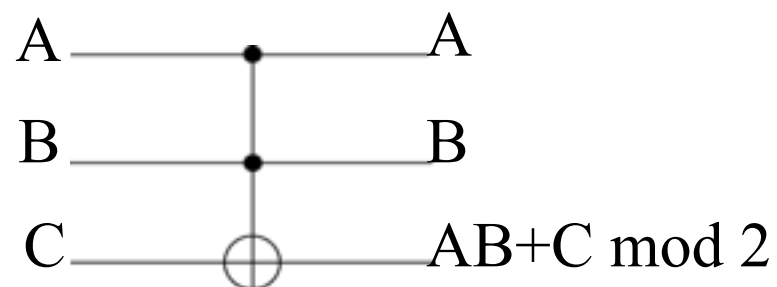
$$0+1=01$$

$$1+0=01$$

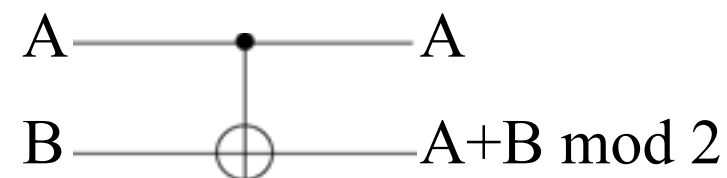
$$1+1=10$$



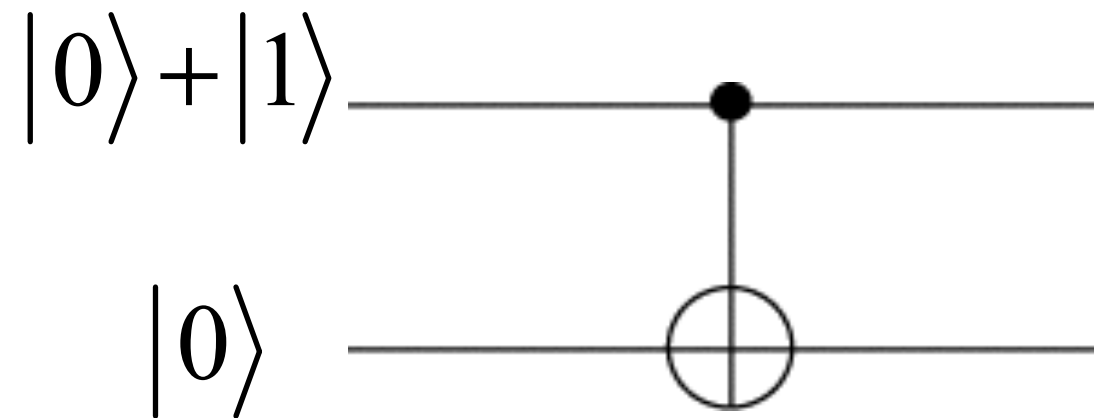
制御制御NOT



制御NOT

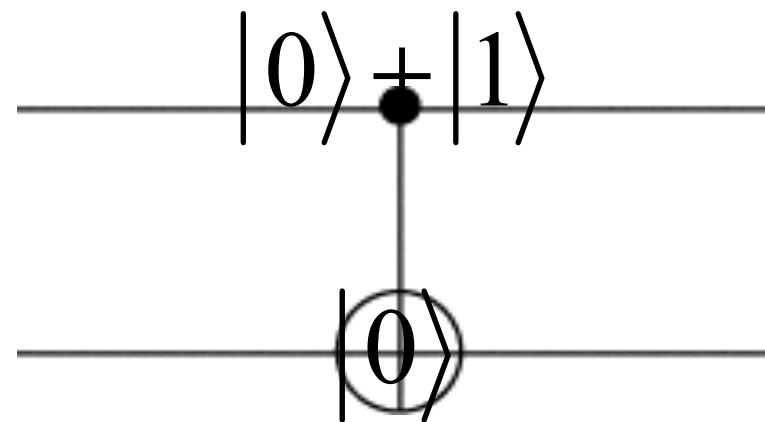


量子コンピューターの本質



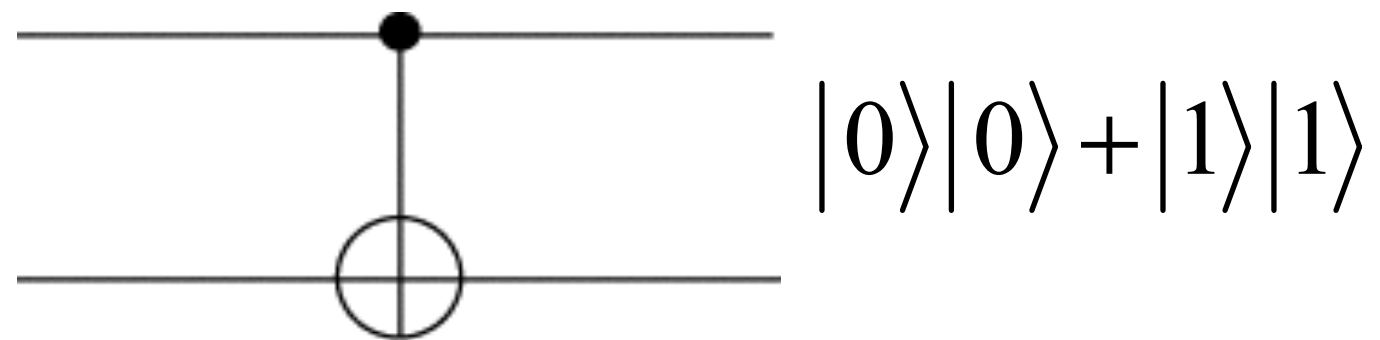
制御NOT

量子コンピューターの本質



制御NOT

量子コンピューターの本質



制御NOT

量子もつれ

$$[R_i, L_j] = i\hbar \delta_{ij}$$

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$$

不確定性原理

位置と運動量を同時に決めることはできない

$$[R_i, L_j] = i\hbar \delta_{ij}$$

$$[\hat{x}_A, \hat{p}_A] = i\hbar$$

不確定性原理

1つの量子の

位置と運動量を同時に決めることはできない

A

$$[R_i, L_j] = i\hbar \delta_{ij}$$

$$[\hat{x}_A, \hat{p}_A] = i\hbar$$

不確定性原理

1つの量子の

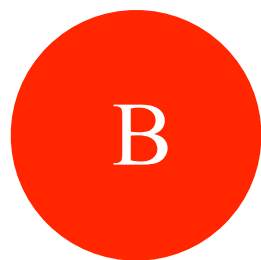
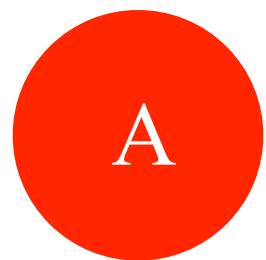
位置と運動量を同時に決めることはできない

1つの量子では1つ物理量を
決めることができる

$$[R_i, L_j] = i\hbar \delta_{ij}$$

1つの量子では1つ物理量を
決めることができる

2つの量子では2つ物理量を
決めることができる



$$[\hat{x}_A, \hat{p}_B] = 0$$

$$[R_i, L_j] = i\hbar \delta_{ij}$$

1つの量子では1つ物理量を
決めることができる

2つの量子では2つ物理量を
決めることができる

$$[\hat{x}_A - \hat{x}_B, \hat{p}_A + \hat{p}_B] = [\hat{x}_A, \hat{p}_A] - [\hat{x}_B, \hat{p}_B] = 0$$

2つの量子では相対位置と運動量の和を
同時に決めることができる

$$[R_i, L_j] = i\hbar \delta_{ij}$$

2つの量子では2つ物理量を
決めることができる

$$[\hat{x}_A - \hat{x}_B, \hat{p}_A + \hat{p}_B] = [\hat{x}_A, \hat{p}_A] - [\hat{x}_B, \hat{p}_B] = 0$$

2つの量子では相対位置と運動量の和を
同時に決めることができる

$$\left. \begin{array}{l} \hat{x}_A - \hat{x}_B \\ \hat{p}_A + \hat{p}_B \end{array} \right\} \text{の同時固有状態} \quad \int_{-\infty}^{\infty} dx |x\rangle_A |x\rangle_B$$

固有値=0

$$= \int_{-\infty}^{\infty} dp |p\rangle_A |-p\rangle_B$$

量子もつれ状態=EPR状態

2つの量子では相対位置と運動量の和を同時に決めることができる

$$\left. \begin{array}{l} \hat{x}_A - \hat{x}_B \\ \hat{p}_A + \hat{p}_B \end{array} \right\} \text{の同時固有状態} \quad \int_{-\infty}^{\infty} dx |x\rangle_A |x\rangle_B$$

固有値=0

$$= \int_{-\infty}^{\infty} dp |p\rangle_A |-p\rangle_B$$

量子もつれ状態=EPR状態

$$\hat{x}_A - \hat{x}_B \rightarrow 0$$
$$\hat{p}_A + \hat{p}_B \rightarrow 0$$

2つの量子では相対位置と運動量の和を同時に決めることができる

シュレーディンガー描像

$$\left. \begin{array}{l} \hat{x}_A - \hat{x}_B \\ \hat{p}_A + \hat{p}_B \end{array} \right\} \text{の同時固有状態} \quad \text{固有値}=0$$
$$\int_{-\infty}^{\infty} dx |x\rangle_A |x\rangle_B = \int_{-\infty}^{\infty} dp |p\rangle_A |-p\rangle_B$$

量子もつれ状態=EPR状態

ハイゼンベルグ描像

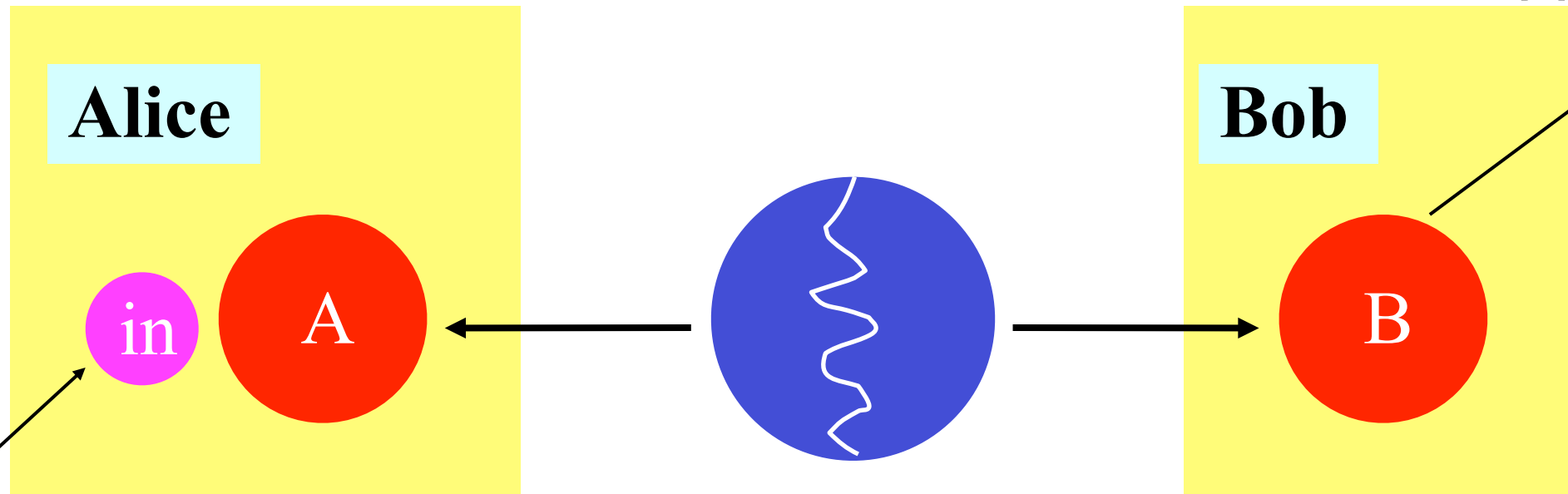
$$\begin{array}{l} \hat{x}_A - \hat{x}_B \rightarrow 0 \\ \hat{p}_A + \hat{p}_B \rightarrow 0 \end{array}$$

量子テレポーテーション

$$(\hat{x}_{\text{in}}, \hat{p}_{\text{in}})$$

位置と運動量の
同時測定

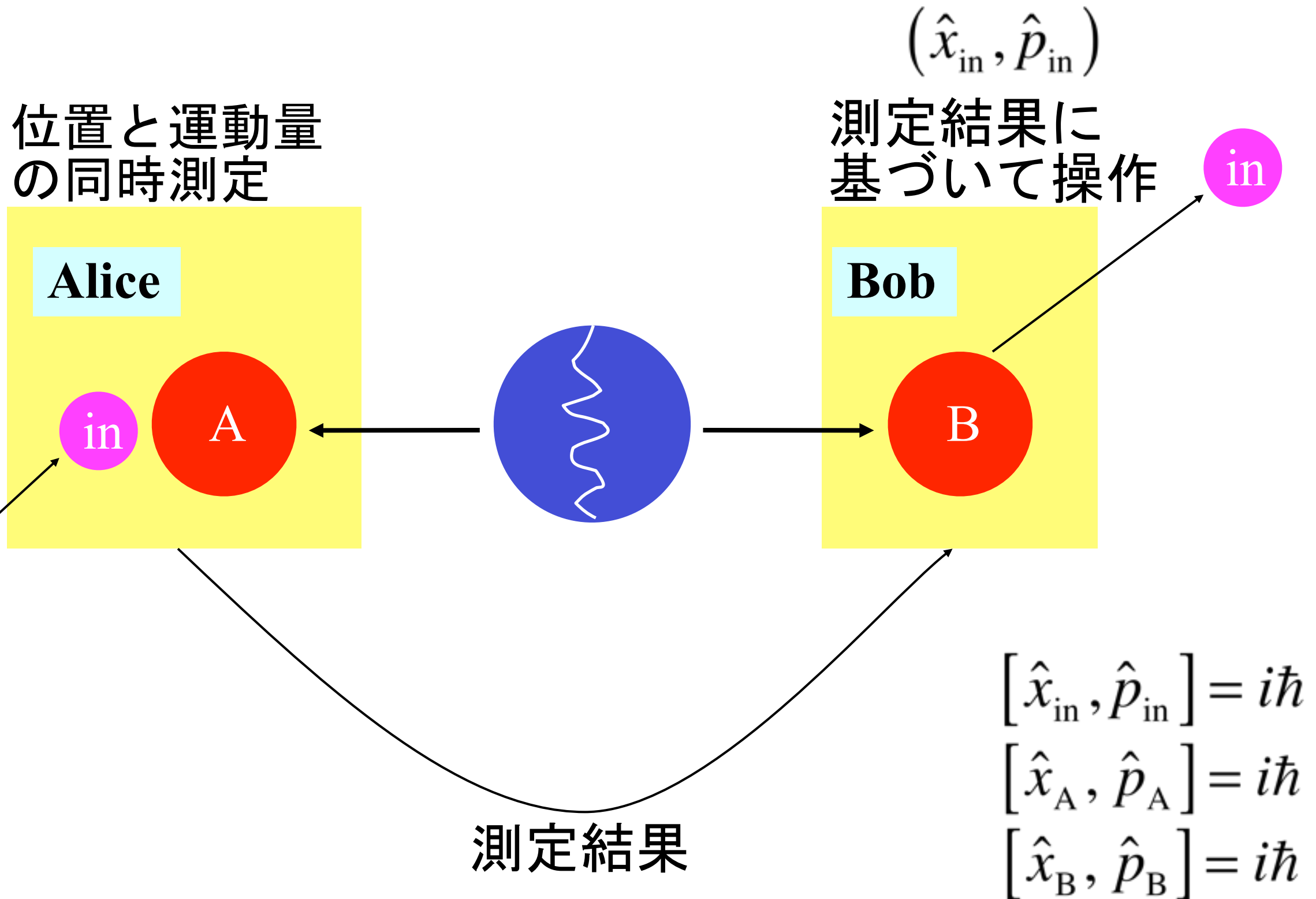
測定結果に
基づいて操作



測定結果

$$\begin{aligned} [\hat{x}_{\text{in}}, \hat{p}_{\text{in}}] &= i\hbar \\ [\hat{x}_A, \hat{p}_A] &= i\hbar \\ [\hat{x}_B, \hat{p}_B] &= i\hbar \end{aligned}$$

量子テレポーテーション



量子テレポーテーション

位置と運動量の同時測定

Alice

in

A

$$(\hat{x}_{\text{in}}, \hat{p}_{\text{in}})$$

測定結果に基づいて操作

Bob

B

in

Victor

$$\hat{x}_A - \hat{x}_B \rightarrow 0$$

$$\hat{p}_A + \hat{p}_B \rightarrow 0$$

測定結果

$$[\hat{x}_{\text{in}}, \hat{p}_{\text{in}}] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_A, \hat{p}_A] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_B, \hat{p}_B] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_A - \hat{x}_B, \hat{p}_A + \hat{p}_B] = 0$$

量子テレポーテーション

$$x_{\text{in}} - x_A = X$$

$$p_{\text{in}} + p_A = P$$

$$(\hat{x}_{\text{in}}, \hat{p}_{\text{in}})$$

測定結果に基づいて操作

in

Alice

Bob

in

A

B

Victor

$$\hat{x}_A - \hat{x}_B \rightarrow 0$$

$$\hat{p}_A + \hat{p}_B \rightarrow 0$$

測定結果

$$[\hat{x}_{\text{in}}, \hat{p}_{\text{in}}] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_A, \hat{p}_A] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_B, \hat{p}_B] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_A - \hat{x}_B, \hat{p}_A + \hat{p}_B] = 0$$

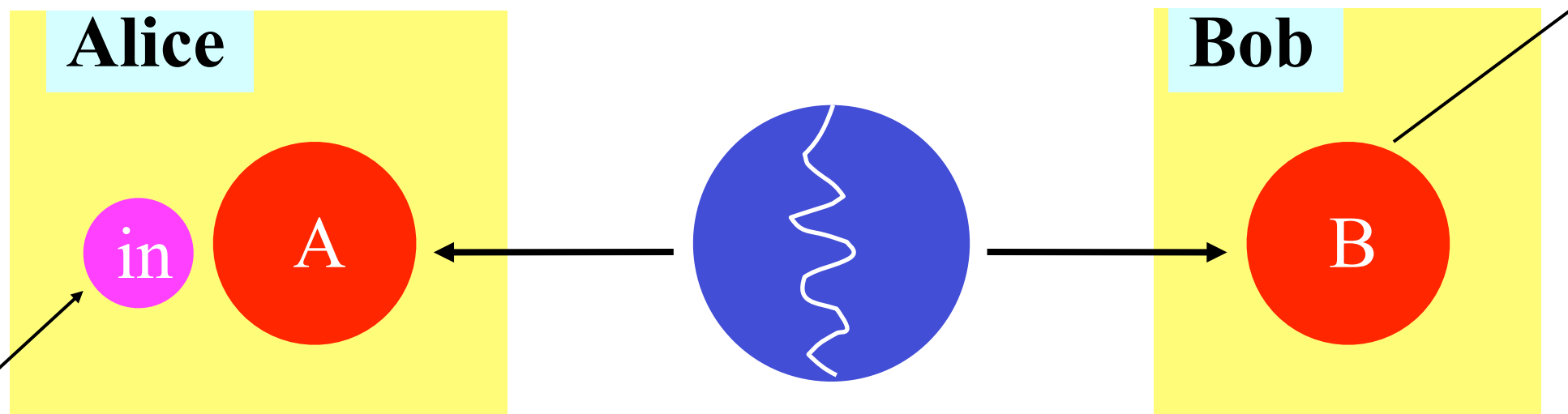
量子テレポーテーション

$$x_{\text{in}} - x_A = X$$

$$x_B = x_{\text{in}} - X - (x_A - x_B)$$

$$p_{\text{in}} + p_A = P$$

$$p_B = p_{\text{in}} - P + (p_A + p_B)$$



Victor

$$\hat{x}_A - \hat{x}_B \rightarrow 0$$

$$\hat{p}_A + \hat{p}_B \rightarrow 0$$

測定結果

$$[\hat{x}_{\text{in}}, \hat{p}_{\text{in}}] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_A, \hat{p}_A] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_B, \hat{p}_B] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_A - \hat{x}_B, \hat{p}_A + \hat{p}_B] = 0$$

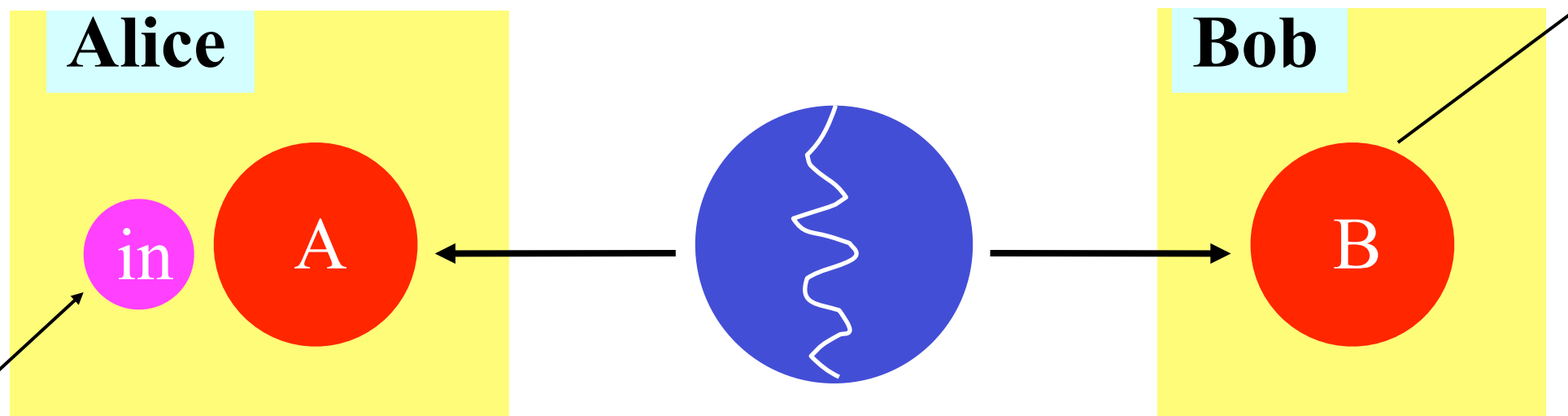
量子テレポーテーション

$$x_{\text{in}} - x_A = X$$

$$x_B = x_{\text{in}} - X$$

$$p_{\text{in}} + p_A = P$$

$$p_B = p_{\text{in}} - P$$



Victor

$$\hat{x}_A - \hat{x}_B \rightarrow 0$$

$$\hat{p}_A + \hat{p}_B \rightarrow 0$$

測定結果

$$[\hat{x}_{\text{in}}, \hat{p}_{\text{in}}] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_A, \hat{p}_A] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_B, \hat{p}_B] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_A - \hat{x}_B, \hat{p}_A + \hat{p}_B] = 0$$

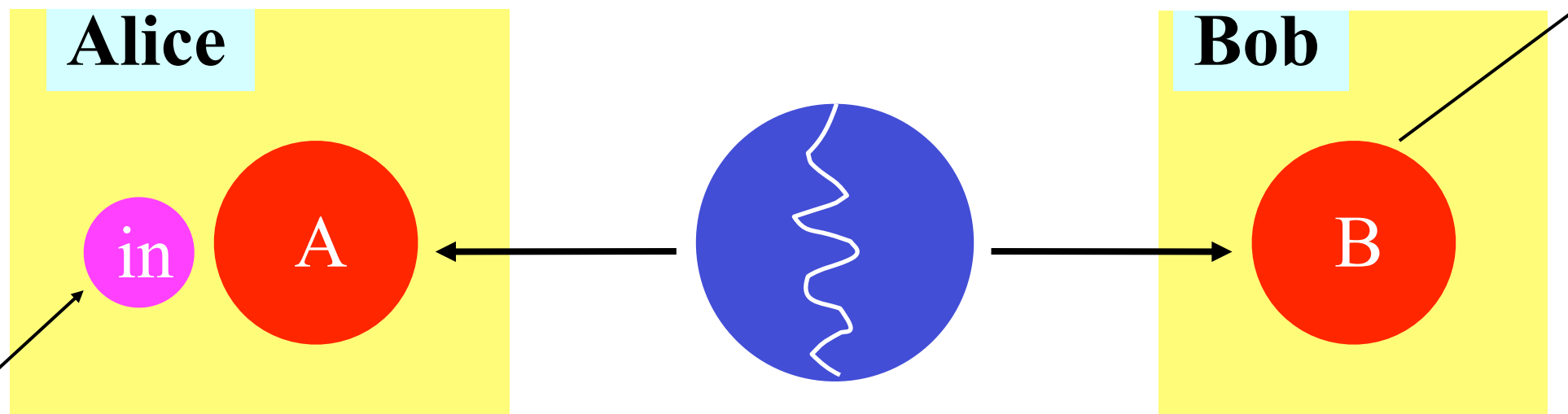
量子テレポーテーション

$$x_{\text{in}} - x_A = X$$

$$x_B = x_{\text{in}}$$

$$p_{\text{in}} + p_A = P$$

$$p_B = p_{\text{in}}$$



Victor

$$\hat{x}_A - \hat{x}_B \rightarrow 0$$

$$\hat{p}_A + \hat{p}_B \rightarrow 0$$

測定結果

$$[\hat{x}_{\text{in}}, \hat{p}_{\text{in}}] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_A, \hat{p}_A] = i\hbar$$

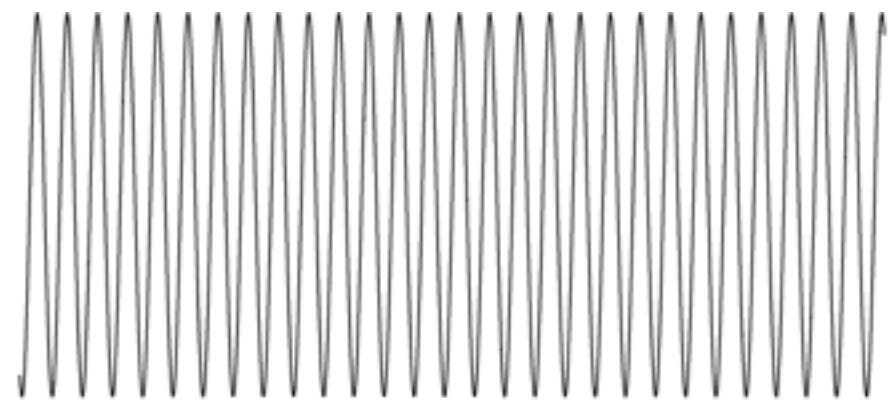
$$[\hat{x}_B, \hat{p}_B] = i\hbar$$

$$[\hat{x}_A - \hat{x}_B, \hat{p}_A + \hat{p}_B] = 0$$

量子光学

AMとFM

NHK
(AM)
594kHz

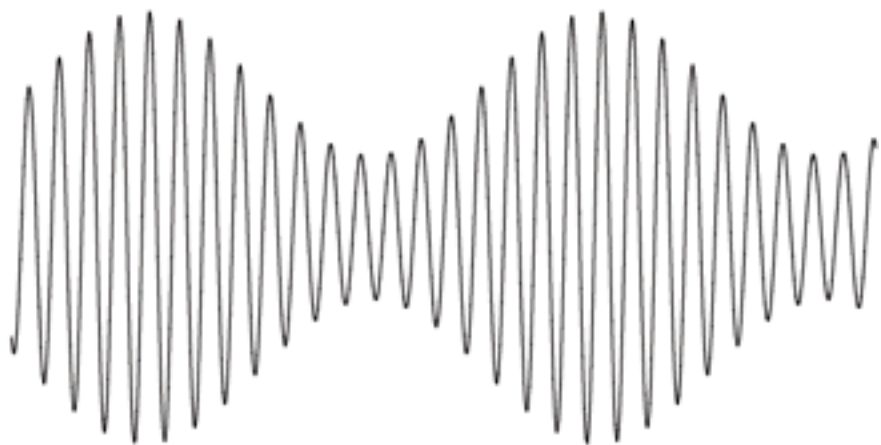


キャリア波

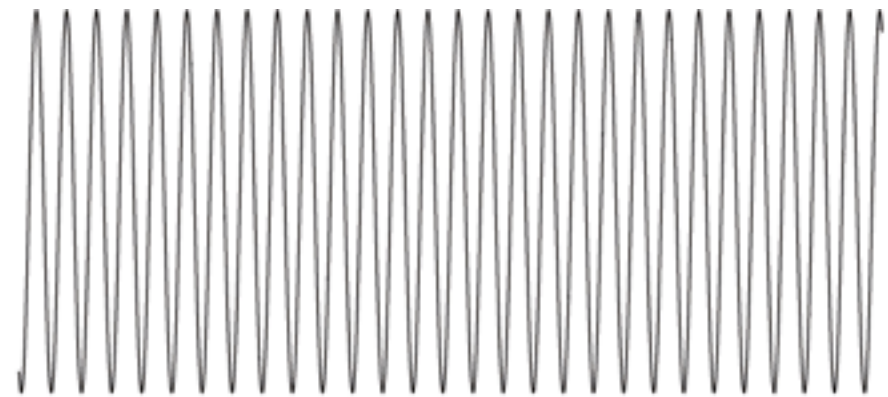


信号

AM変調



J-WAVE
(FM)
81.3MHz

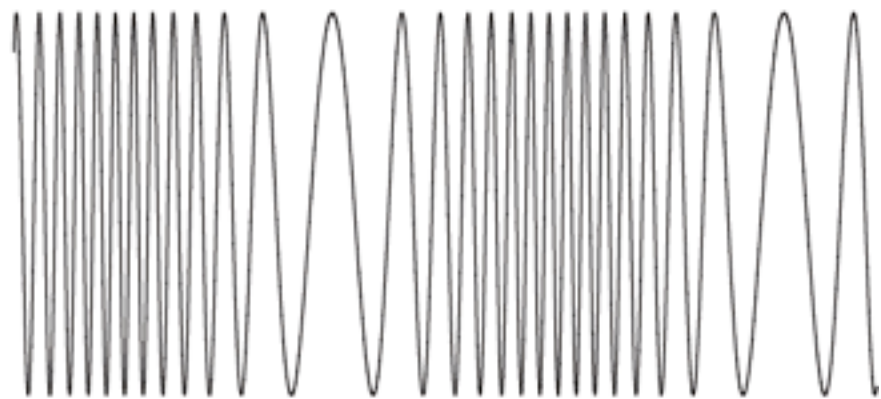


キャリア波



信号

FM変調

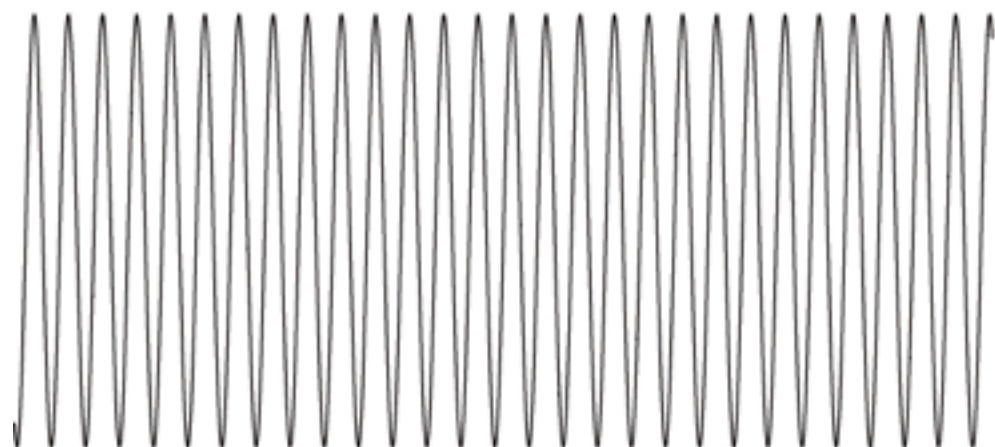




ローカルオシレータ (LO)

キャリア波と同じ周波数

L0の位相を変えることで
AMもFMも検波できる

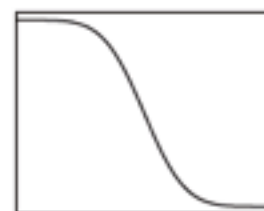


ミキサー

乗算器



受信したキャリア波



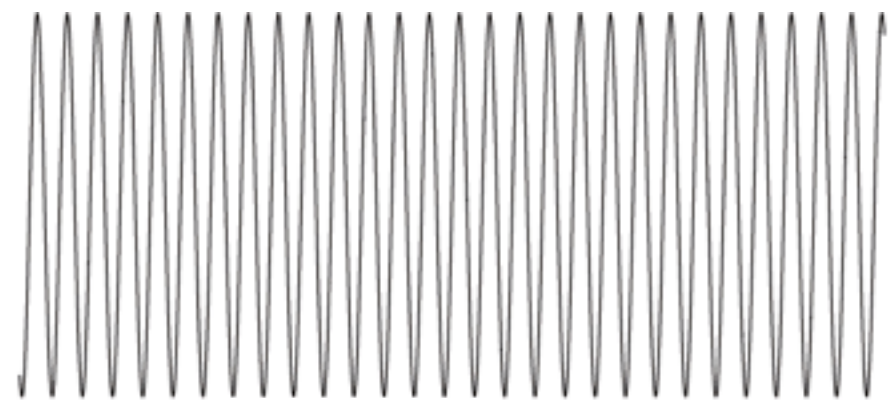
ローパスフィルター



検波された信号

AMとFM

NHK
(AM)
594kHz

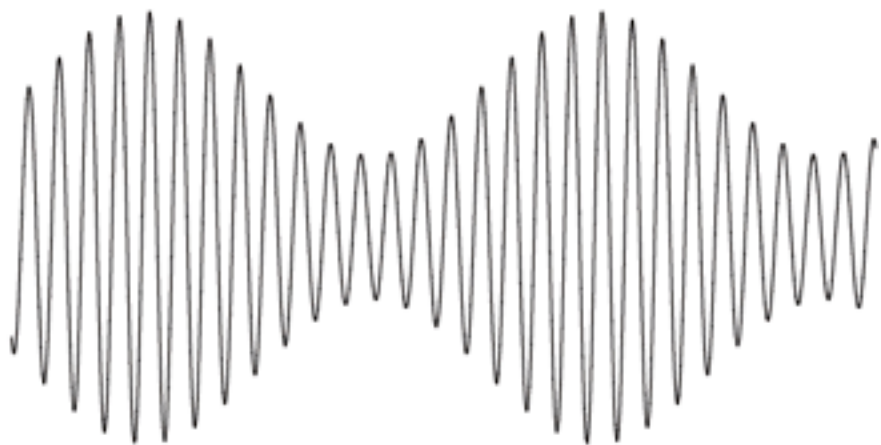


キャリア波

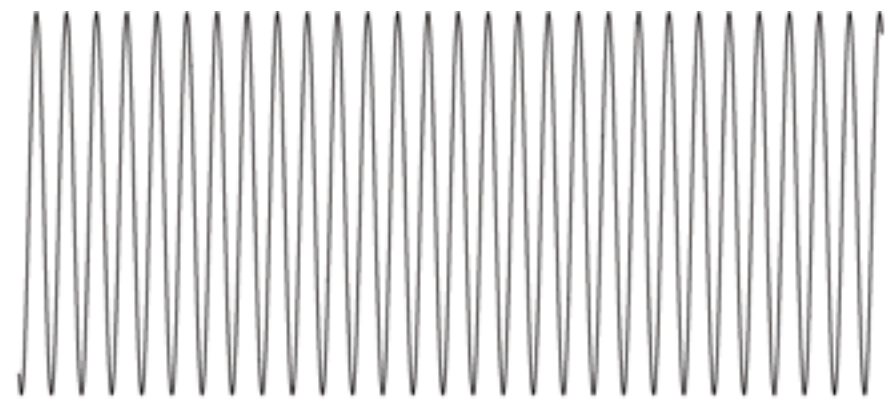


信号

AM変調



J-WAVE
(FM)
81.3MHz

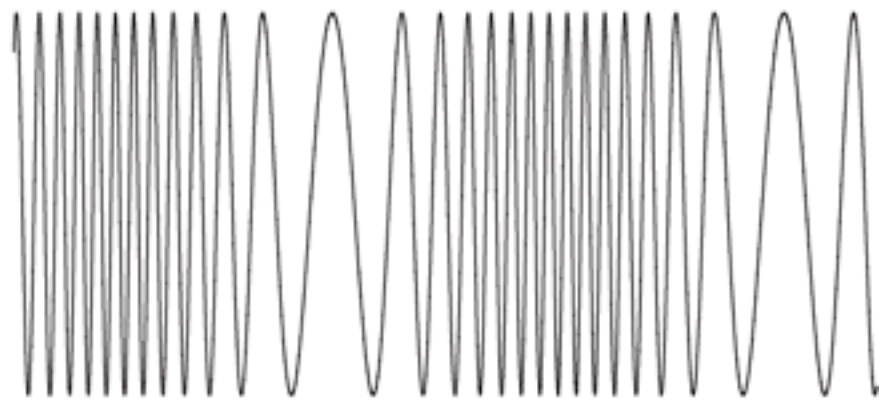


キャリア波



信号

FM変調



NHK
(AM)
594kHz

AM変調

キャリア波

光子について考える必要はない！

$$\text{光子のエネルギー} = h\nu$$

h : Planck定数 ($6.6 \times 10^{-34} \text{Js}$)

ν : キャリア周波数 (Hz)

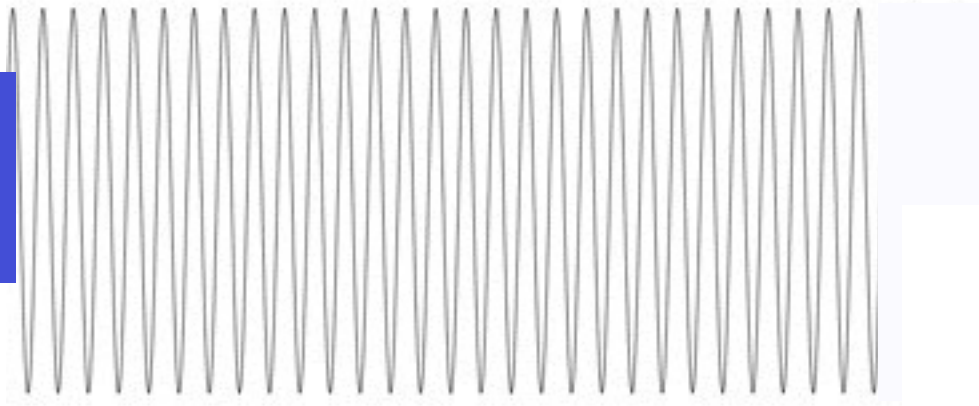
調

J-WAVE
(FM)
81.3MHz

キャリア波

信号

可視光の周波数
100THz

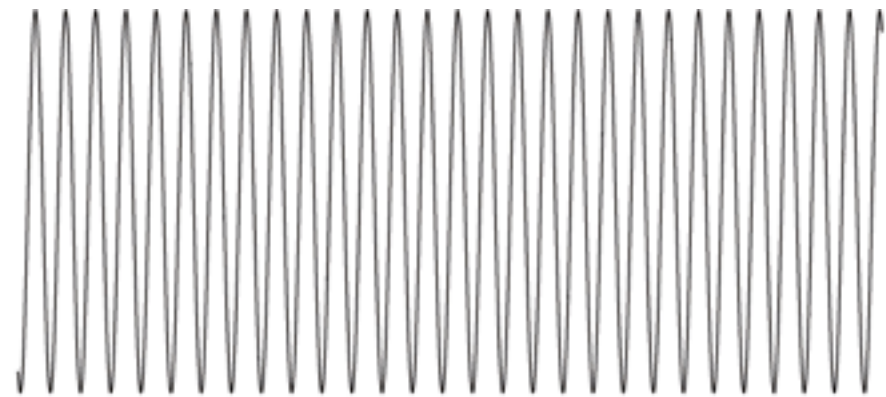
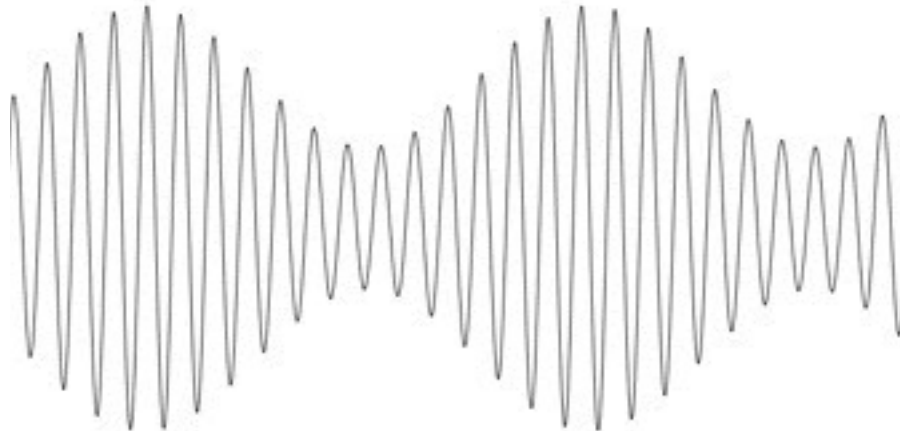


キャリア波



信号

AM変調

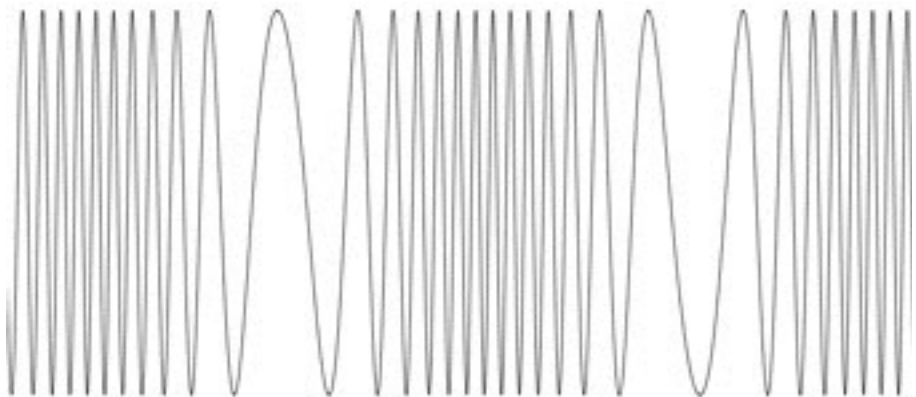


キャリア波

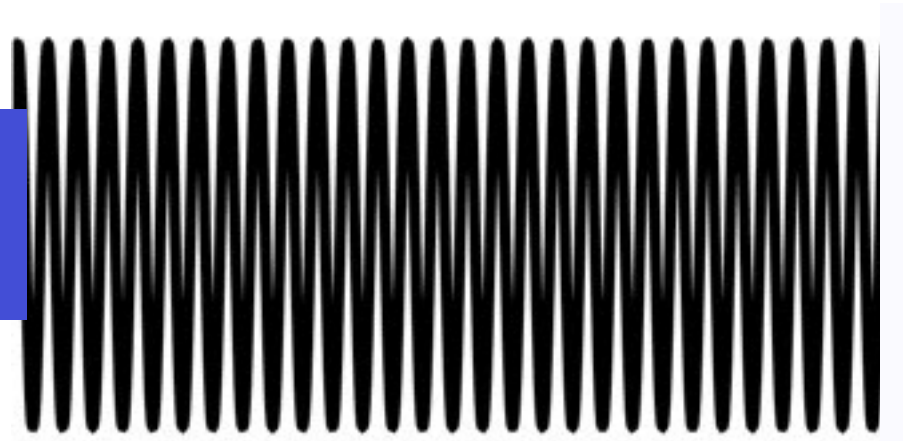


信号

FM変調



可視光の周波数
100THz



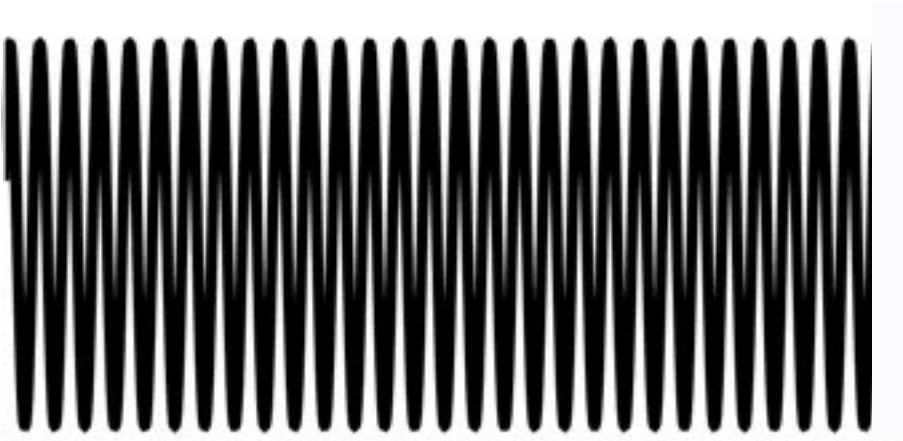
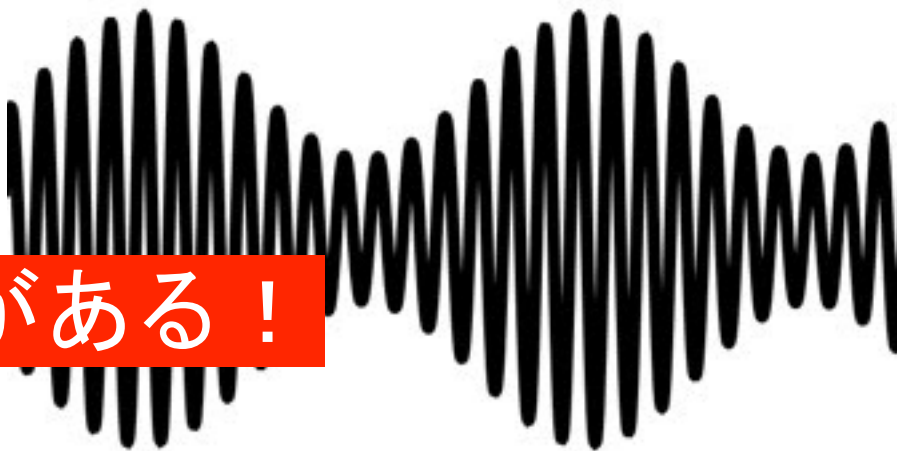
キャリア波

光子について考える必要がある！



信号

AM変調

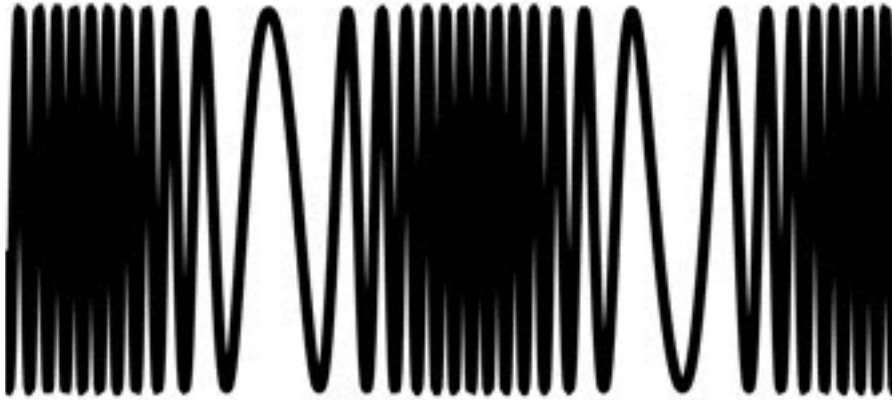


キャリア波



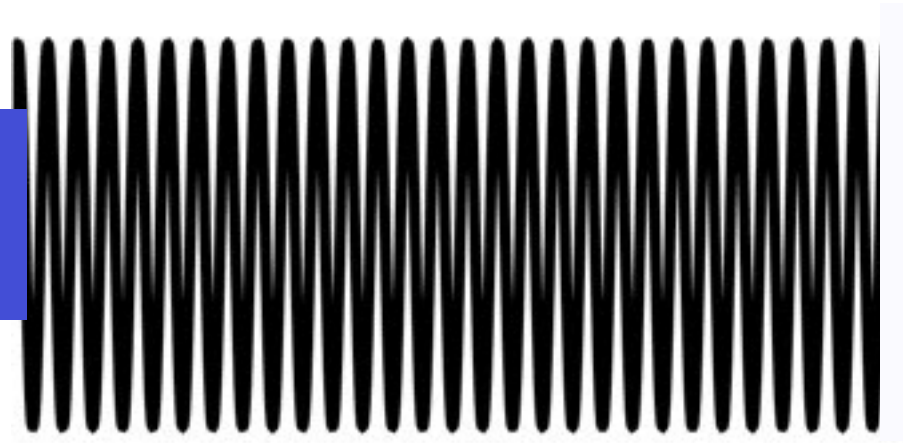
信号

FM変調



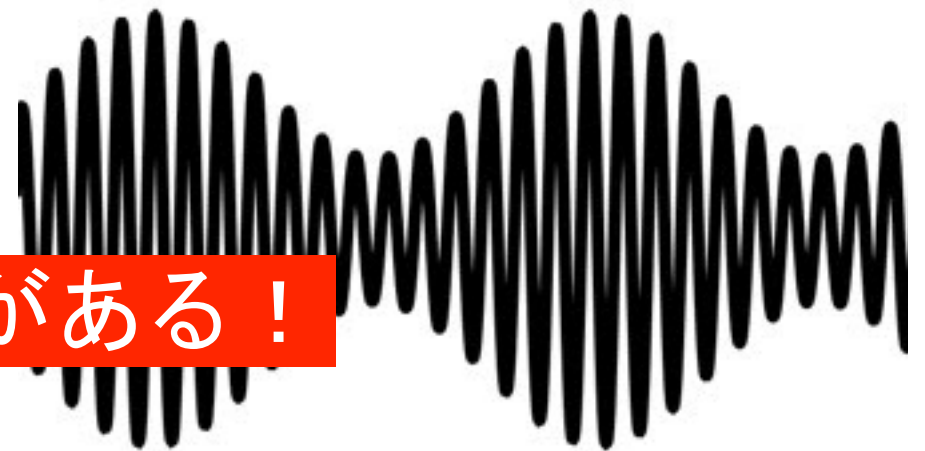
AMとFM

可視光の周波数
100THz



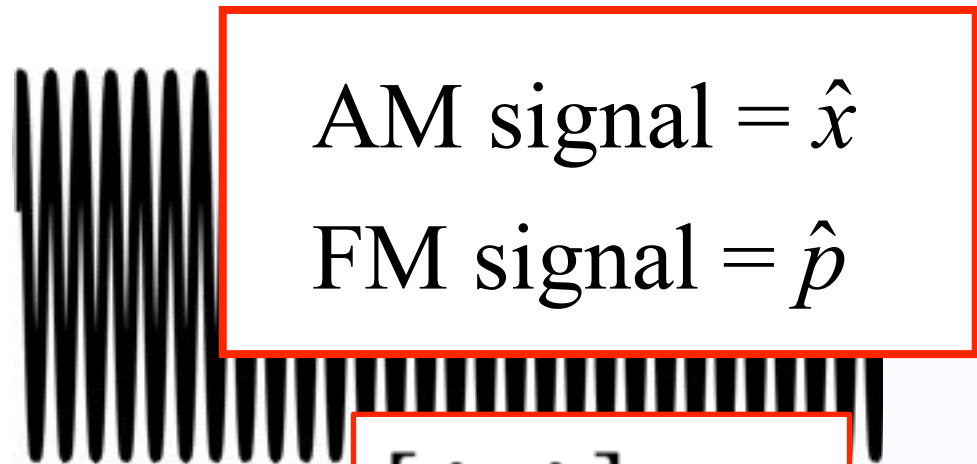
キャリア波

AM変調



光子について考える必要がある！

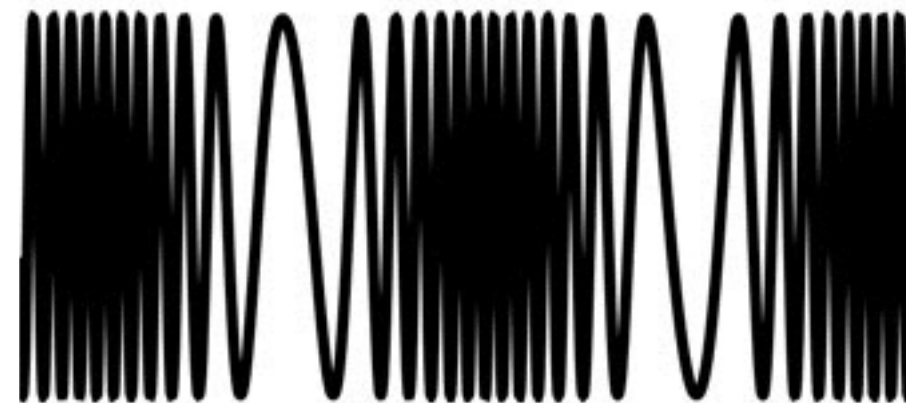
AM信号とFM信号が共役物理量になる！



$$\text{AM signal} = \hat{x}$$

$$\text{FM signal} = \hat{p}$$

FM変調



光子なし $|0\rangle$
光子あり $|1\rangle$

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$$

信号

量子光学

消滅演算子 $\hat{a}$

$$[\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1 \quad \left(\hbar = \frac{1}{2} \right)$$

Photon-number units

光電場の複素振幅

$$\hat{a} = \hat{x} + i\hat{p}$$

$\hat{x}$: cosine component

$\hat{p}$: sine component

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$$

$\hat{x}$: 位置
 $\hat{p}$: 運動量

$$[\hat{x}, \hat{p}] = \frac{i}{2}$$

共役物理量

量子光学

消滅演算子 $\hat{a}$

$$[\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1 \quad \left(\hbar = \frac{1}{2} \right)$$

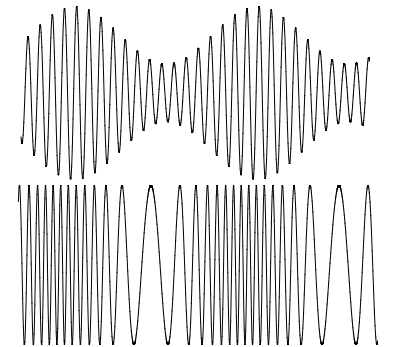
光電場の複素振幅

$$\hat{a} = \hat{x} + i\hat{p}$$

Photon-number units

$\hat{x}$: AM signal

$\hat{p}$: FM signal



$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$$

$\hat{x}$: 位置

$\hat{p}$: 運動量

$$[\hat{x}, \hat{p}] = \frac{i}{2}$$

共役物理量

量子光学

= 光の周波数でのラジオの話

消滅演算子 $\hat{a}$

$$[\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1 \quad \left(\hbar = \frac{1}{2} \right)$$

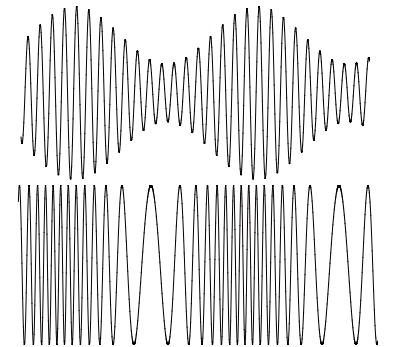
光電場の複素振幅

$$\hat{a} = \hat{x} + i\hat{p}$$

光子なし $|0\rangle$
光子あり $|1\rangle$

$\hat{x}$: AM signal

$\hat{p}$: FM signal



$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$$

$\hat{x}$: 位置

$\hat{p}$: 運動量

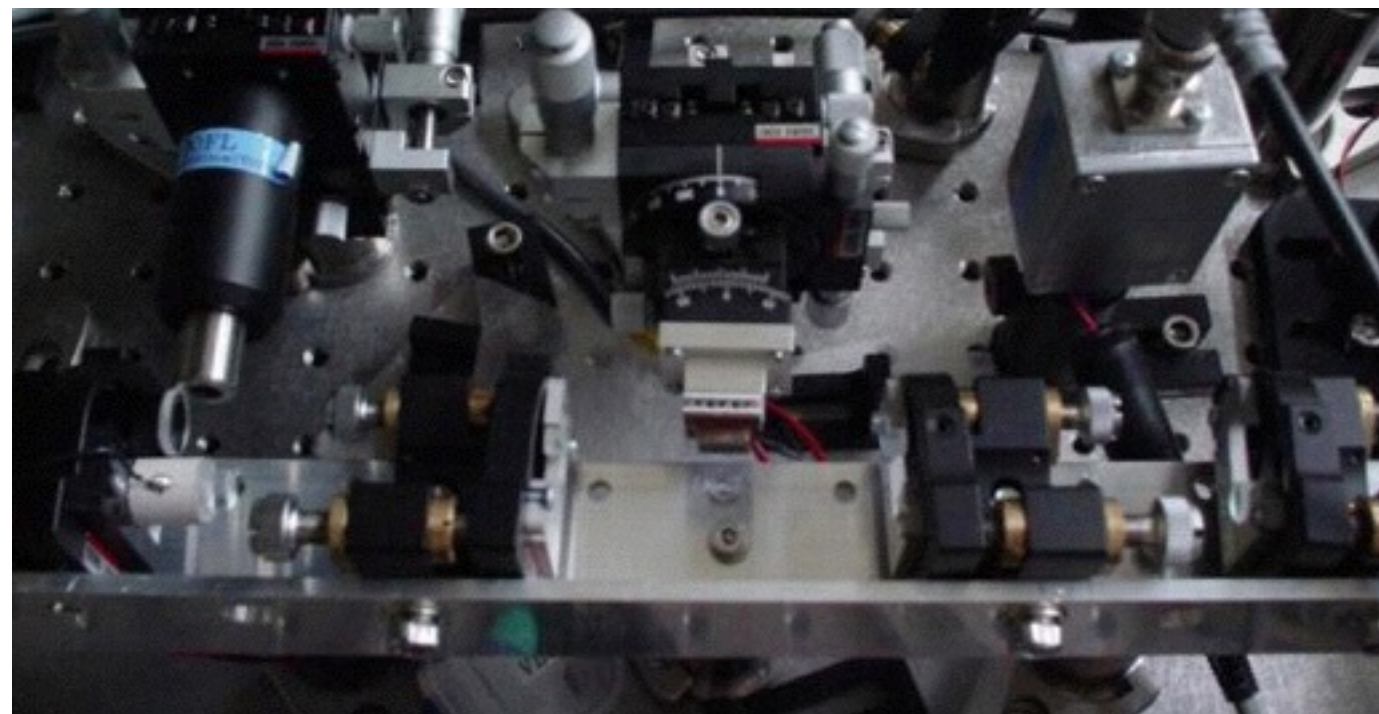
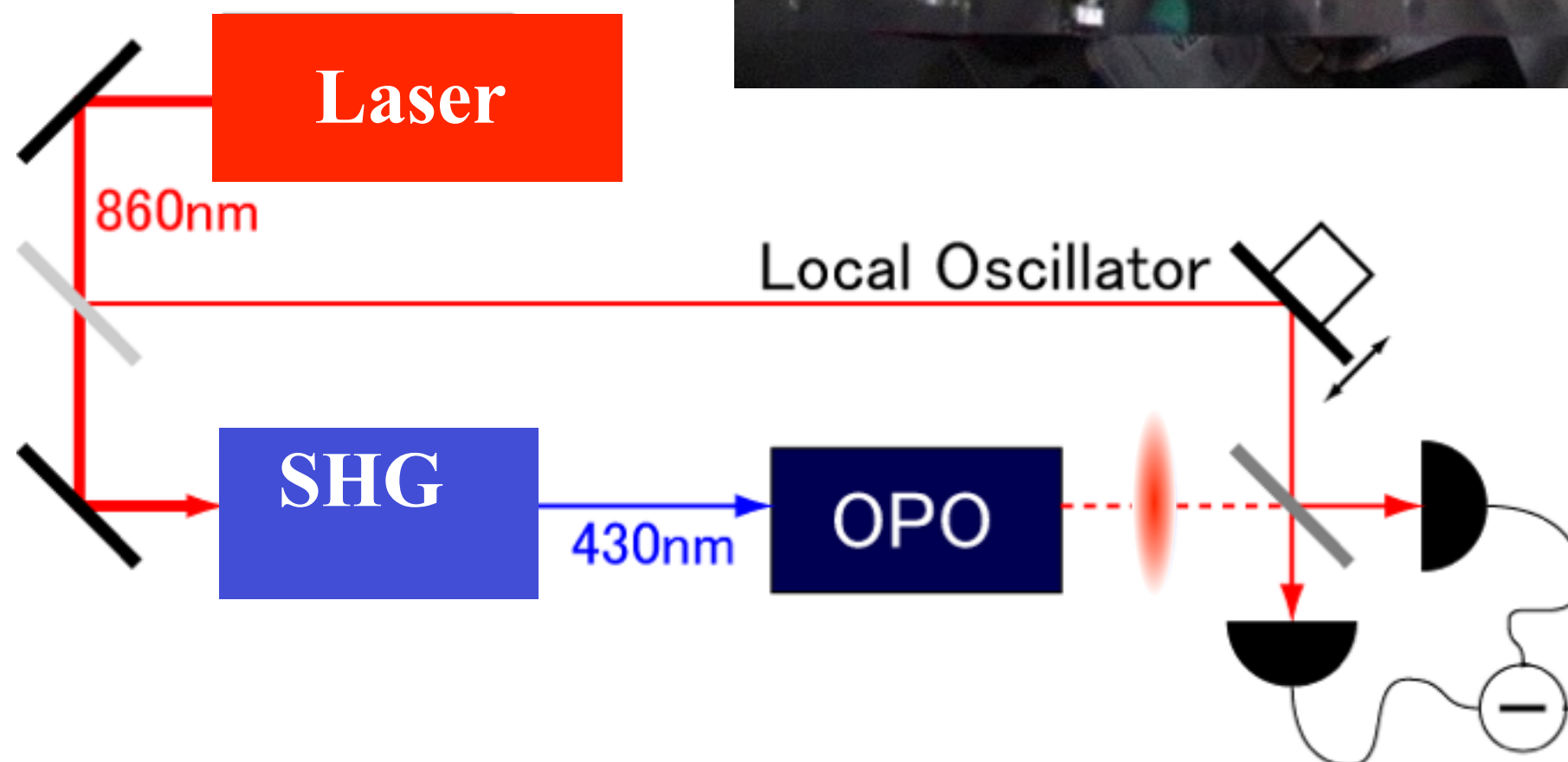
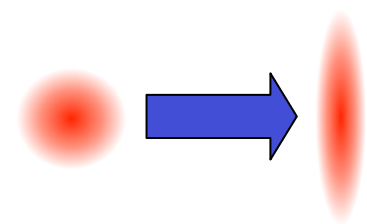
$$[\hat{x}, \hat{p}] = \frac{i}{2}$$

共役物理量

量子光学で量子もつれをつくる

光パラメトリック発振器 (OPO)

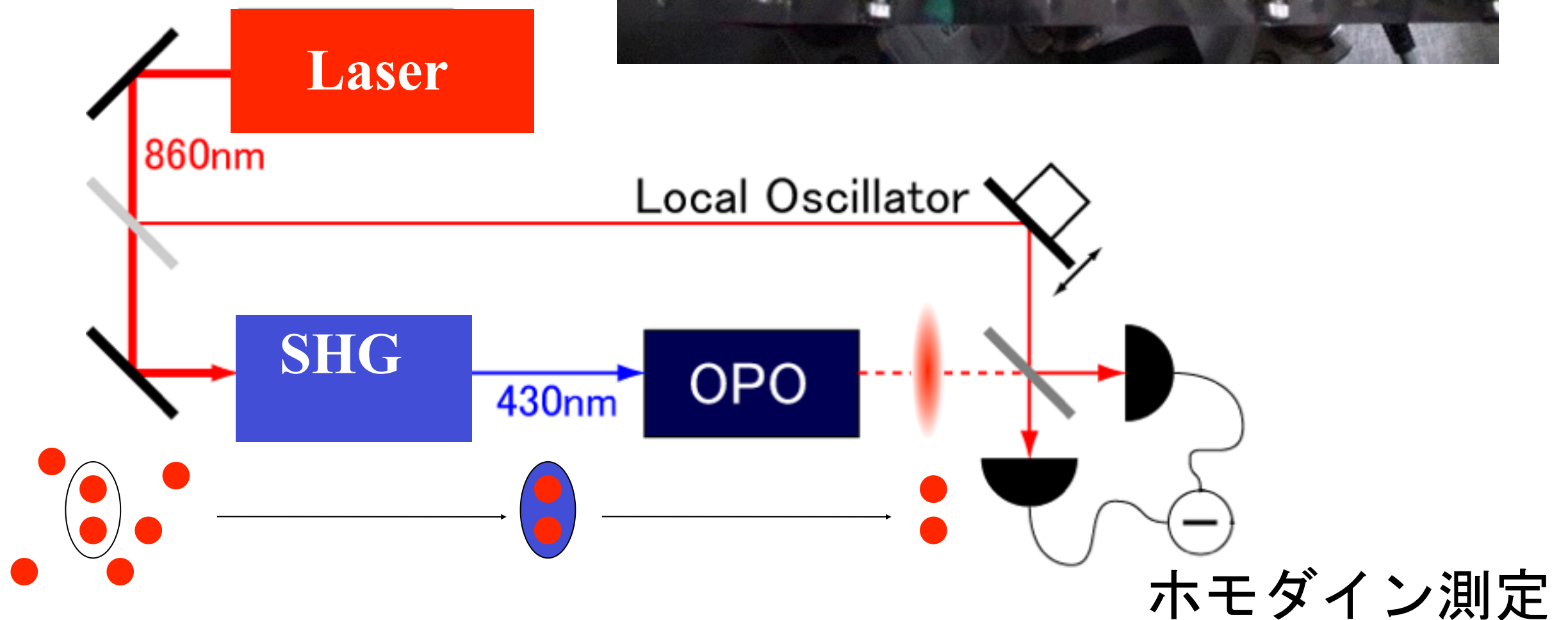
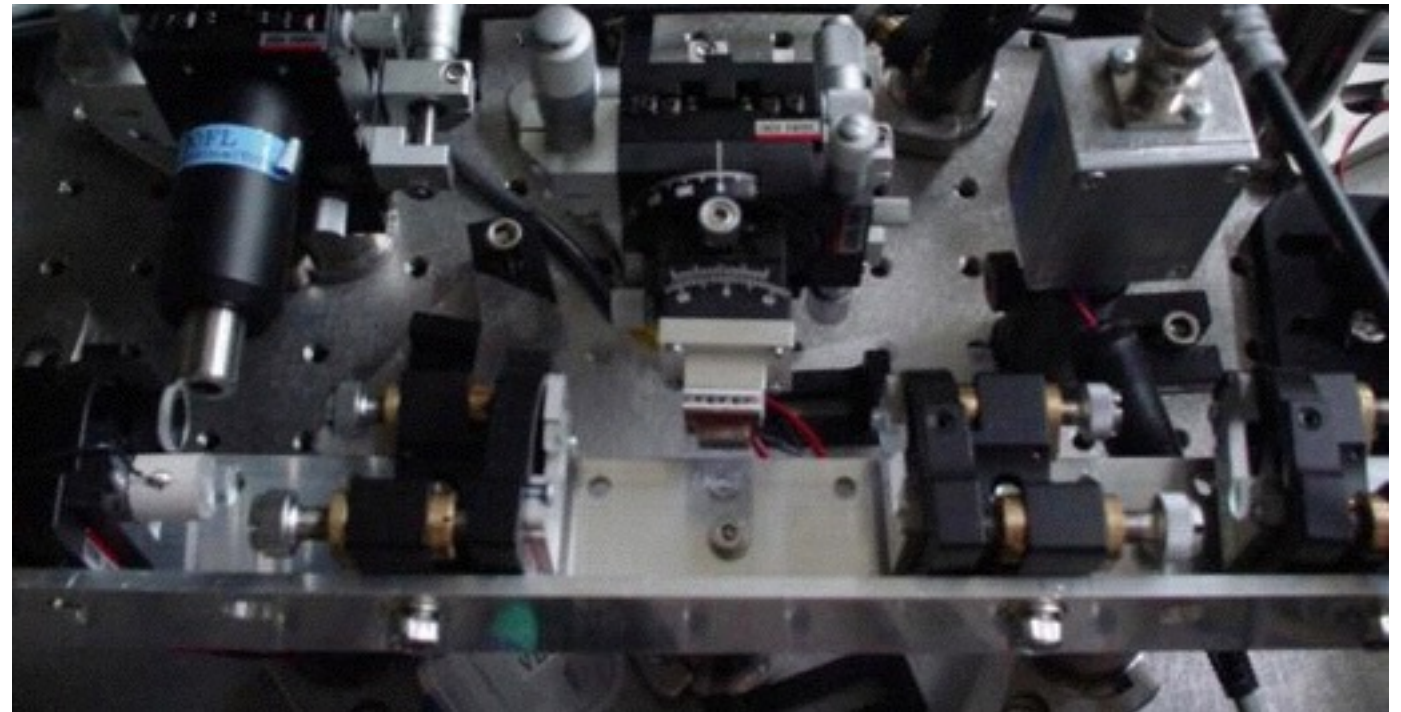
スクイーズド光の発生



ホモダイン測定

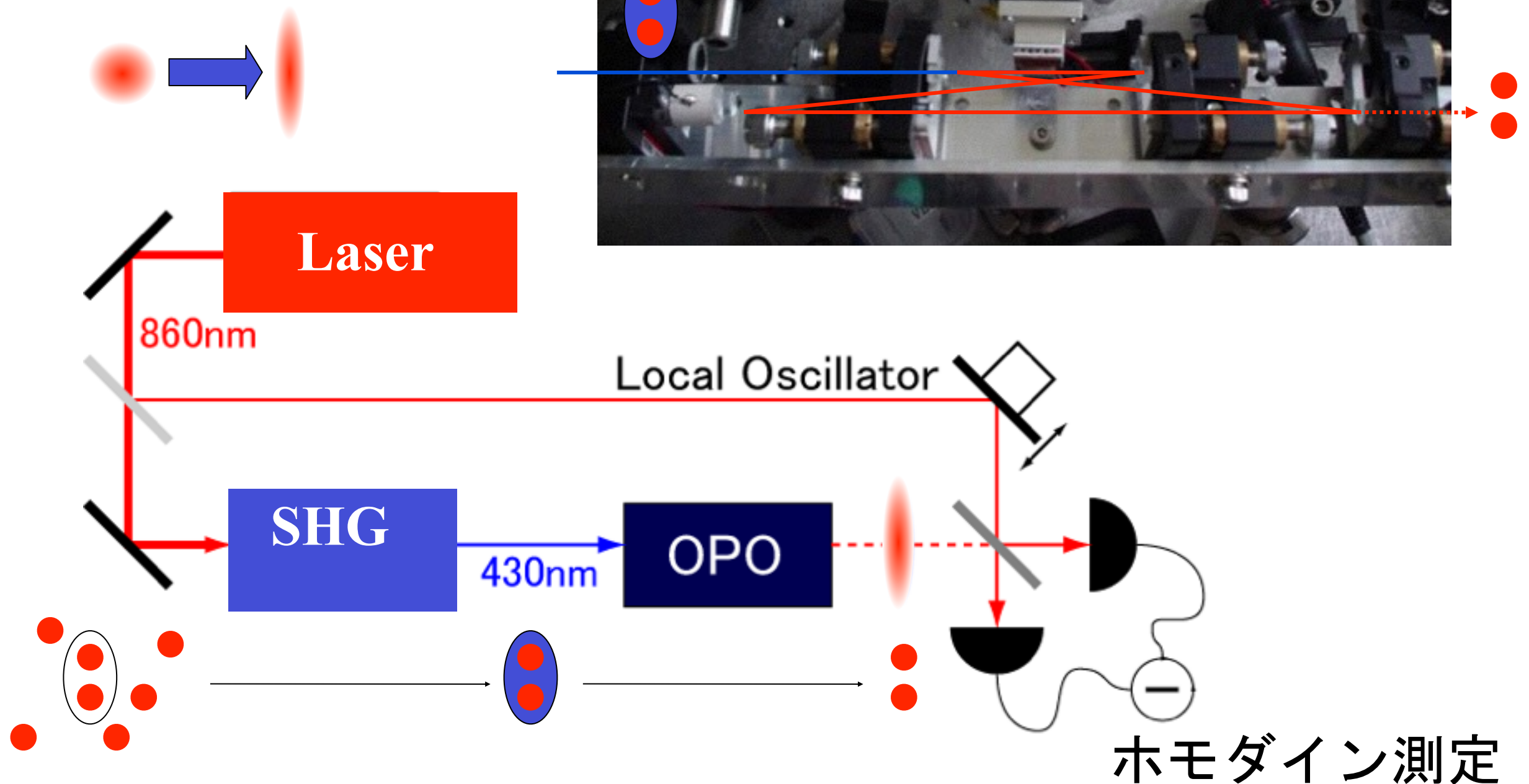
光パラメトリック発振器 (OPO)

スクイーズド光の発生



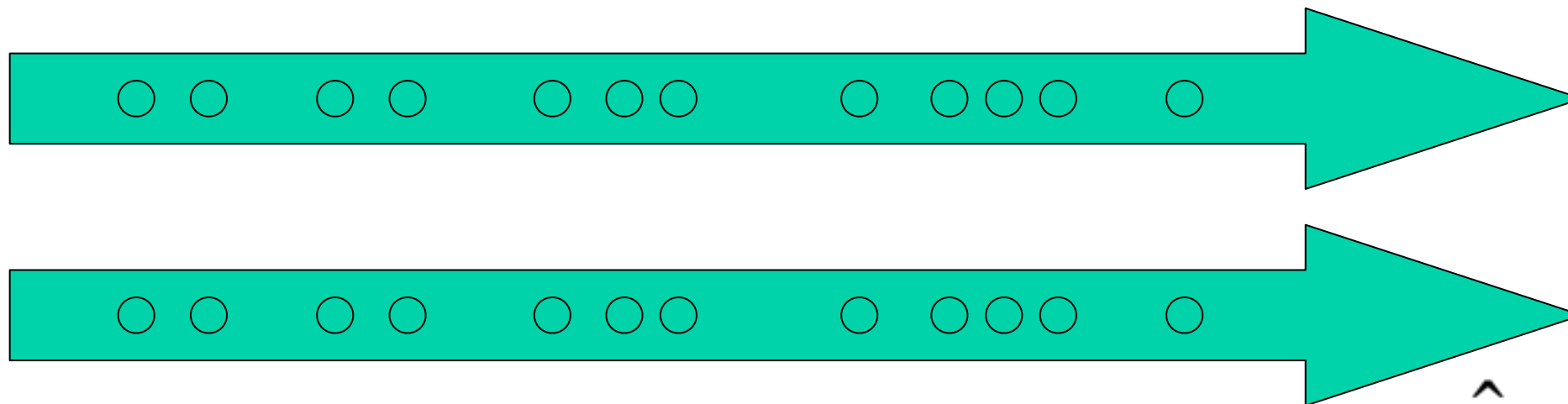
光パラメトリック発振器 (OPO)

スクイーズド光の発生



ホモダイン測定

量子もつれ状態にある光ビーム



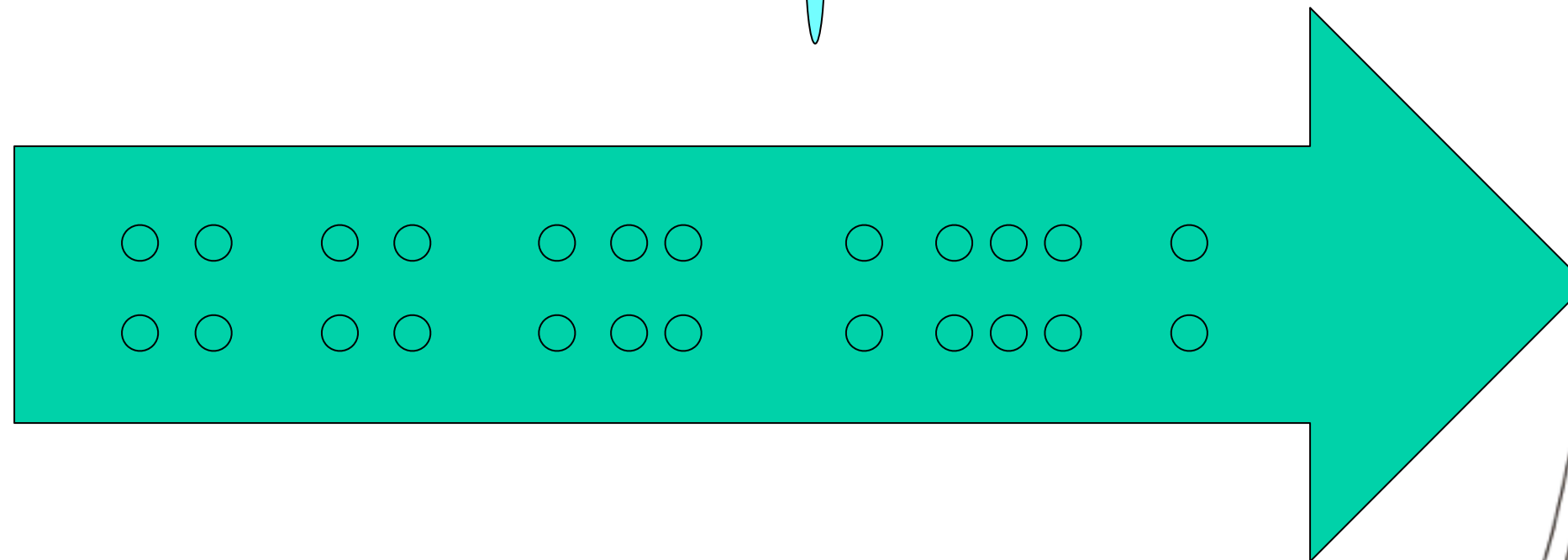
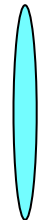
$$\int_{-\infty}^{\infty} dx |x\rangle_A |x\rangle_B$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} dp |p\rangle_A |-p\rangle_B$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} |n\rangle_A |n\rangle_B$$

$$\hat{x}_A - \hat{x}_B \rightarrow 0$$

$$\hat{p}_A + \hat{p}_B \rightarrow 0$$

スクイーズド光

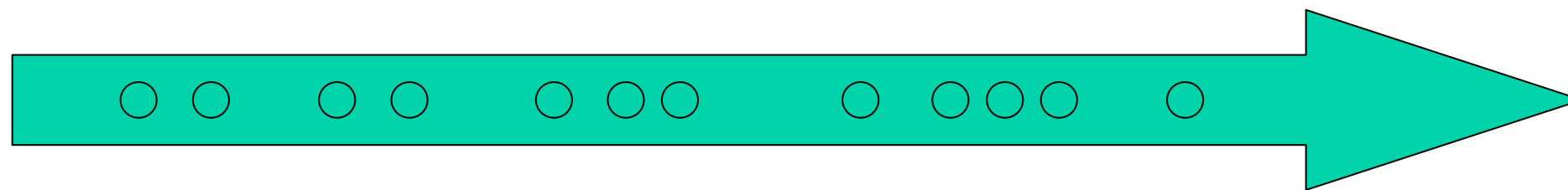


波動像



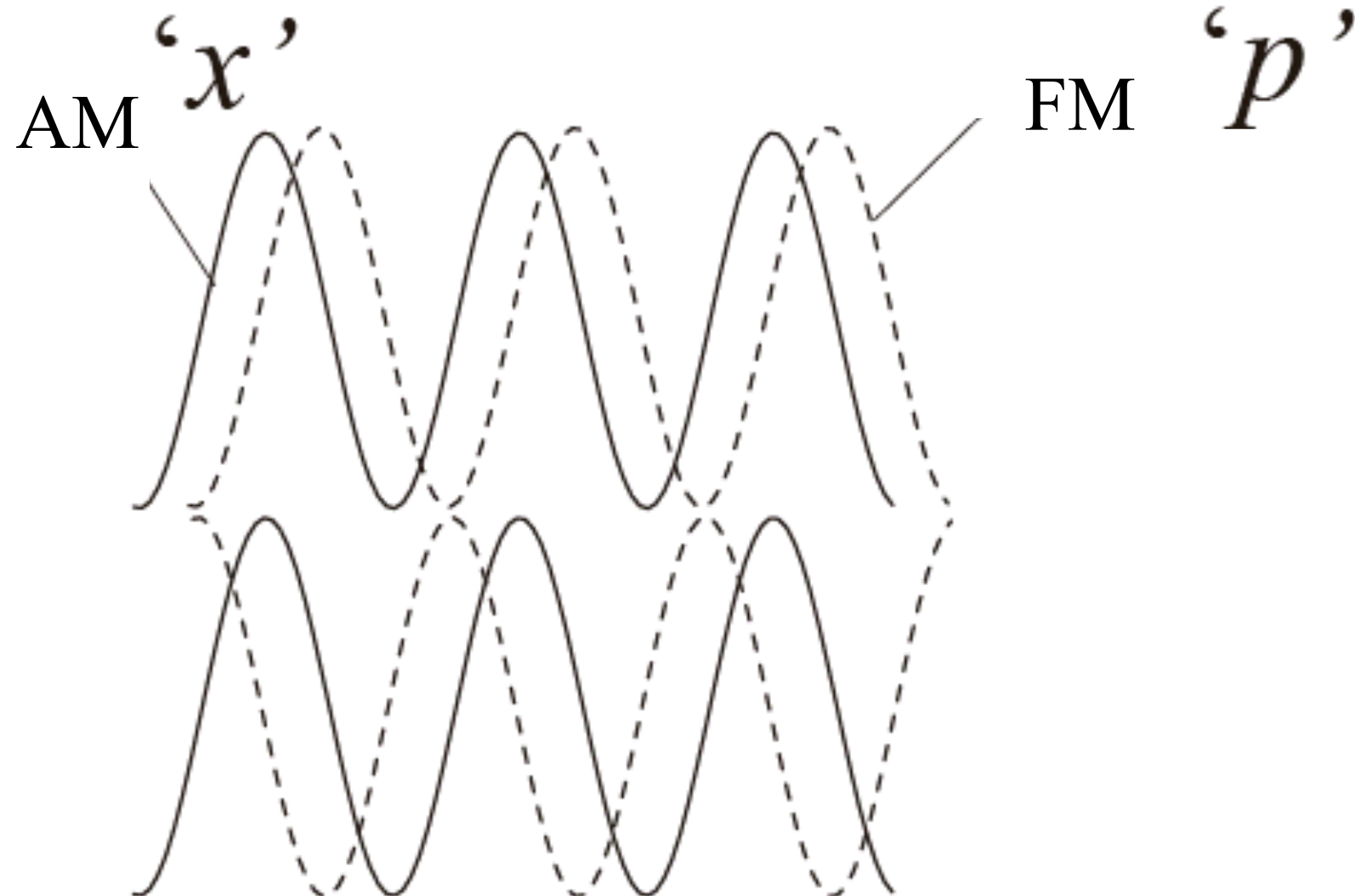
量子もつれ状態にある光ビーム

AM signal = $\hat{x}$
FM signal = $\hat{p}$



$$\int_{-\infty}^{\infty} dx |x\rangle_A |x\rangle_B$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} dp |p\rangle_A |-p\rangle_B$$

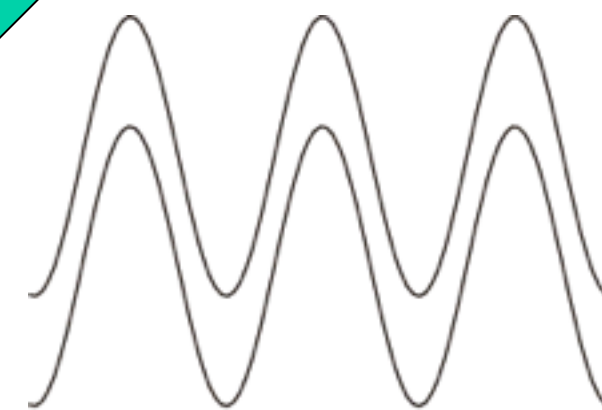


$$= \sum_{n=0}^{\infty} |n\rangle_A |n\rangle_B$$

$$\hat{x}_A - \hat{x}_B \rightarrow 0$$

$$\hat{p}_A + \hat{p}_B \rightarrow 0$$

波動像



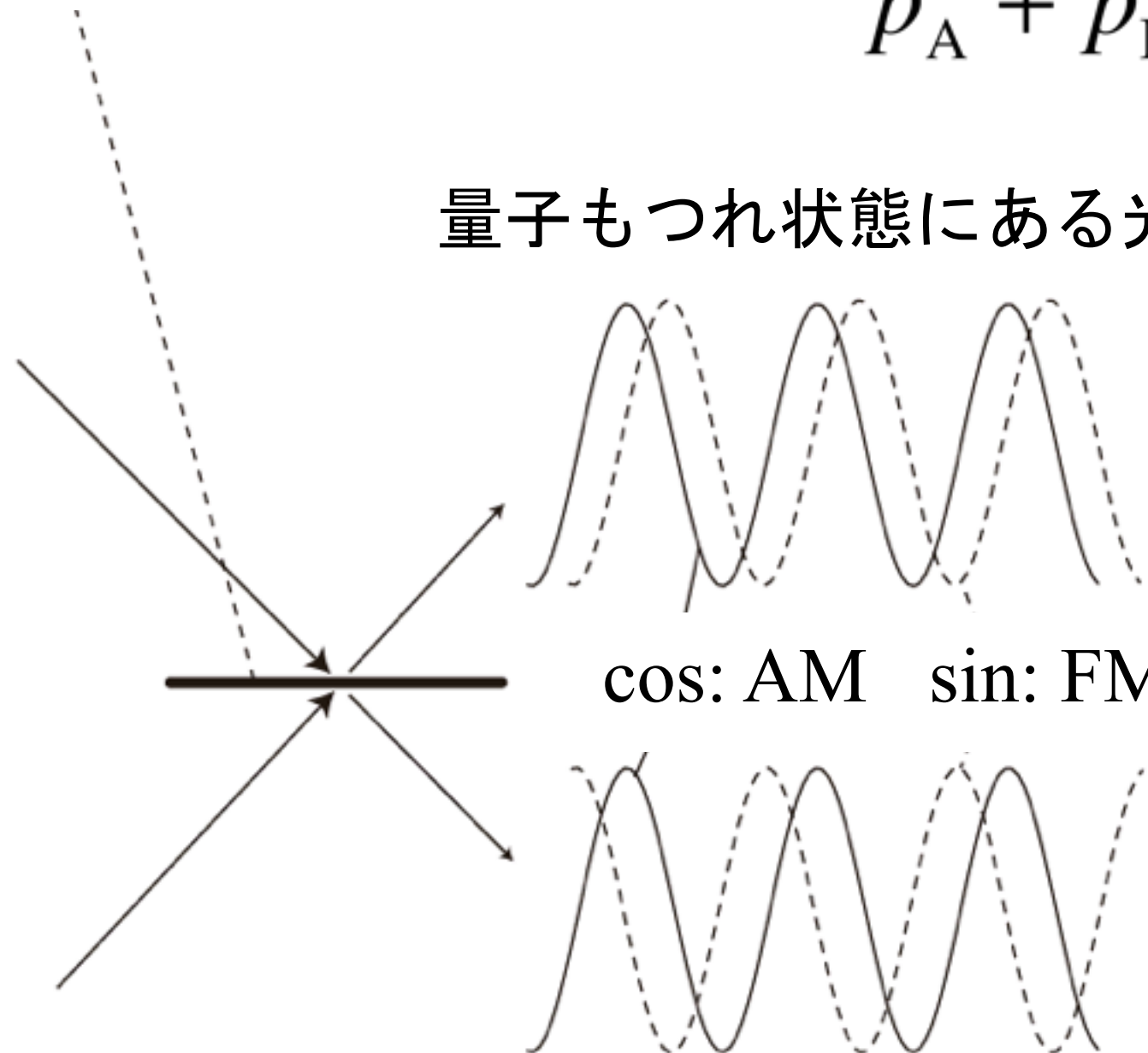
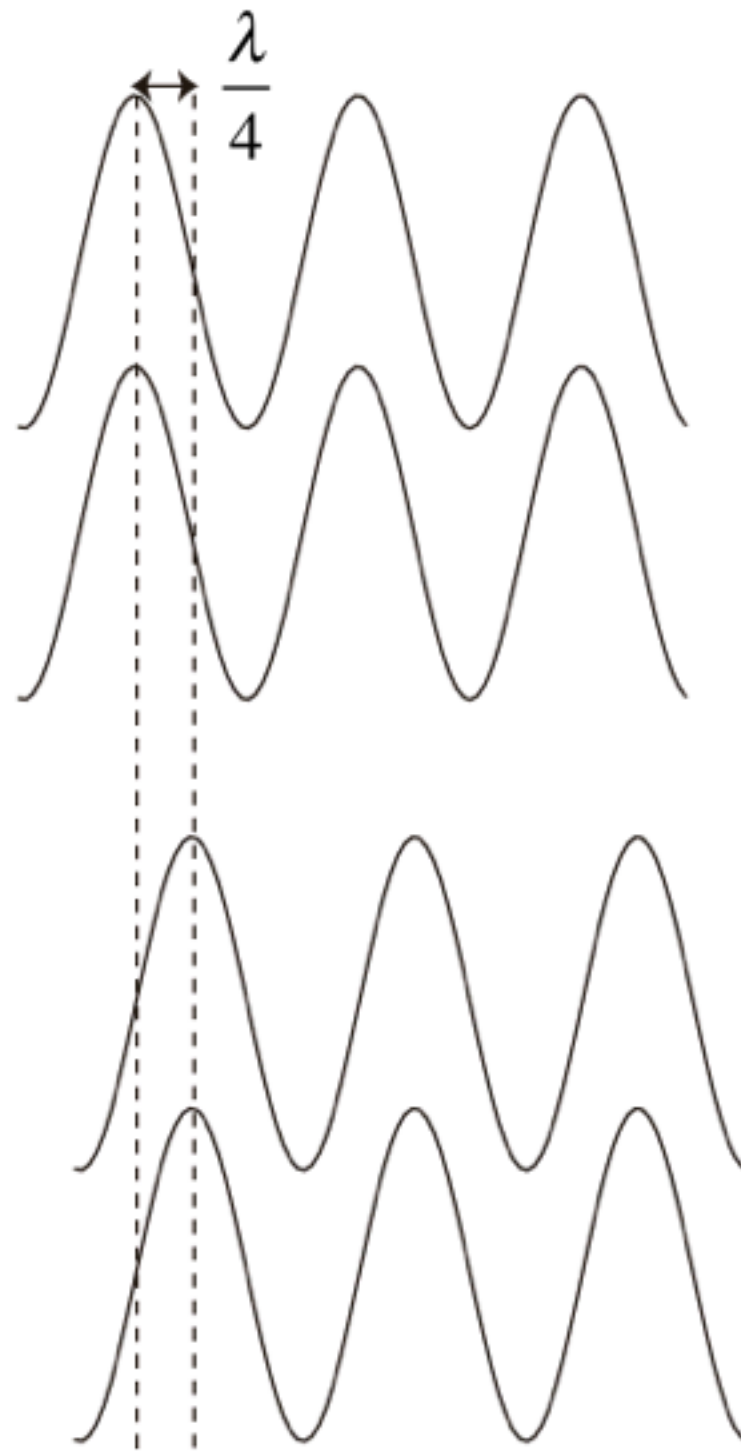
$$\hat{x}_A - \hat{x}_B \rightarrow 0$$

$$\hat{p}_A + \hat{p}_B \rightarrow 0$$

スクイーズド光

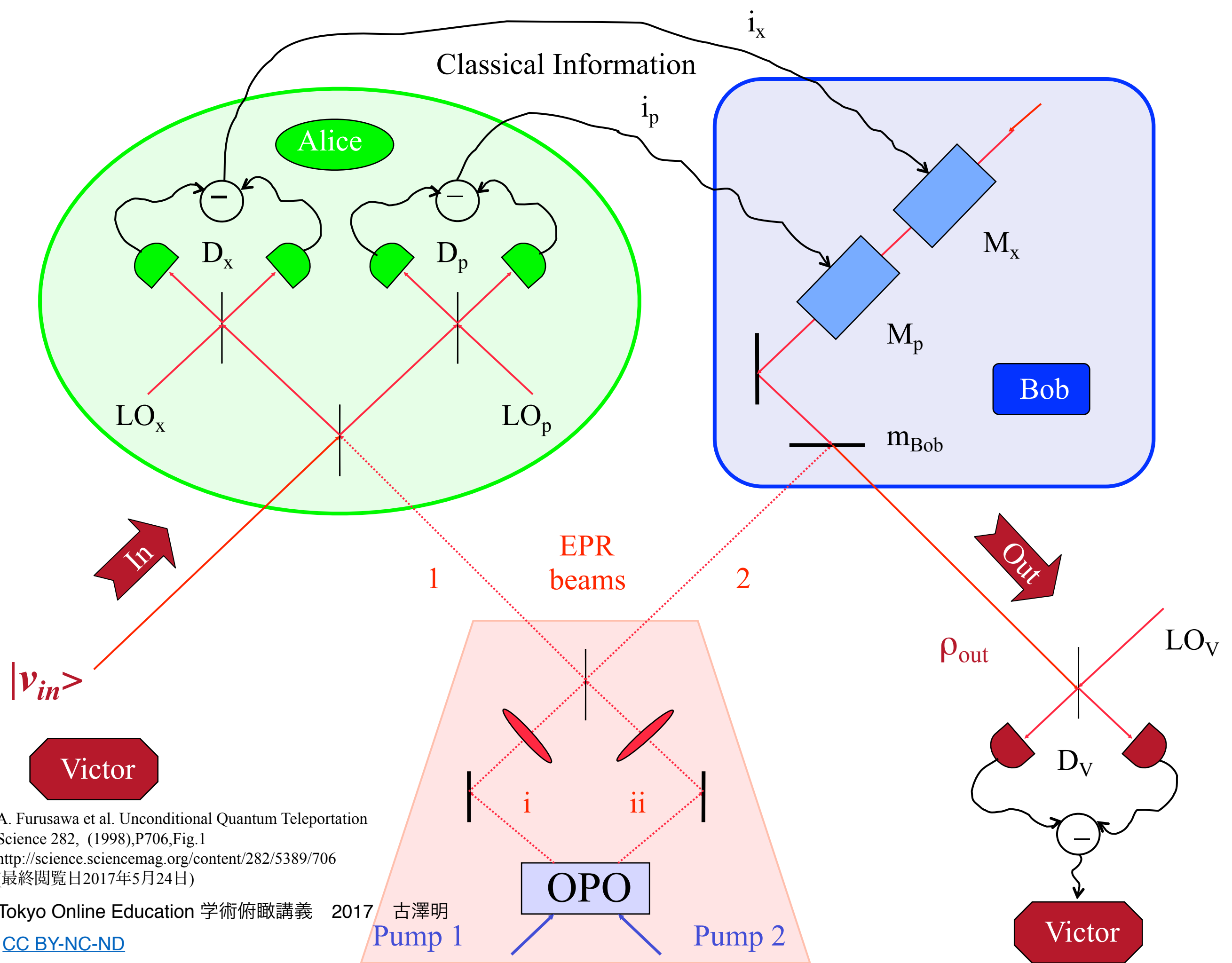
50/50ビームスプリッター

量子もつれ状態にある光ビーム

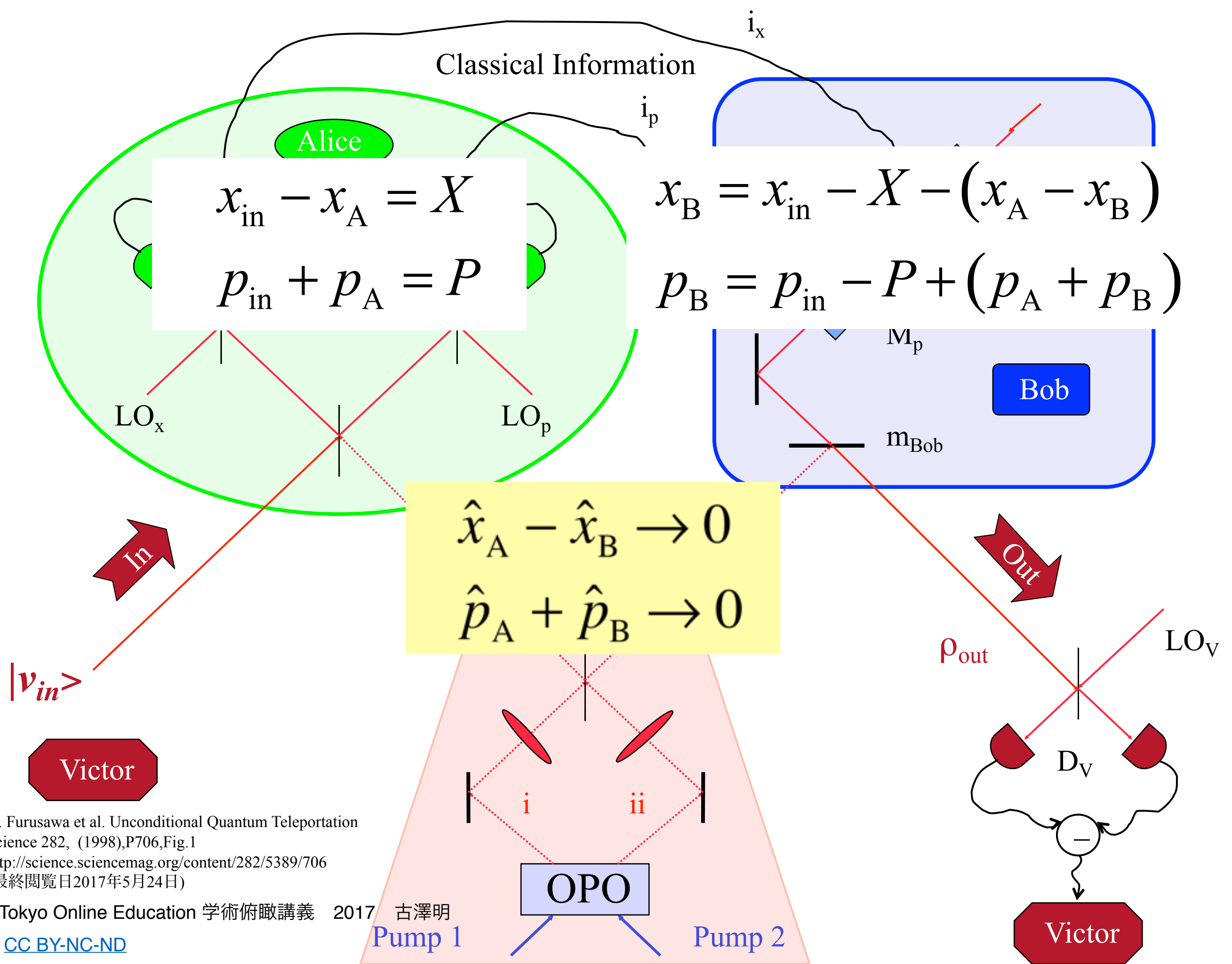


cos: AM sin: FM

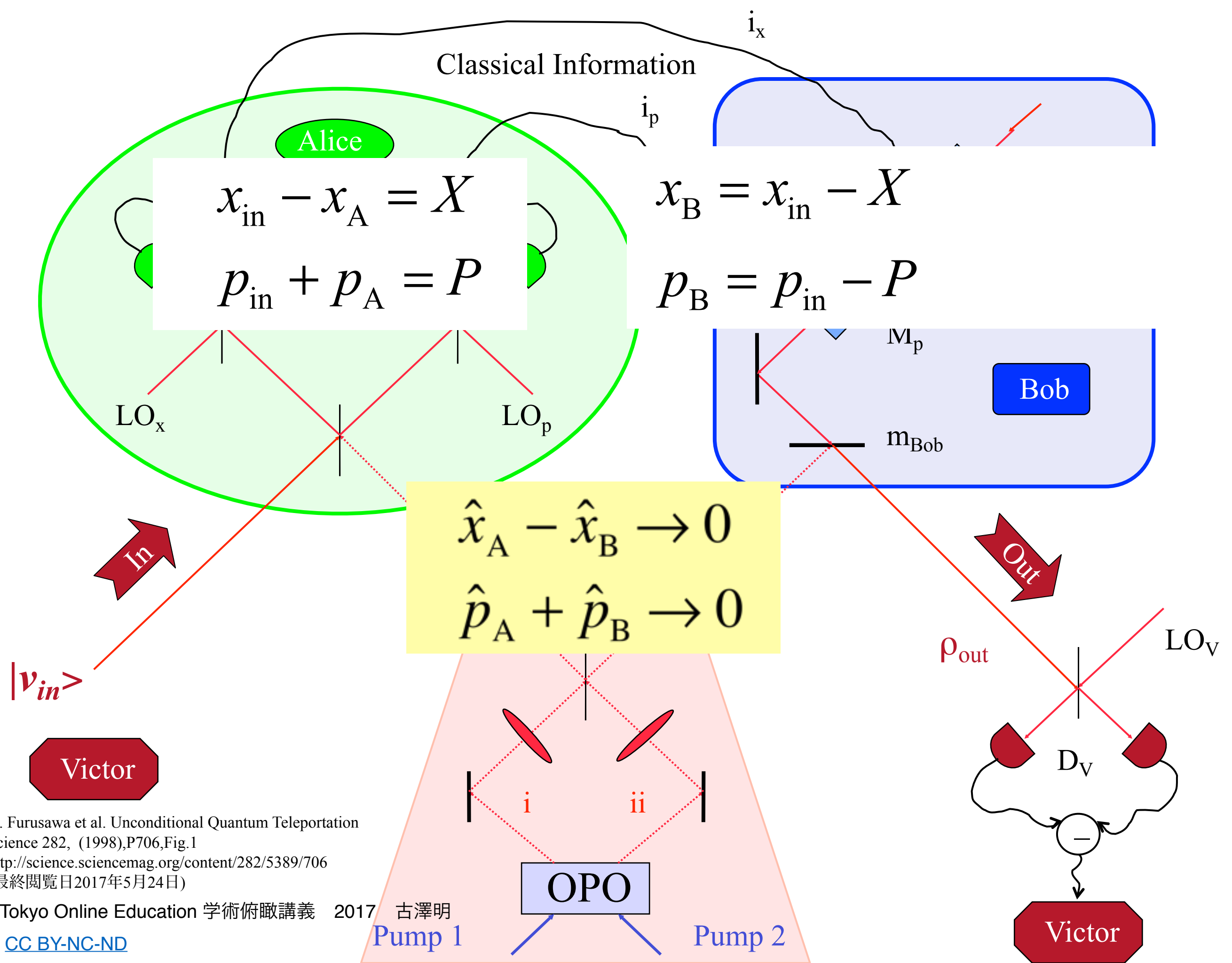
スクイーズド光から量子もつれ状態にある光ビームを生成



A. Furusawa et al. Unconditional Quantum Teleportation
 Science 282, (1998),P706, Fig.1
<http://science.sciencemag.org/content/282/5389/706>
 (最終閲覧日2017年5月24日)



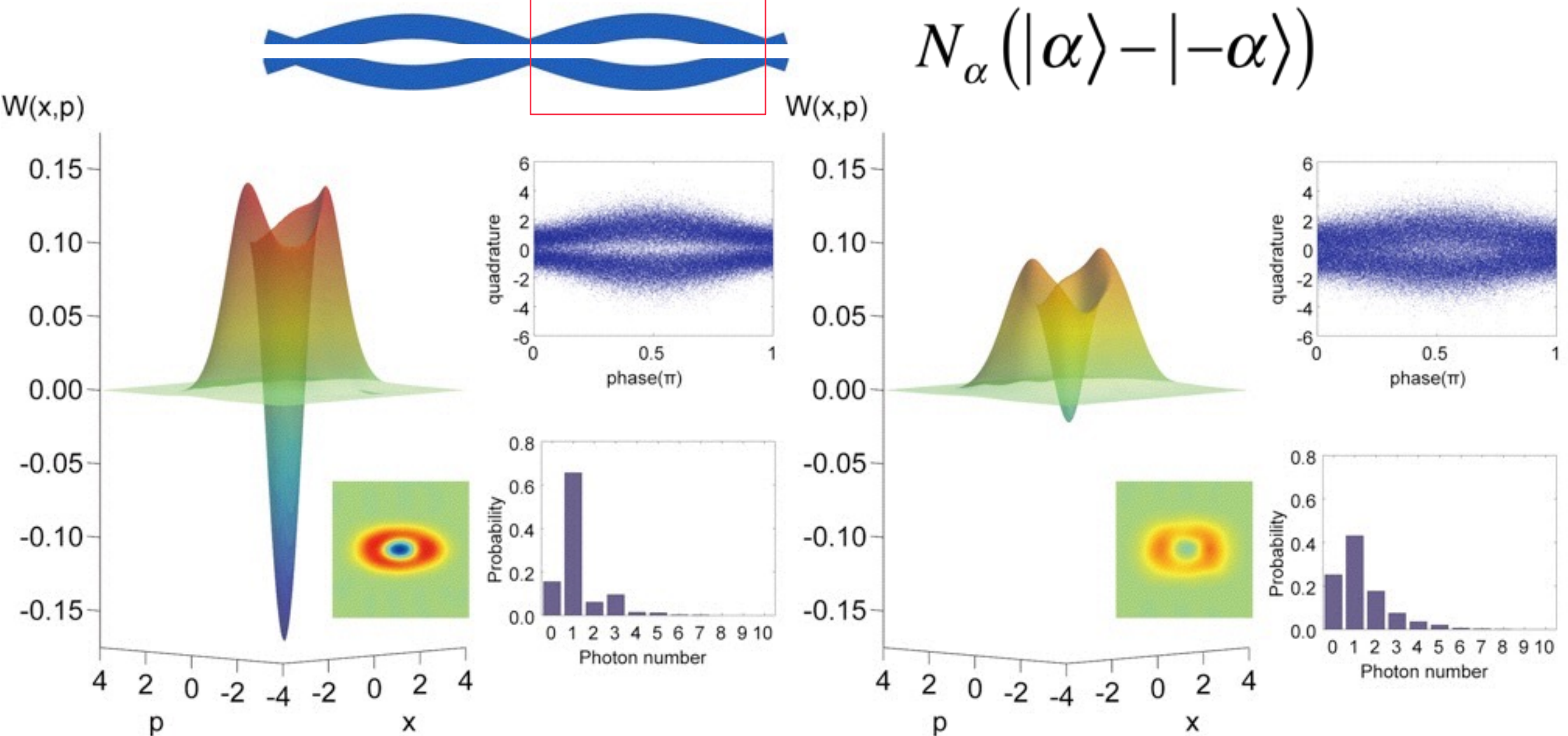
A. Furusawa et al. Unconditional Quantum Teleportation
 Science 282, (1998),P706, Fig.1
<http://science.sciencemag.org/content/282/5389/706>
 (最終閲覧日2017年5月24日)



A. Furusawa et al. Unconditional Quantum Teleportation
 Science 282, (1998),P706, Fig.1
<http://science.sciencemag.org/content/282/5389/706>
 (最終閲覧日2017年5月24日)

Teleportation of a Schrödinger cat state of light

N. Lee, H. Benichi, Y. Takeda, S. Takeda, J. Webb, E. Huntington, & A. Furusawa, Teleportation of Nonclassical Wave Packets of Light *Science* 332, 330 (2011) p332 Fig3
<http://science.sciencemag.org/content/332/6027/330> (最終閲覧日：2017年5月26日)



Input

Output

著作権等の都合により、ここに挿入されていた画像を削除しました

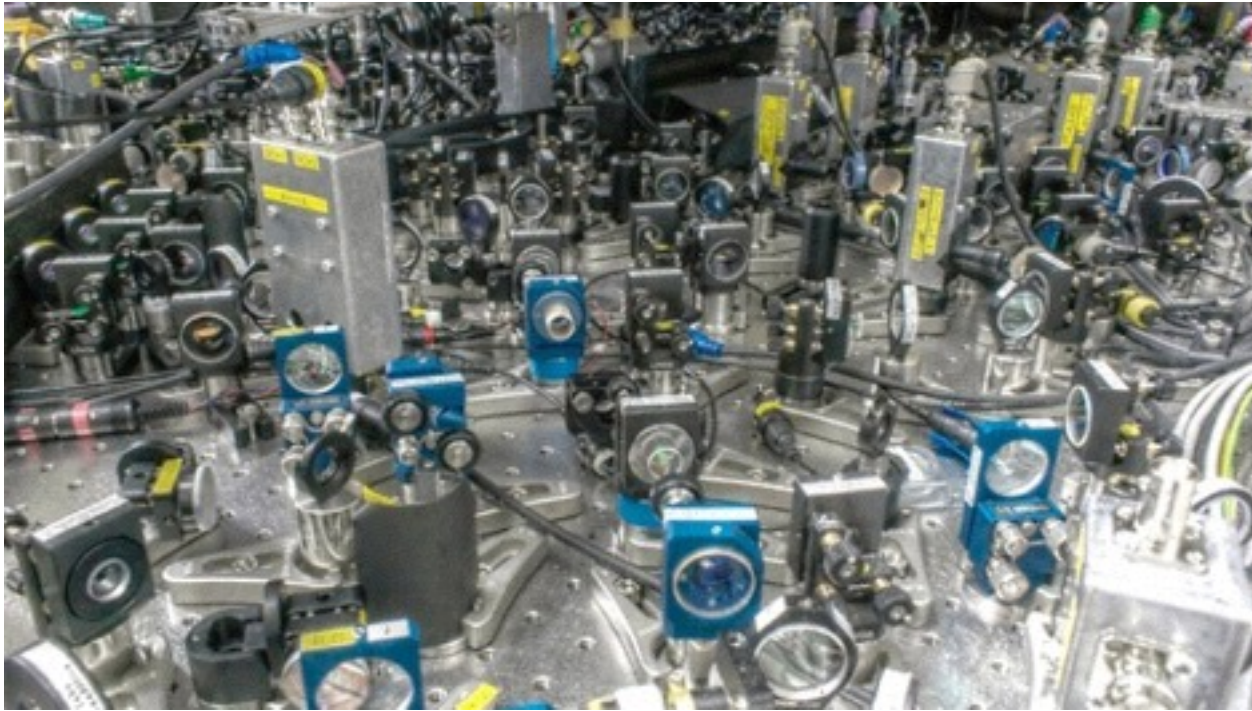
平成23年4月14日

FOX NEWS2011年4月14日記事

Quantum Leap: Scientists Teleport Bits of Light

<http://www.foxnews.com/tech/2011/04/14/quantum-leap-bits-light-teleported-place.html>

(最終閲覧日：2017年5月26日)



著作権等の都合により、ここに挿入されていた画像を削除しました

ABC NEWS2011年4月15日の記事

見出し：Scientists teleport Schrodinger's cat

<http://www.abc.net.au/news/2011-04-15/scientists-teleport-schrodingers-cat/2614780>

(最終閲覧日：2017年5月26日)

著作権等の都合により、ここに挿入されていた映像を削除しました。

ロシア国営放送B E C T И2011年5月16日放送

見出し：Ученые из Японии телепортировали

запутанный квант

<http://www.vesti.ru/doc.html?id=452675>

(最終閲覧日：2017年5月26日)

Teleportation of Nonclassical
Wave Packets of Light

Noriyuki Lee, Hugo Benichi,
Yuishi Takeno, Shuntaro Takeda,
James Webb, Elanor Huntington, Akira
Furusawa

Science vol332(2011)pp330-333

<http://science.sciencemag.org/content/>

Deterministic quantum teleportation of photonic quantum bits by a hybrid technique

Shuntaro Takeda, Takahiro Mizuta, Maria Fuwa, Peter van Loock & Akira Furusawa

nature vol.500(2013), pp315-318

<https://www.nature.com/nature/journal/v500/n7462/full/nature12366.html>

(最終閲覧日：2017年5月26日)

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

2013年8月15日朝日新聞
量子コンピューターに一步 情報転送の効率
100倍向上に成功

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

2013年8月15日日本経済新聞
情報、瞬時にテレポート 未来のITに光
東大、転送効率を大幅改善

http://www.nikkei.com/article/DGXNASDG1403K_U3A810C1CR8000/
(最終閲覧日：2017年5月26日)

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

2013年8月15日読売新聞記事
光の粒子 瞬時に情報伝達 量子テレポーテーション 東大チーム初成功
量子コンピューター」に道

量子テレポーテーションを用いて 量子コンピューターをつくる

ユニバーサルゲートセット

NAND

量子ビット

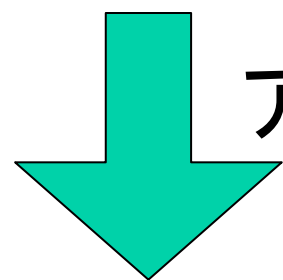
デジタル

連続量

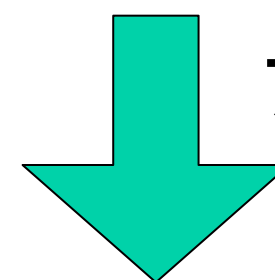
アナログ

計算基底 $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ bit flip σ_x

$\{|x\rangle\}$ x -displacement $\hat{X}(s) = e^{-2is\hat{p}}$



アダマール変換



フーリエ変換

共役基底 $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ phase flip σ_z
 $|\pm\rangle = \frac{|0\rangle \pm |1\rangle}{\sqrt{2}}$

$\{|p\rangle\}$ p -displacement $\hat{Z}(s) = e^{2is\hat{x}}$

CNOT $|x\rangle|x'\rangle \rightarrow |x\rangle|x+x' \bmod 2\rangle$

QND $|x\rangle|x'\rangle \rightarrow |x\rangle|x+x'\rangle$

$\pi/8$ gate $T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix}$

Cubic phase gate $e^{i\gamma\hat{x}^3} |\psi\rangle$

ユニバーサルゲートセット

NAND

量子ビット

デジタル

連続量

アナログ

計算基底 $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ bit flip σ_x

$\{|x\rangle\}$ x -displacement $\hat{X}(s) = e^{-2is\hat{p}}$

量子テレポーテーションを用いて
ユニバーサルゲートセットをつくる

共役基底 $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ σ_z
 $|\pm\rangle = \frac{|0\rangle \pm |1\rangle}{\sqrt{2}}$

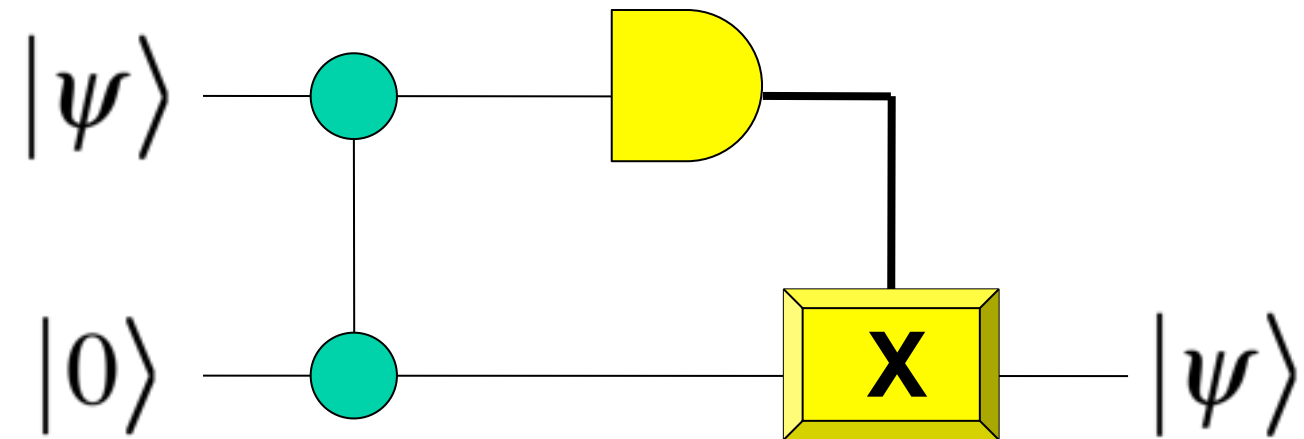
フーリエ変換
 $\{|p\rangle\}$ $Z(s) = e^{2is\hat{x}}$

CNOT $|x\rangle|x'\rangle \rightarrow |x\rangle|x+x' \bmod 2\rangle$ QND $|x\rangle|x'\rangle \rightarrow |x\rangle|x+x'\rangle$

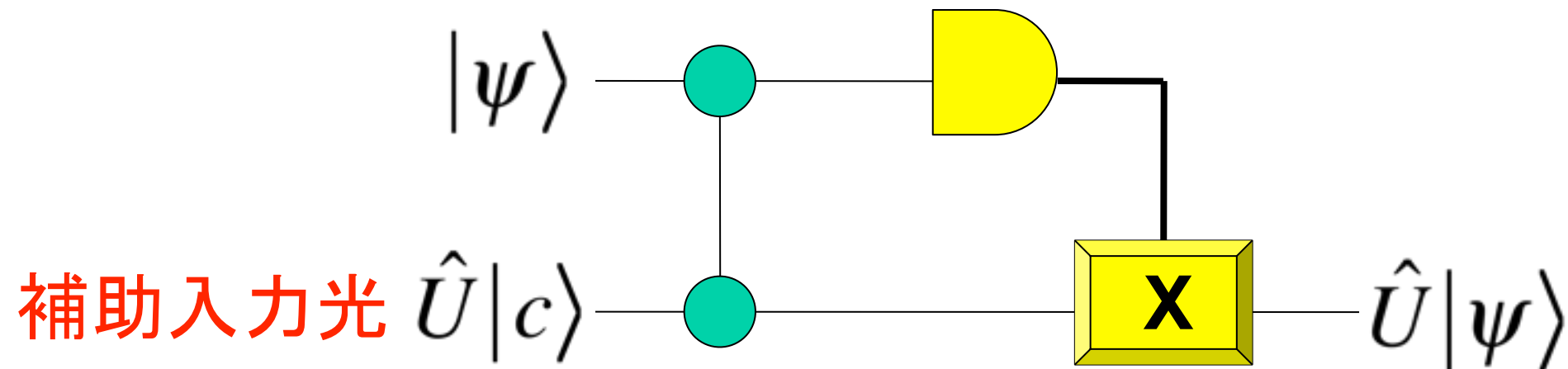
$\pi/8$ gate $T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix}$

Cubic phase gate $e^{i\gamma\hat{x}^3} |\psi\rangle$

量子テレポーテーション



量子ゲートテレポーテーション



強い光で予め生成

非ガウス型状態

量子力学的操作
が施された光 $\hat{U}|c\rangle$

3次位相状態 $e^{i\gamma\hat{x}^3} |p=0\rangle$

4次位相状態 $e^{i\frac{\pi}{2}(\hat{x}^2 + \hat{p}^2)^2} |\alpha\rangle$

非ガウス型操作

必要とされる
量子力学的操作 $\hat{U}$

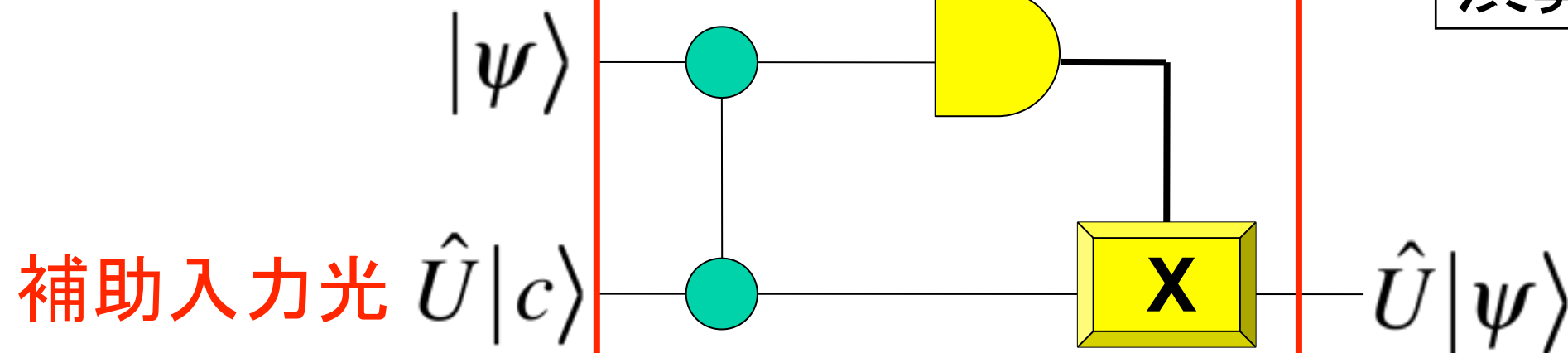
3次位相ゲート $e^{i\gamma\hat{x}^3}$

4次位相ゲート $e^{i\frac{\pi}{2}(\hat{x}^2 + \hat{p}^2)^2}$

量子ゲートテレポーテーション

「量子オペアンプ」

オペアンプ
演算増幅器



強い光で予め生成

量子テレポーテーションを用いて
ユニバーサルゲートセットを作製可能

3次位相状態 $e^{i\gamma\hat{x}^3} |p=0\rangle$

4次位相状態 $e^{i\frac{\pi}{2}(\hat{x}^2 + \hat{p}^2)^2} |\alpha\rangle$

外付け素子

3次位相ゲート $e^{i\gamma\hat{x}^3}$

4次位相ゲート $e^{i\frac{\pi}{2}(\hat{x}^2 + \hat{p}^2)^2}$

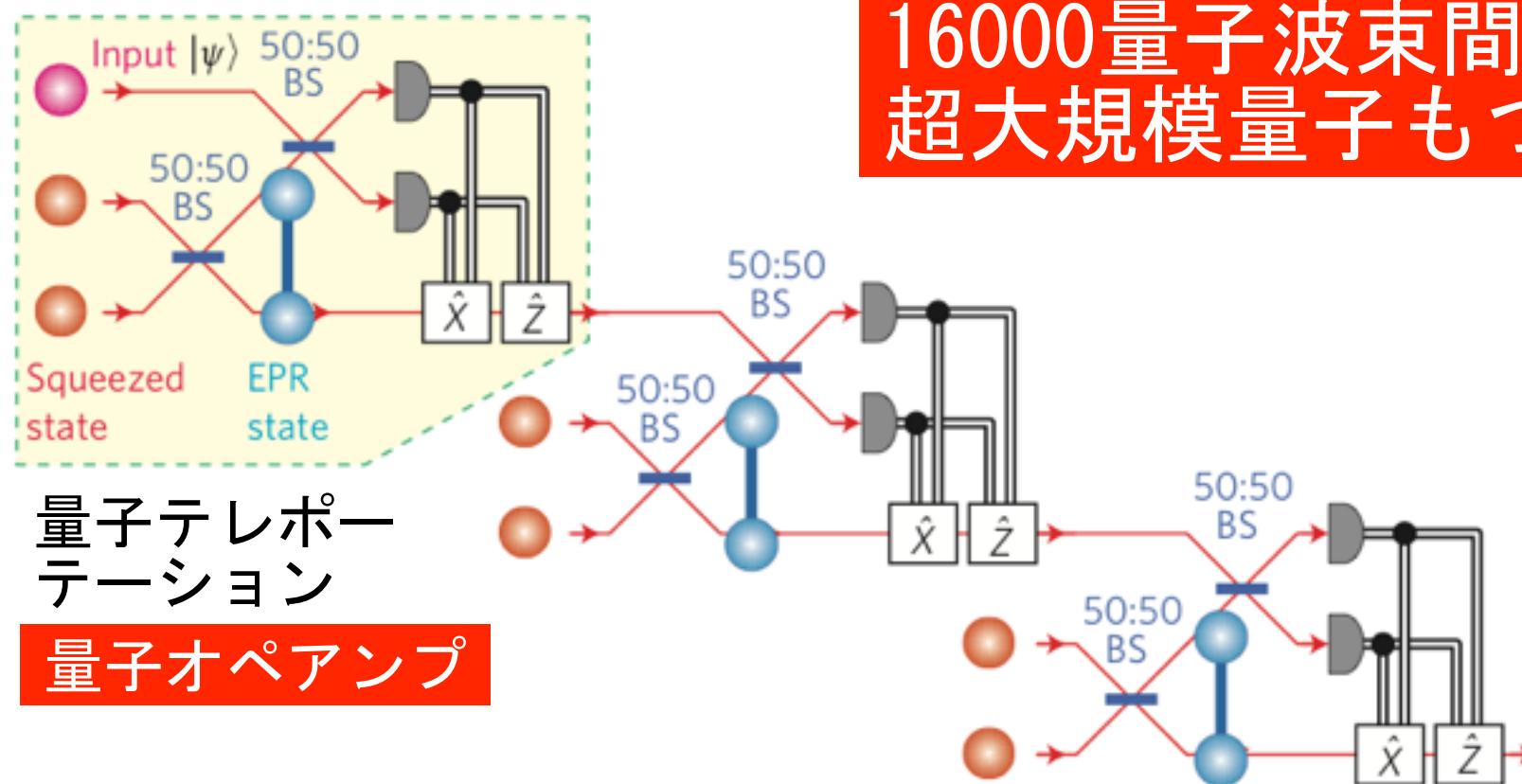
大規模量子エンタングルド状態—時間領域多重で実現

Ultra-large-scale continuous-variable cluster states multiplexed in the time domain

Shota Yokoyama, Ryuji Ukai, Seiji C. Armstrong, Chanond Sornphiphatphong, Toshiyuki Kaji, Shigenari Suzuki, Jun-ichi Yoshikawa, Hidehiro Yonezawa, Nicolas C. Menicucci & Akira Furusawa

Nature Photonics 7, (2013), pp982–986

<http://www.nature.com/nphoton/journal/v7/n12/full/nphoton.2013.287.html>



16000量子波束間の
超大規模量子もつれ生成に成功

量子ゲートテレポーションの時間領域多重化

大規模量子エンタングルド状態—時間領域多重で実現

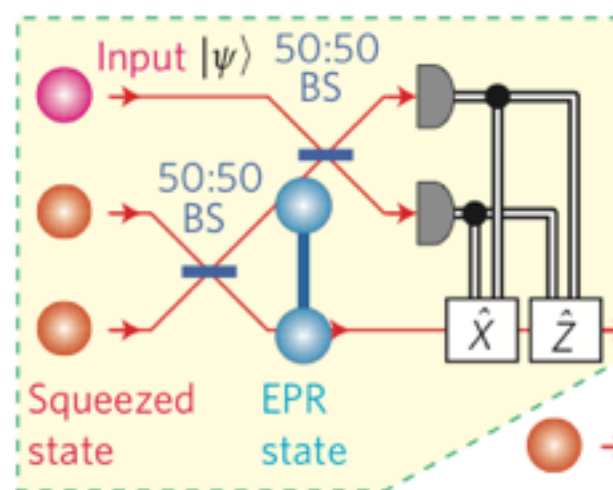
Ultra-large-scale continuous-variable cluster states multiplexed in the time domain

Shota Yokoyama, Ryuji Ukai, Seiji C. Armstrong, Chanond Sornphiphatphong, Toshiyuki Kaji, Shigenari Suzuki, Jun-ichi Yoshikawa, Hidehiro Yonezawa, Nicolas C. Menicucci & Akira Furusawa

Nature Photonics 7, (2013), pp982–986

<http://www.nature.com/nphoton/journal/v7/n12/full/nphoton.2013.287.html>

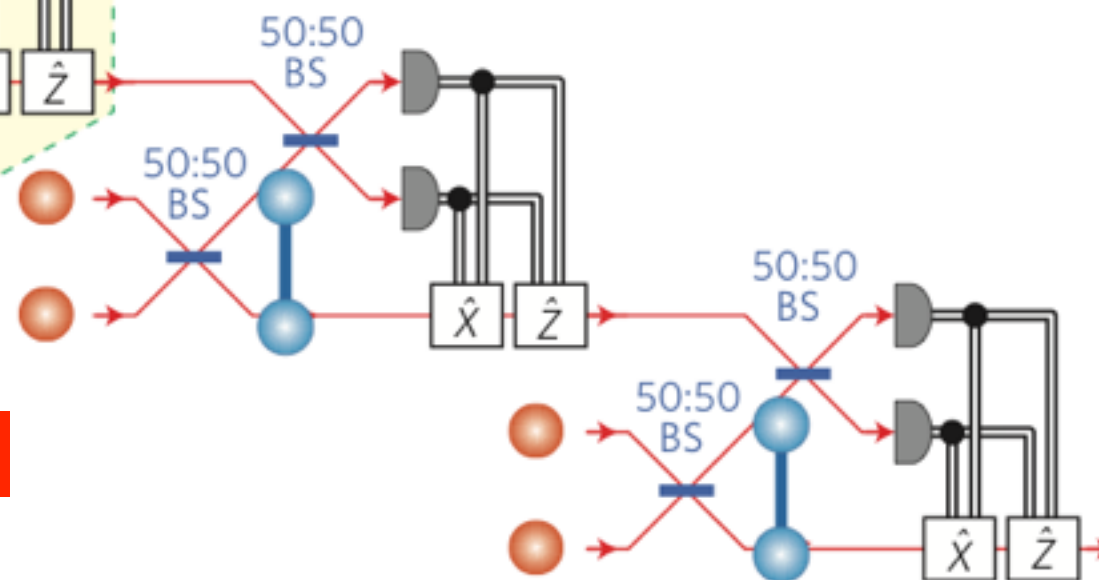
量子オペアンプである
量子テレポーテーションを多数用いて
量子コンピューター作製可能



量子テレポーテーション

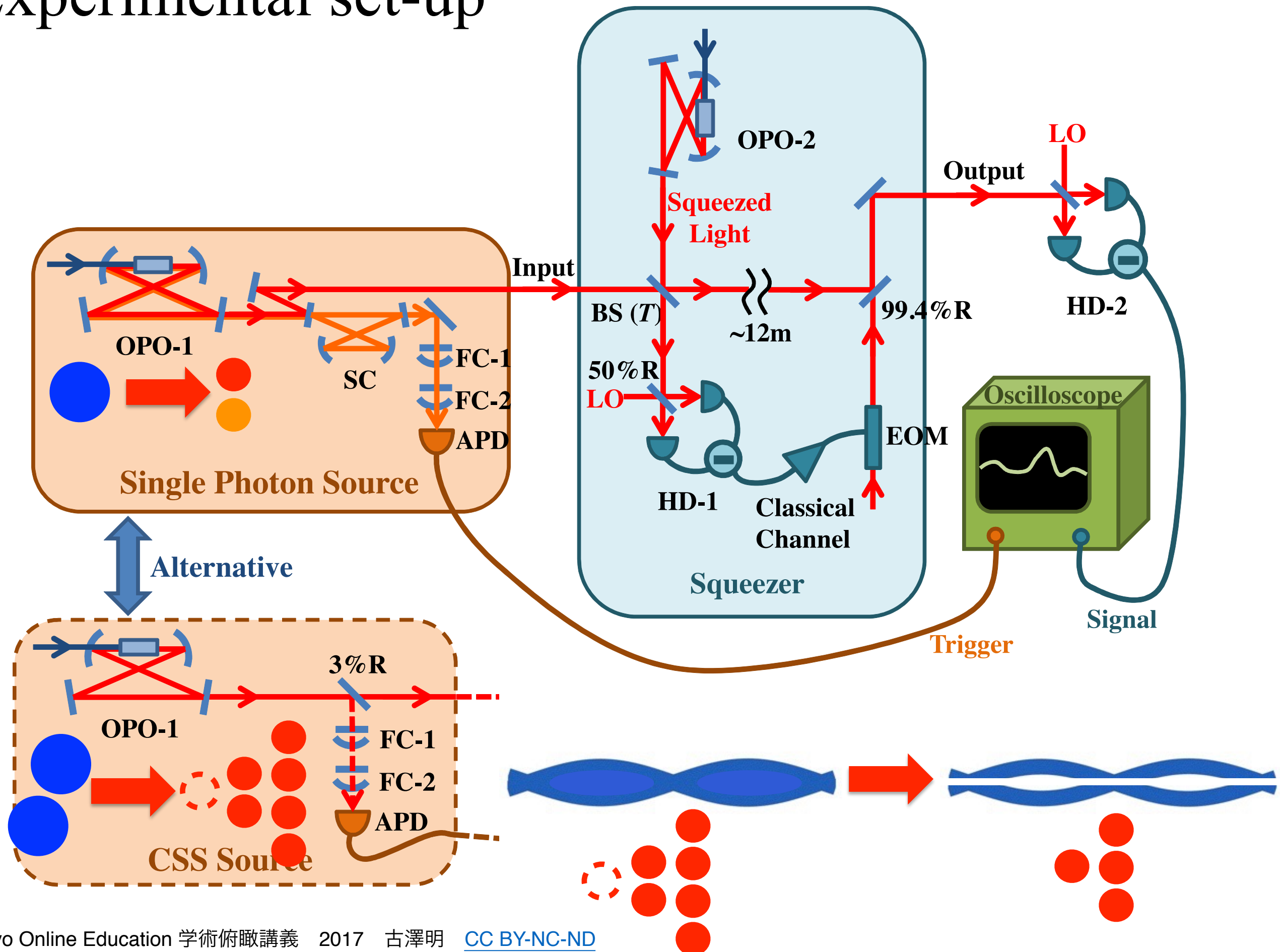
量子オペアンプ

16000量子波束間の
超大規模量子もつれ生成に成功



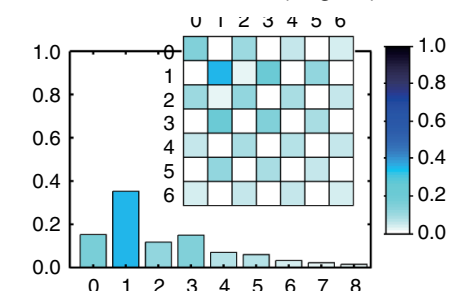
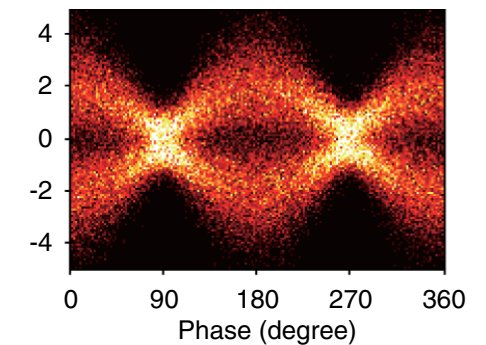
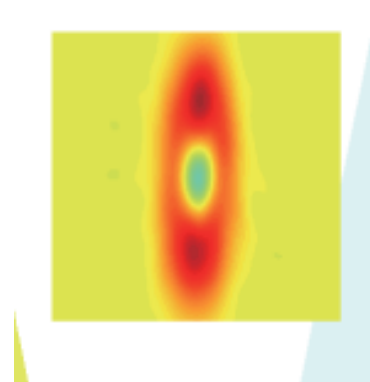
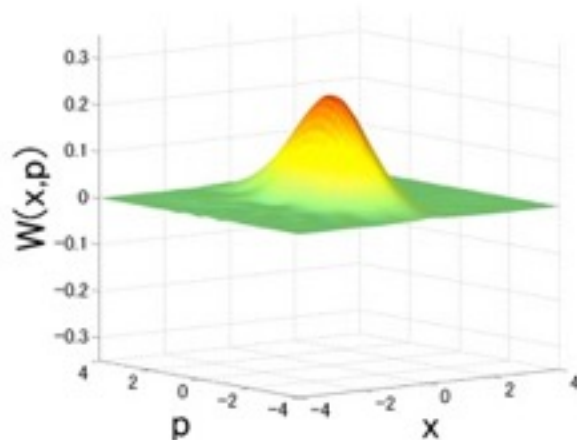
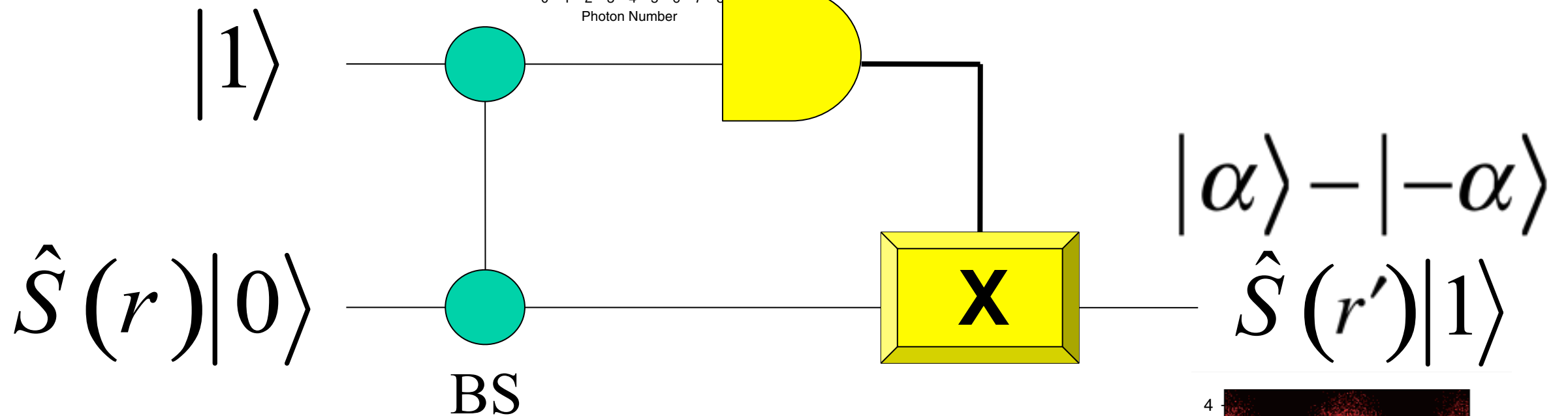
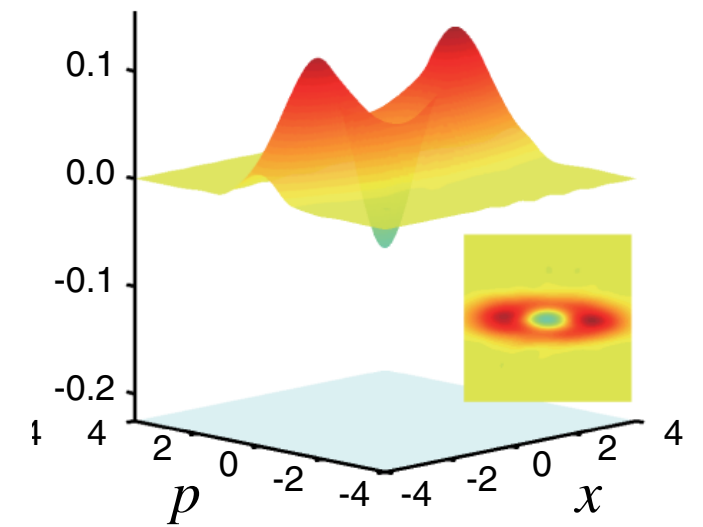
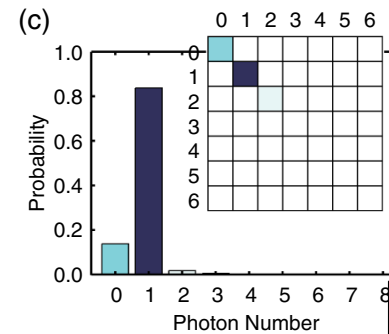
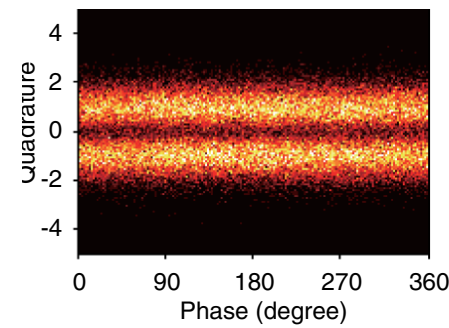
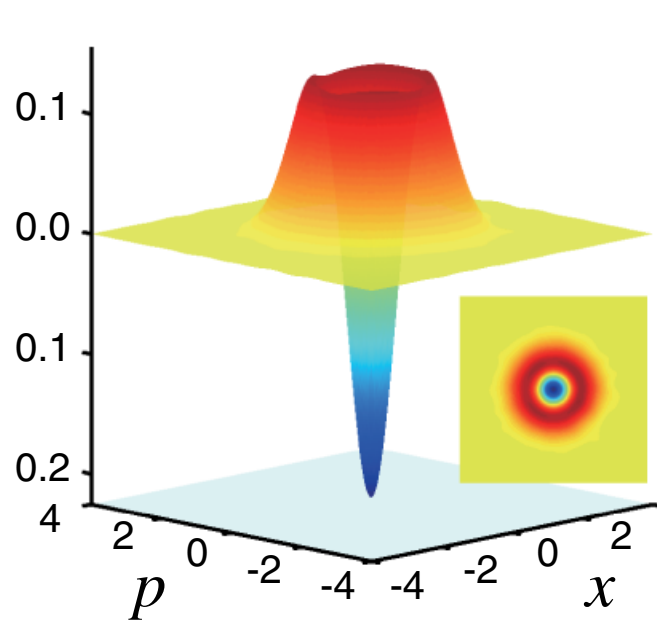
量子ゲートテレポーテーションの時間領域多重化

Experimental set-up



Squeezing of a single photon

From particles to waves

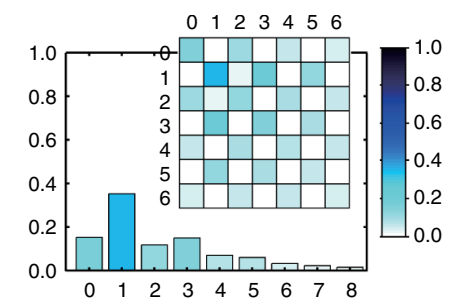
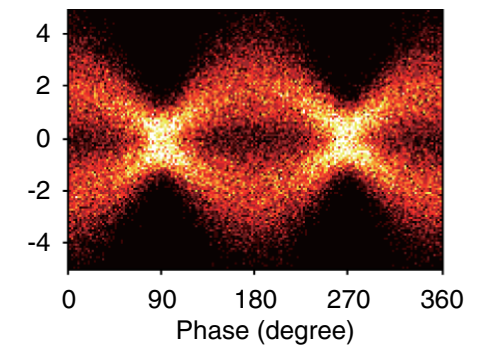
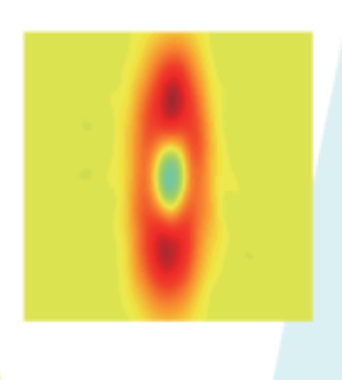
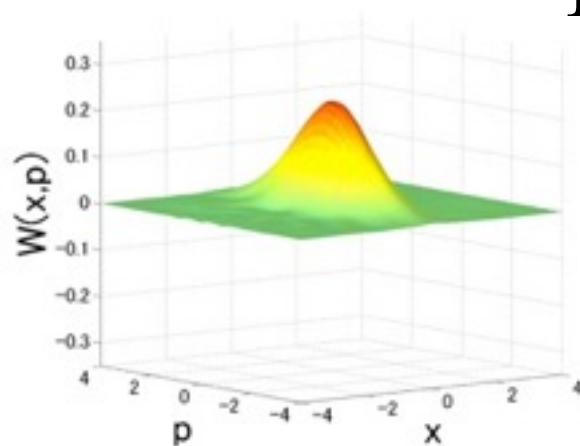
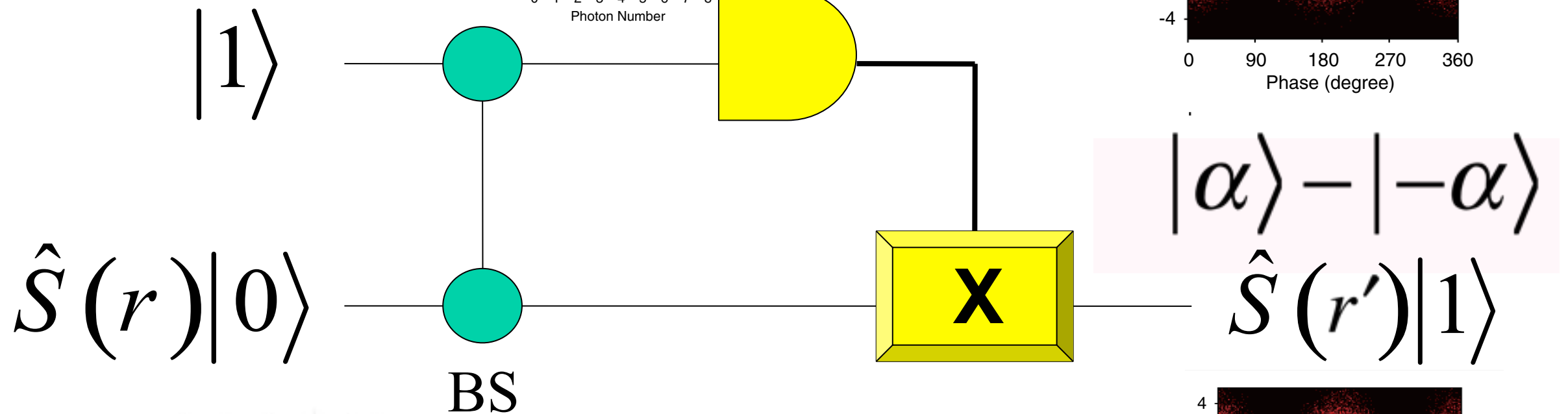
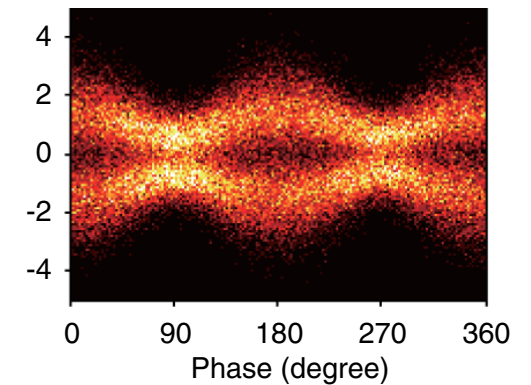
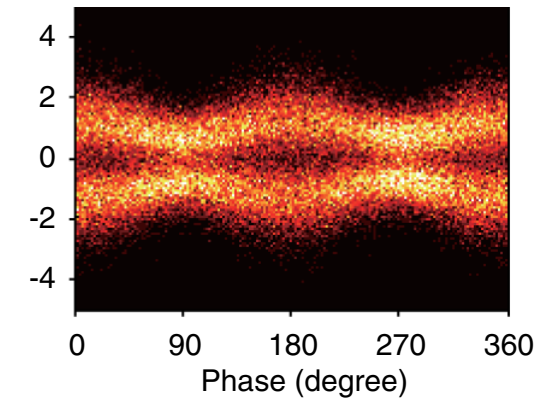
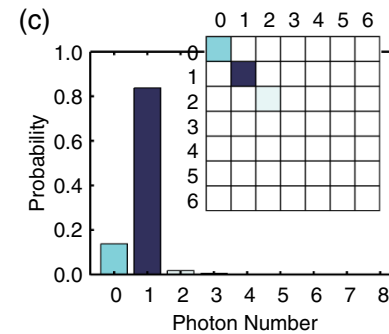
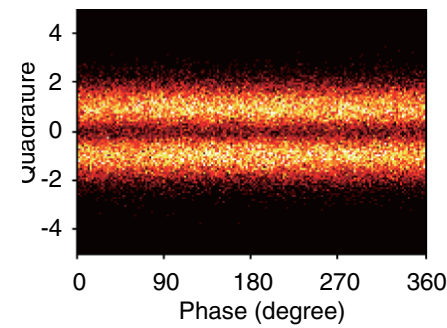
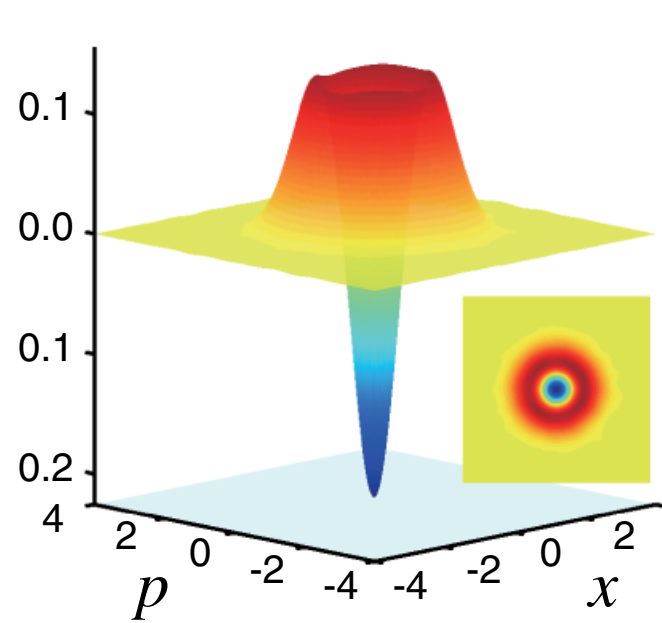


without any correction!!

YExploring a New Regime for Processing Optical Qubits: Squeezing and Unsqueezing Single Photons
Yoshichika Miwa, Jun-ichi Yoshikawa, Noriaki Iwata, Mamoru Endo, Petr Marek, Radim Filip, Peter van Loock, and Akira Furusawa
PHYSICAL REVIEW LETTERS, 113, 013601 (2014)
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.113.013601>
fig2

Squeezing of a single photon

From particles to waves

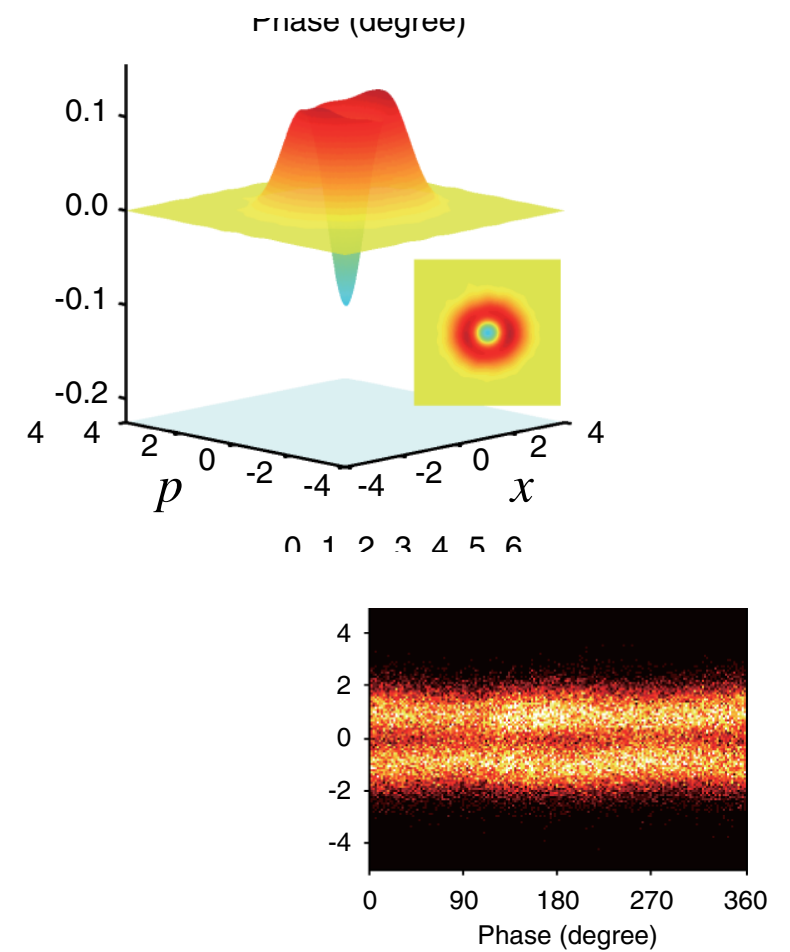
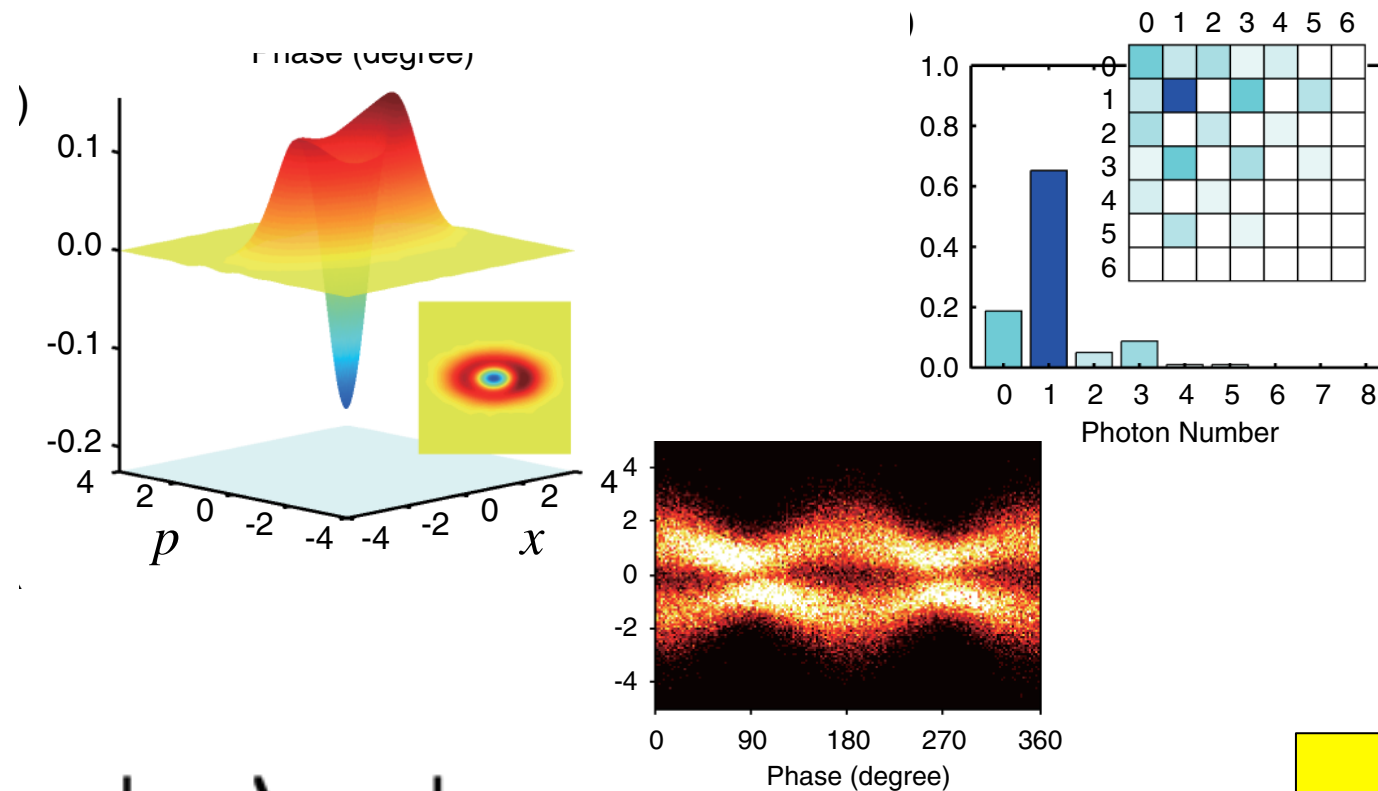


without any correction!!

YExploring a New Regime 1
Processing Optical Qubits:
Squeezing and Unsqueezing
Single Photons
Yoshichika Miwa, Jun-ichi
Yoshikawa, Noriaki Iwata,
Mamoru Endo, Petr Marek,
Radim Filip, Peter van Looc
and Akira Furusawa
PHYSICAL REVIEW
LETTERS, 113, 013601(201
[https://journals.aps.org/prl/
abstract/10.1103/PhysRevLett.113.013601](https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.113.013601)
fig2

Squeezing of *Schrödinger cat*

From waves to particles

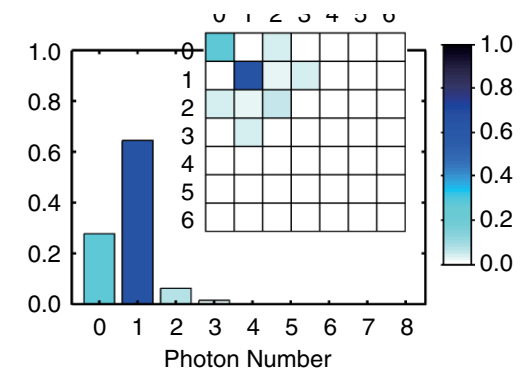
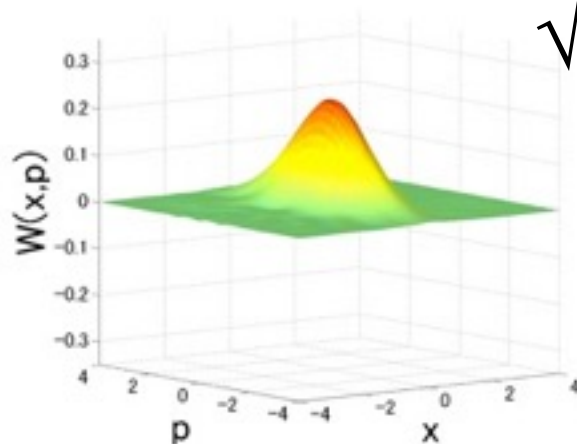


$$|\alpha\rangle - |-\alpha\rangle$$

$$\hat{S}(r)|0\rangle$$

$\sqrt{\text{BS}}$

$$|1\rangle$$

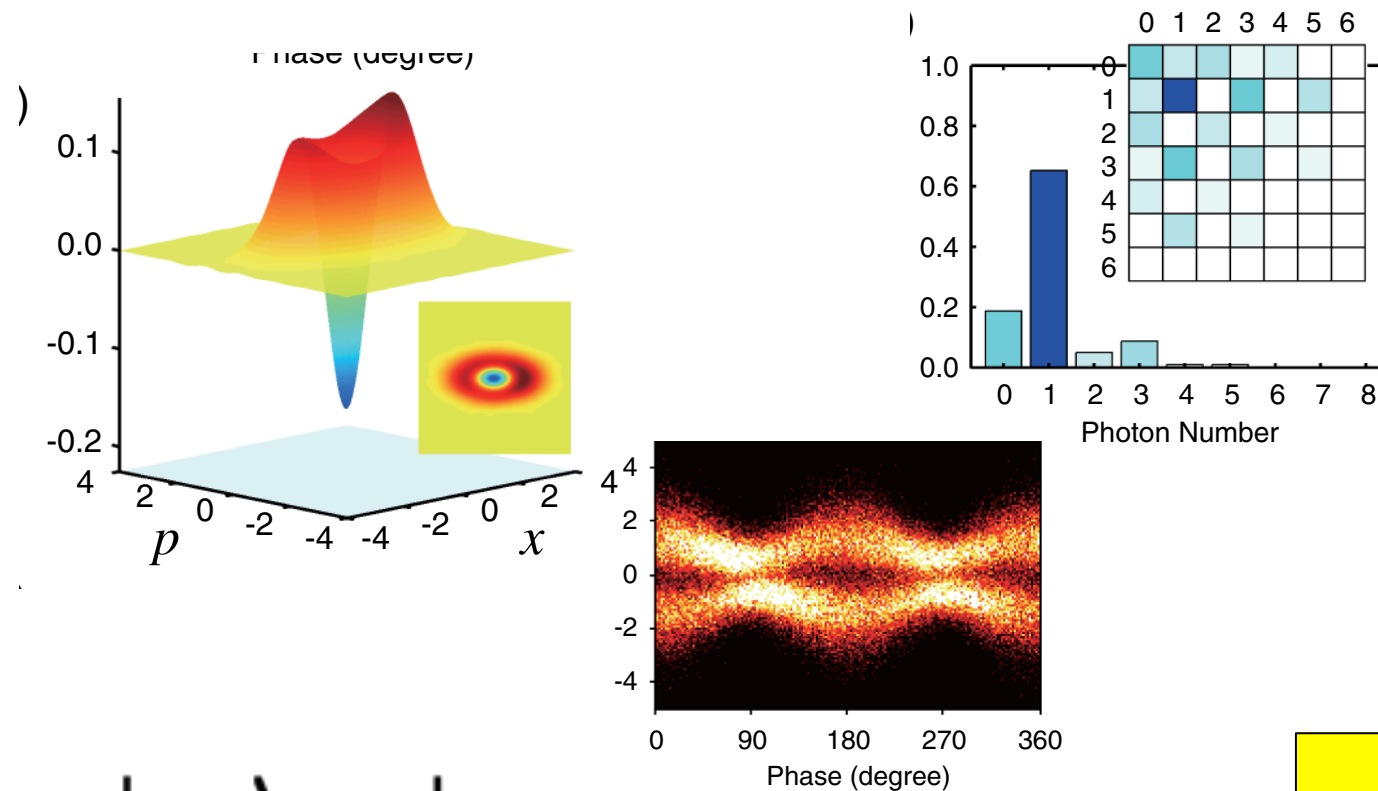


without any correction!!

YExploring a New Regime for Processing Optical Qubits: Squeezing and Unsqueezing Single Photons
Yoshichika Miwa, Jun-ichi Yoshikawa, Noriaki Iwata, Mamoru Endo, Petr Marek, Radim Filip, Peter van Loock, and Akira Furusawa
PHYSICAL REVIEW LETTERS, 113, 013601 (2014)
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.113.013601>
fig 3

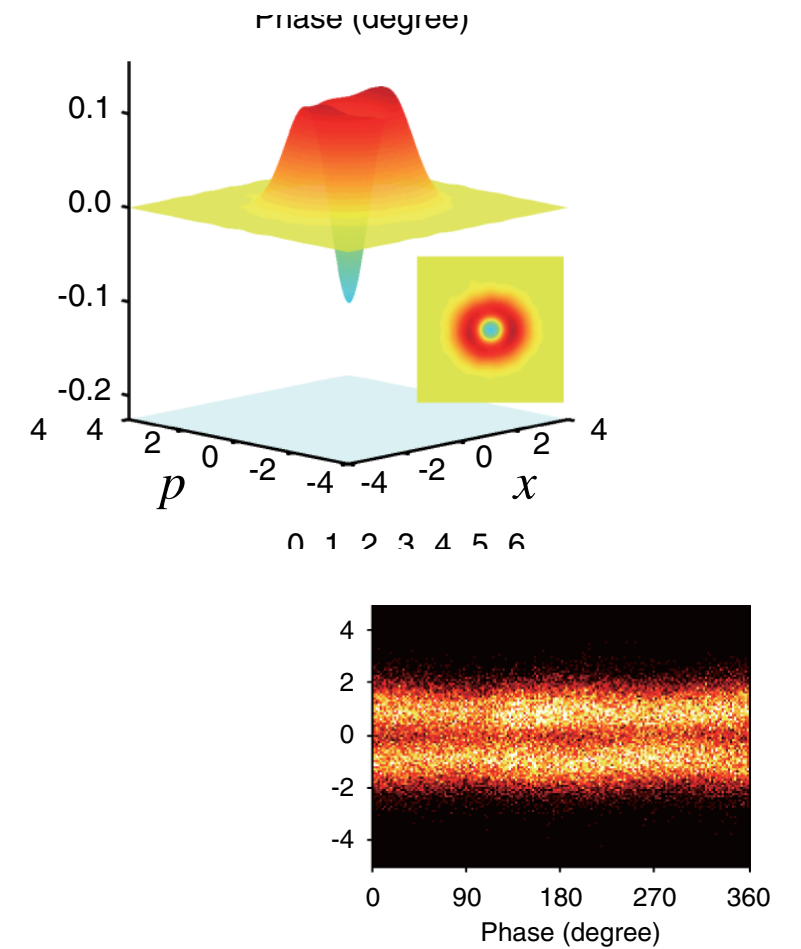
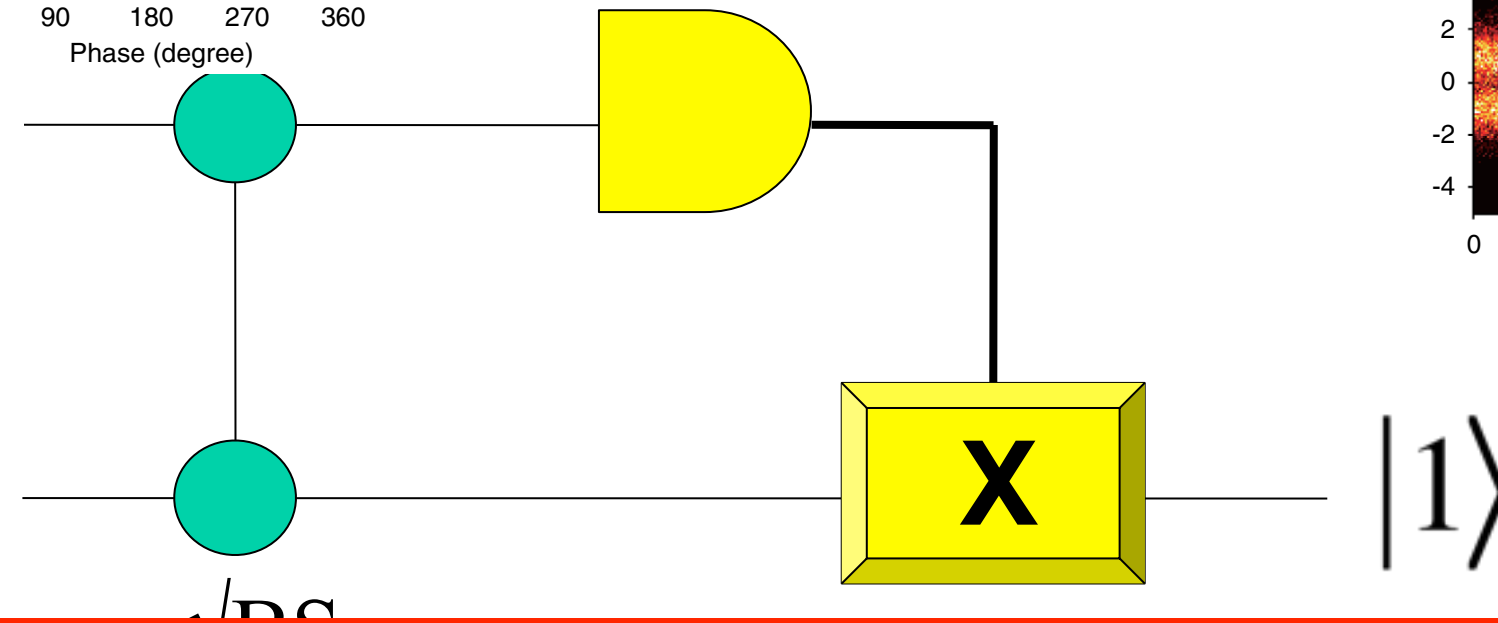
Squeezing of *Schrödinger cat*

From waves to particles

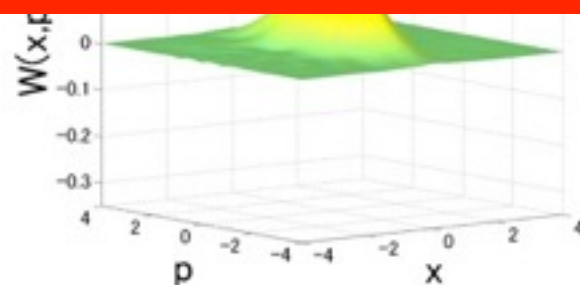


$$|\alpha\rangle - |-\alpha\rangle$$

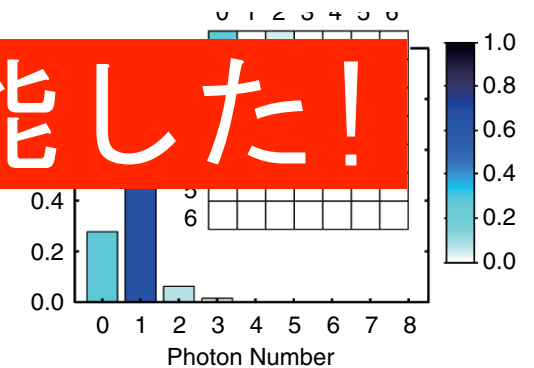
$$\hat{S}(r)|0\rangle$$



位相敏感増幅器としてちゃんと機能した!



Exploring a New Regime for Processing Optical Qubits: Squeezing and Unsqueezing Single Photons
Yoshichika Miwa, Jun-ichi Yoshikawa, Noriaki Iwata, Mamoru Endo, Petr Marek, Radim Filip, Peter van Loock, and Akira Furusawa
PHYSICAL REVIEW LETTERS, 113, 013601 (2014)
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.113.013601>
fig 3



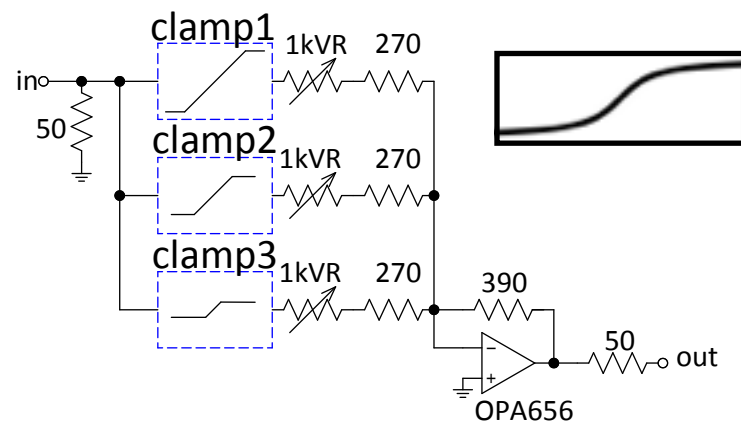
without any correction!!

measurement result

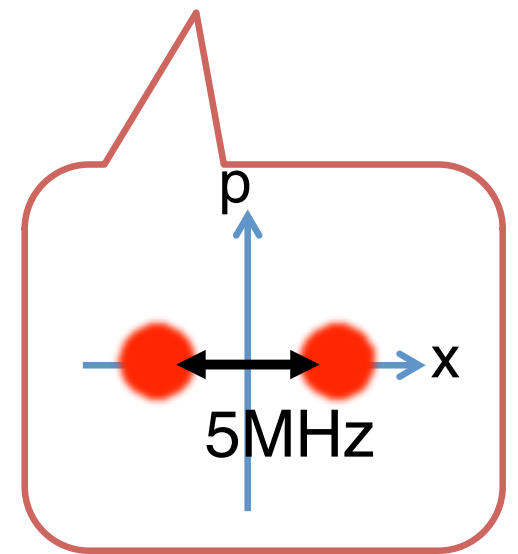
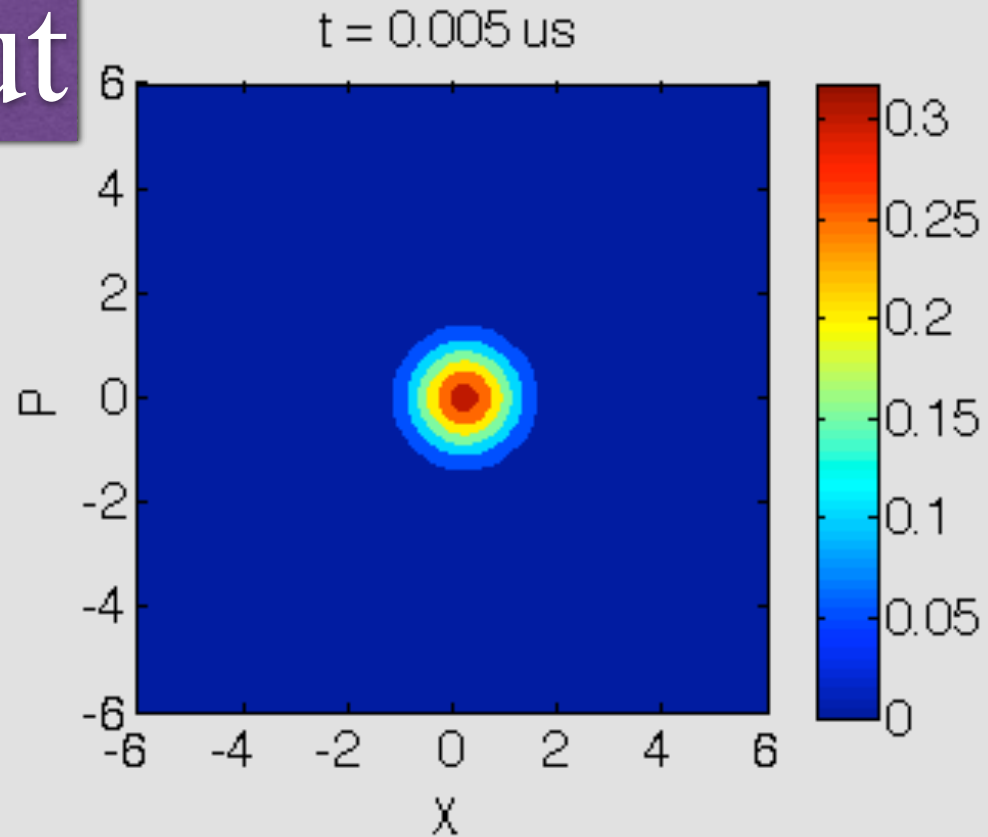
$$\kappa = \sin \omega t$$

$$\omega = 1 \text{ MHz}$$

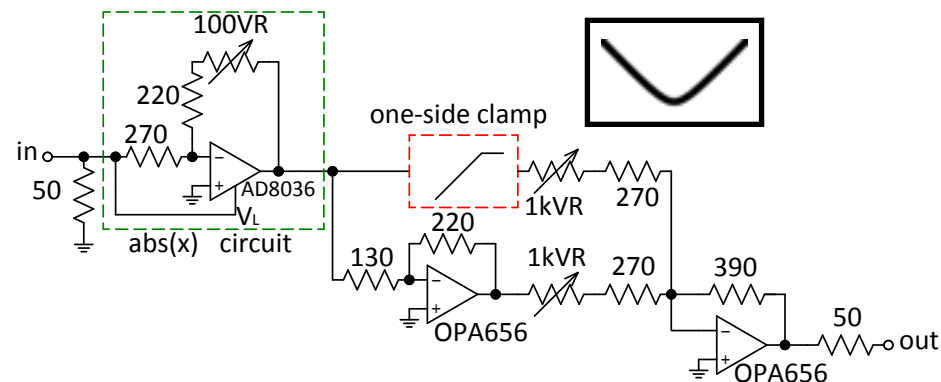
$$\theta = \arctan \kappa$$



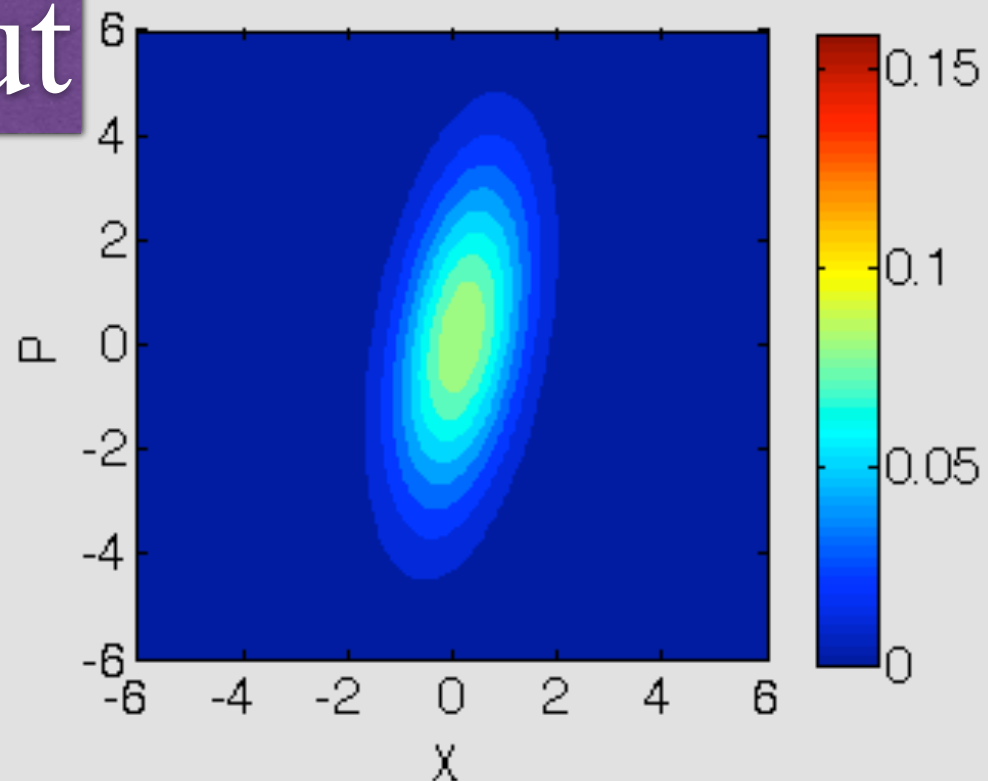
Input



$$\sqrt{2(1 + \kappa^2)}\text{-amp}$$



Output



**Time-varying
Hamiltonian!**

Furusawa&Yoshikawa Laboratory
<http://www.alice.t.u-tokyo.ac.jp/>
 Dynamic squeezing gate (movie)
<http://www.alice.t.u-tokyo.ac.jp/FIGDSGAnimation.gif>
 (最終閲覧日: 2017年6月14日)

UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2017 古澤明 [CC BY-NC-ND](#)

K. Miyata, H. Ogawa, P. Marek, R. Filip, H. Yonezawa, J. Yoshikawa, A. Furusawa, PRA 90, 060302(R) (2014)

measurement result

$$\kappa = \sin \omega t$$
$$\omega = 1 \text{ MHz}$$

$$\theta = \arctan \kappa$$



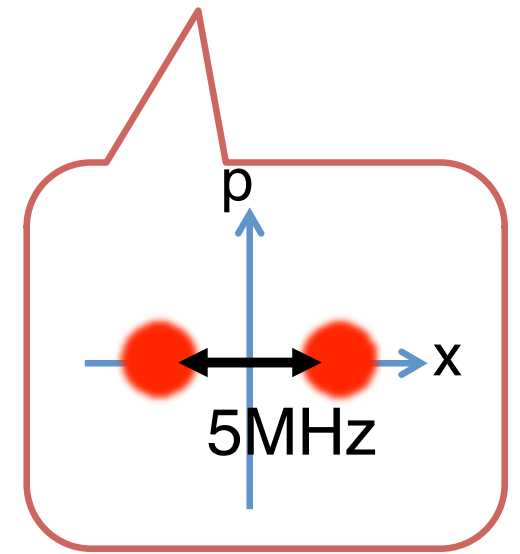
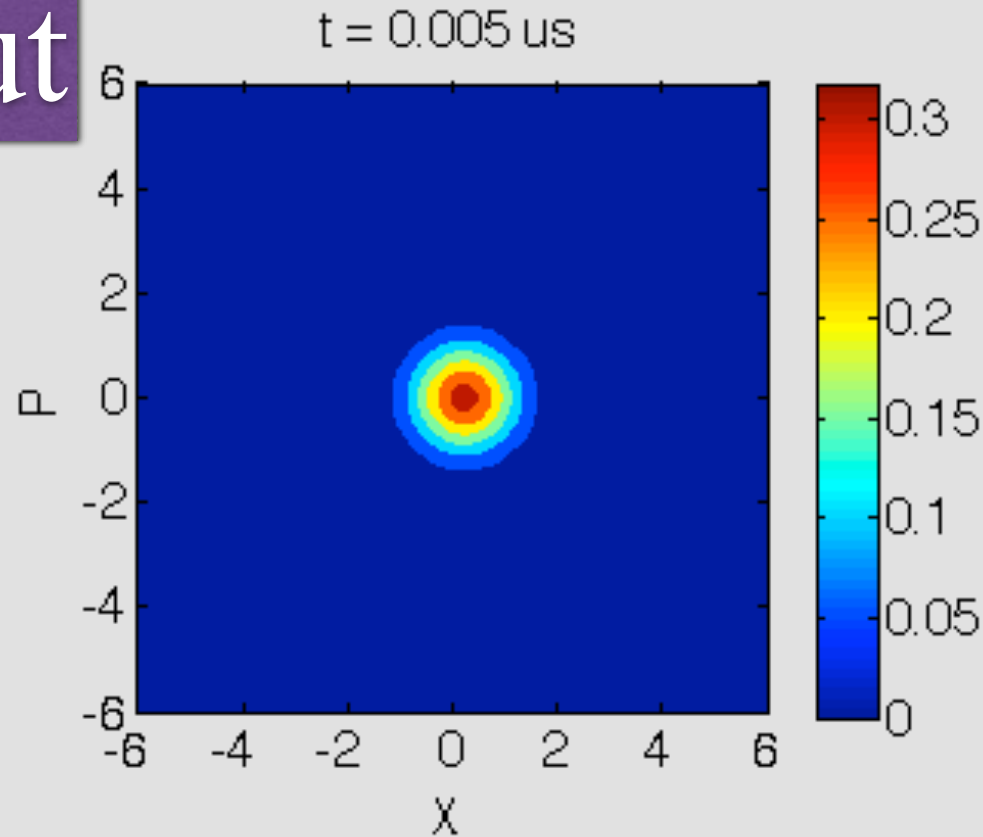
Ultra-low-latency FPGA board

Furusawa&Yoshikawa Laboratory
<http://www.alice.t.u-tokyo.ac.jp/>
Dynamic squeezing gate (movie)
<http://www.alice.t.u-tokyo.ac.jp/FIGDSGAnimation.gif>
(最終閲覧日：2017年6月14日)

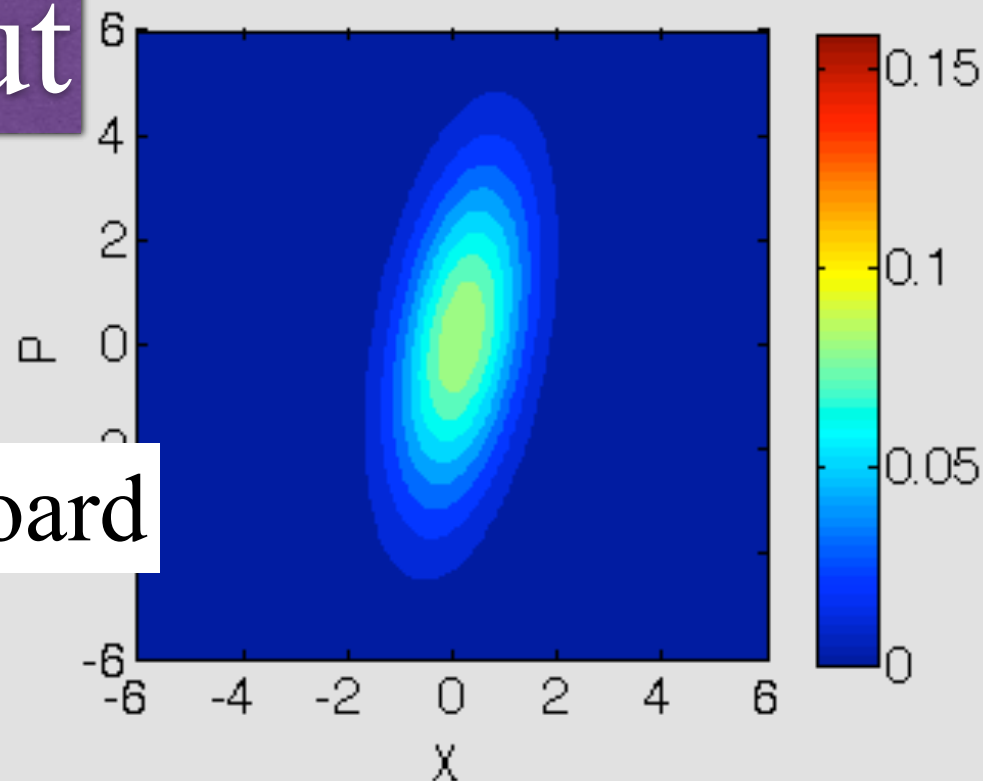
UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2017 古澤明 [CC BY-NC-ND](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Dynamic squeezing gate

Input



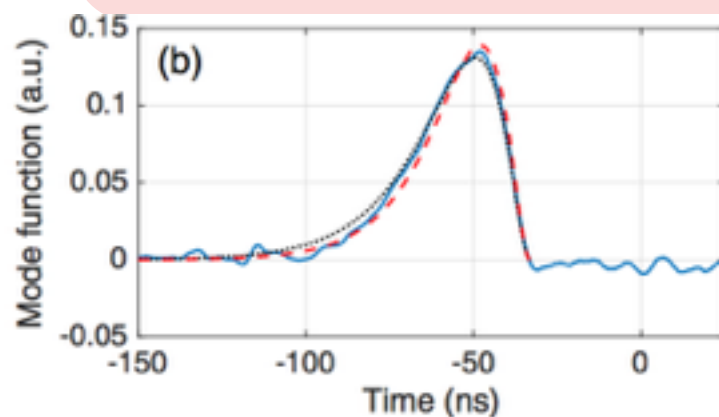
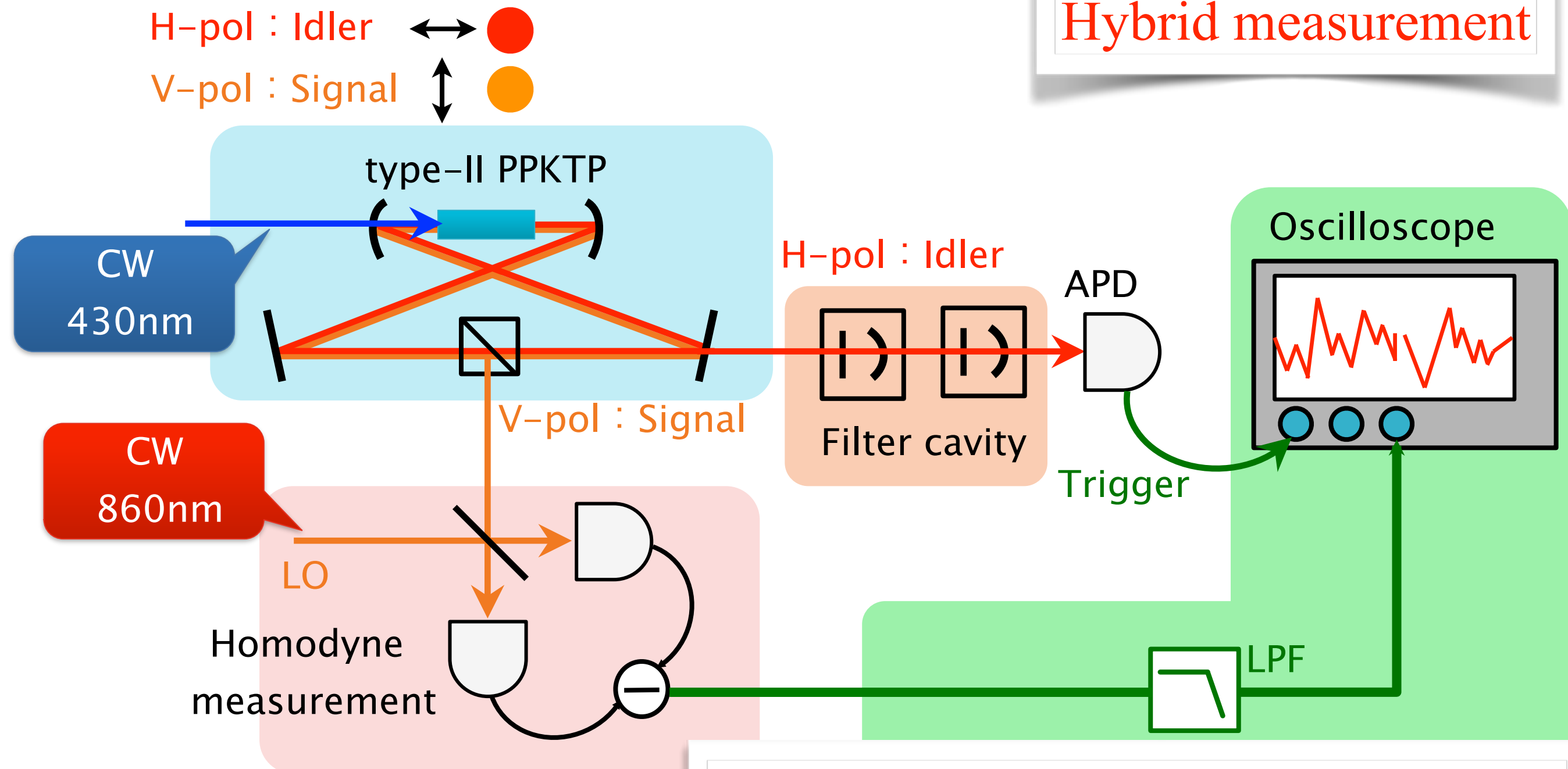
ut



**Time-varying
Hamiltonian!**

Real-time quadrature-amplitude measurement of single photons

Hybrid measurement



Continuous temporal-mode-matching

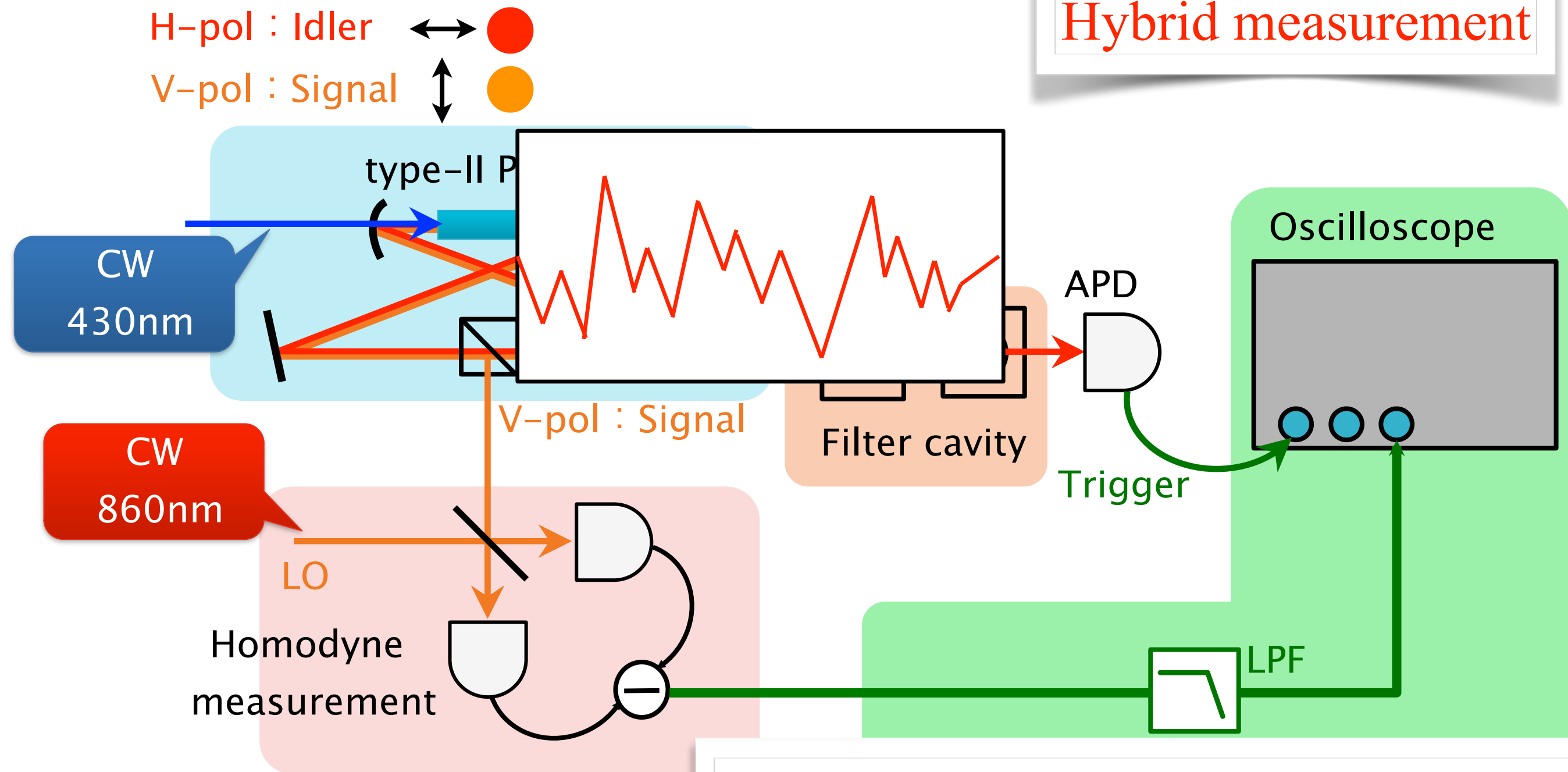
H. Ogawa, H. Ohdan, K. Miyata, M. Taguchi,
K. Makino, H. Yonezawa, J. Yoshikawa, A. Furusawa,
Real-Time Quadrature Measurement of a Single-Photon Wave Packet with Continuous Temporal-
Mode Matching

Phys. Rev. Lett. 116, 233602 (2016) Fig.2

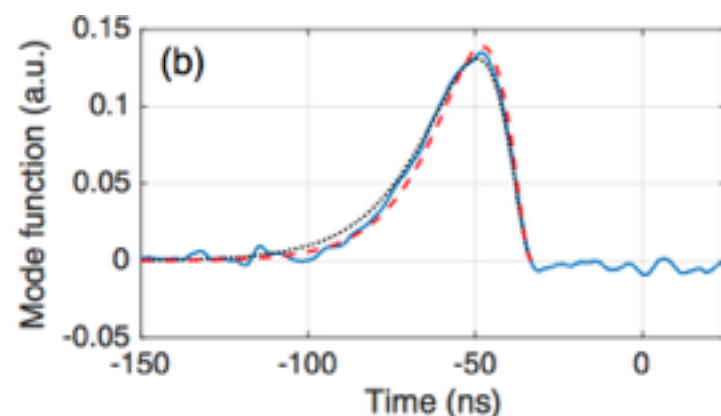
<https://journals.aps.org/prl/abstract/120160.1103/> (最終閲覧日: 2017年5月26日)

Real-time quadrature-amplitude measurement of single photons

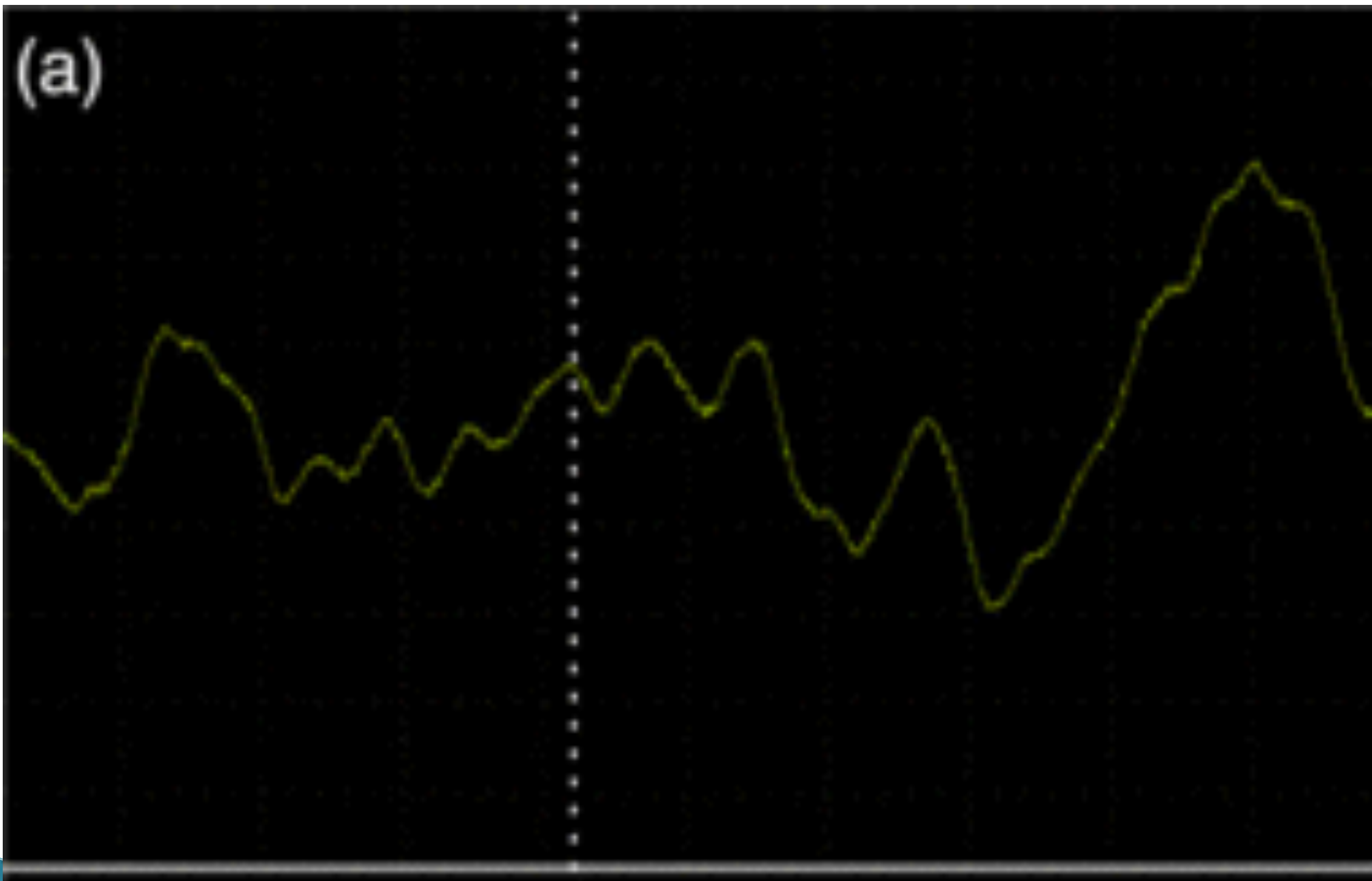
Hybrid measurement



Continuous temporal-mode-matching



H. Ogawa, H. Ohdan, K. Miyata, M. Taguchi,
K. Makino, H. Yonezawa, J. Yoshikawa, A. Furusawa,
Real-Time Quadrature Measurement of a Single-Photon Wave Packet with Continuous Temporal-
Mode Matching
Phys. Rev. Lett. 116, 233602 (2016) Fig.2
<https://journals.aps.org/prl/abstract/120160.1103/> (最終閲覧日: 2017年5月26日)

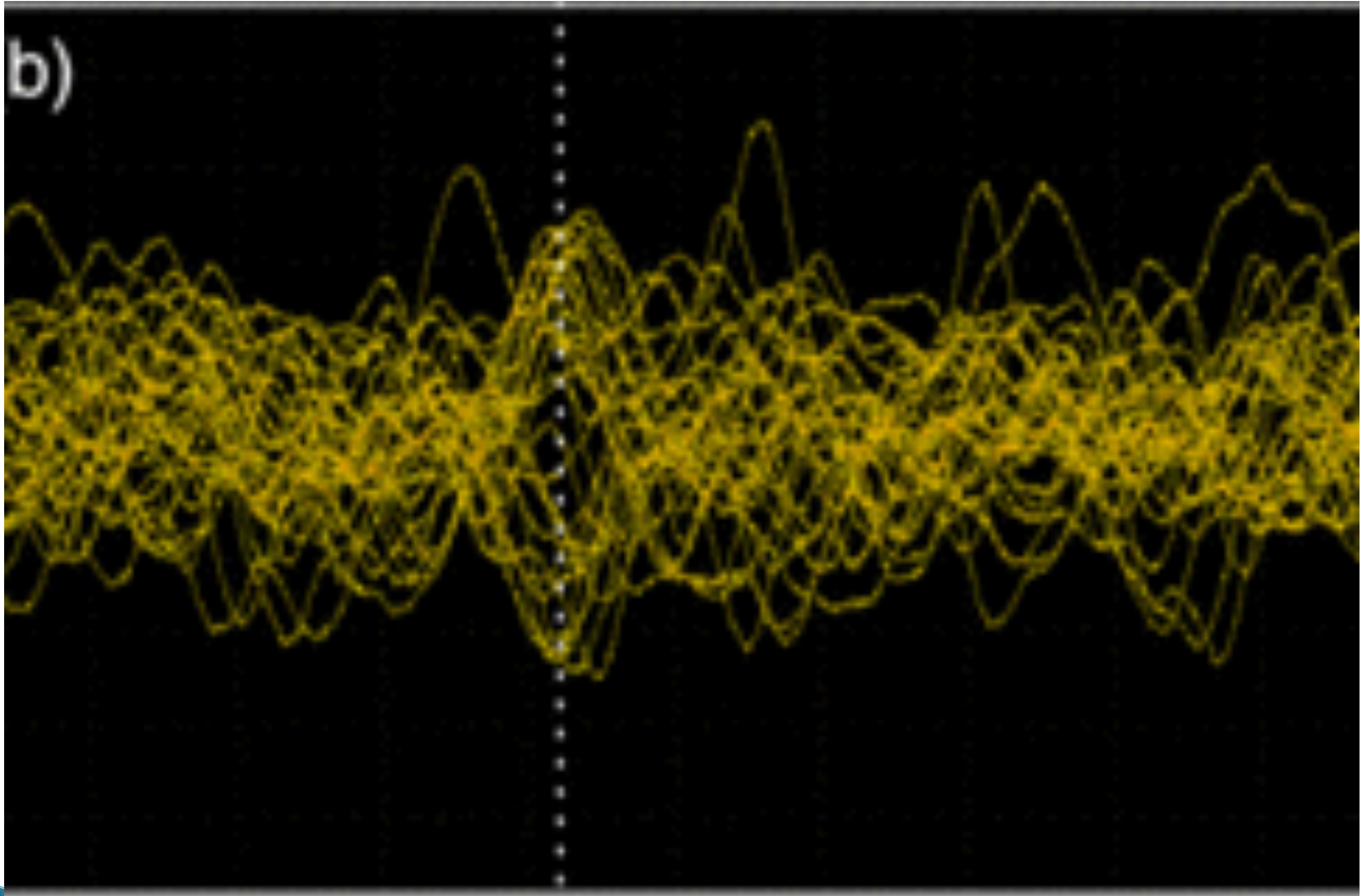


Real-Time Quadrature Measurement of a Single-Photon Wave Packet with Continuous Temporal-Mode Matching

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.233602>

Hisashi Ogawa, Hideaki Onodera, Kazunori Miyata, Masahiro Taguchi, Kenzo Makino, Hidehiro Yonezawa, Jun-ichi Yoshikawa, and Akira Furusawa
Phys. Rev. Lett. 116,233602 (2016)

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.233602> (最終閲覧日2017年5月26日)



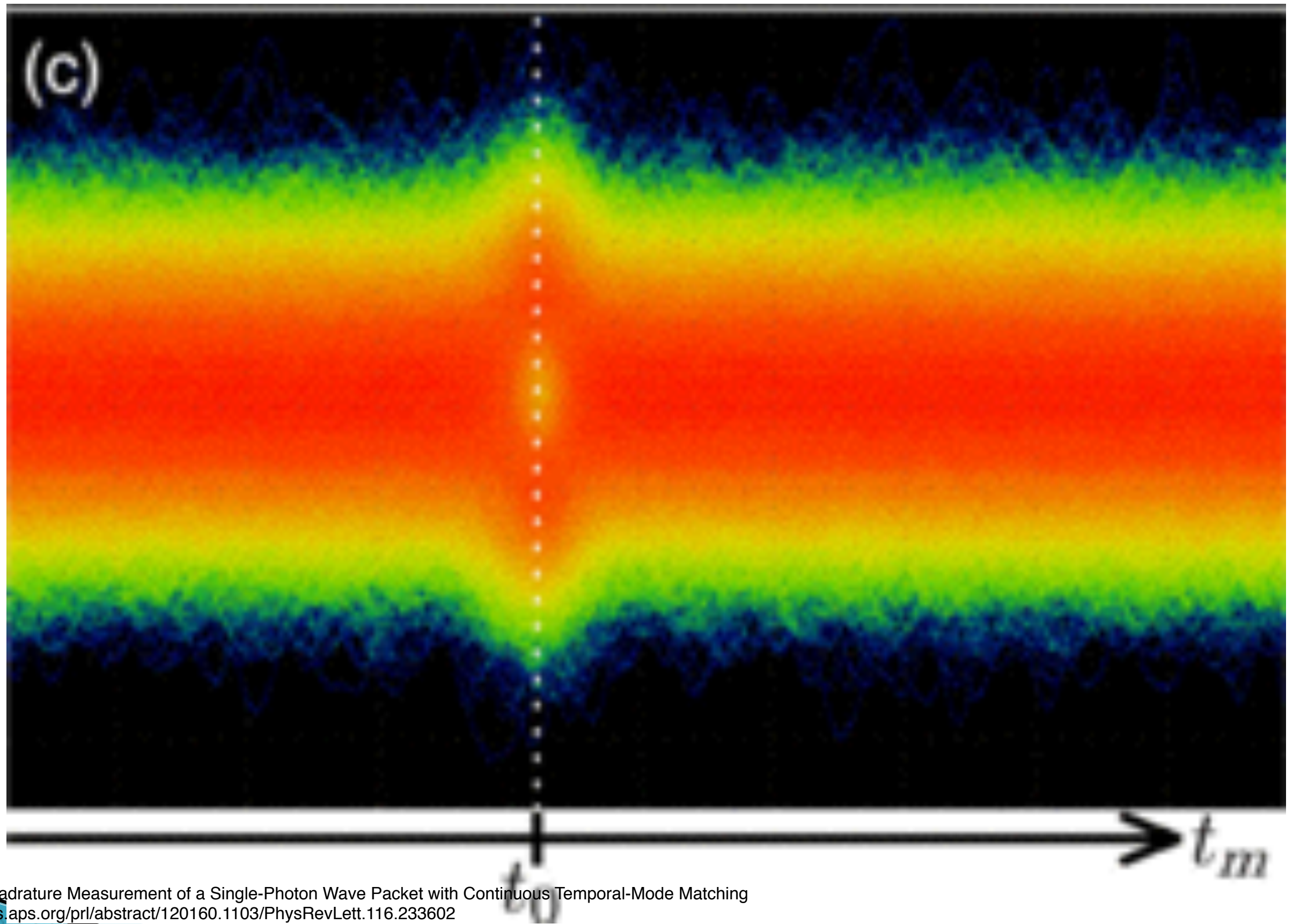
Real-Time Quadrature Measurement of a Single-Photon Wave Packet with Continuous Temporal-Mode Matching

<https://journals.aps.org/prl/abstract/120160.1103/PhysRevLett.116.233602>

Hisashi Ogawa, Hideaki Ohdan, Kazunori Miyata, Masahiro Taguchi, Kenzo Makino, Hidehiro Yonezawa, Jun-ichi Yoshikawa, and Akira Furusawa

Phys. Rev. Lett. 116,233602 (2016)

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.233602> (最終閲覧日2017年5月26日)



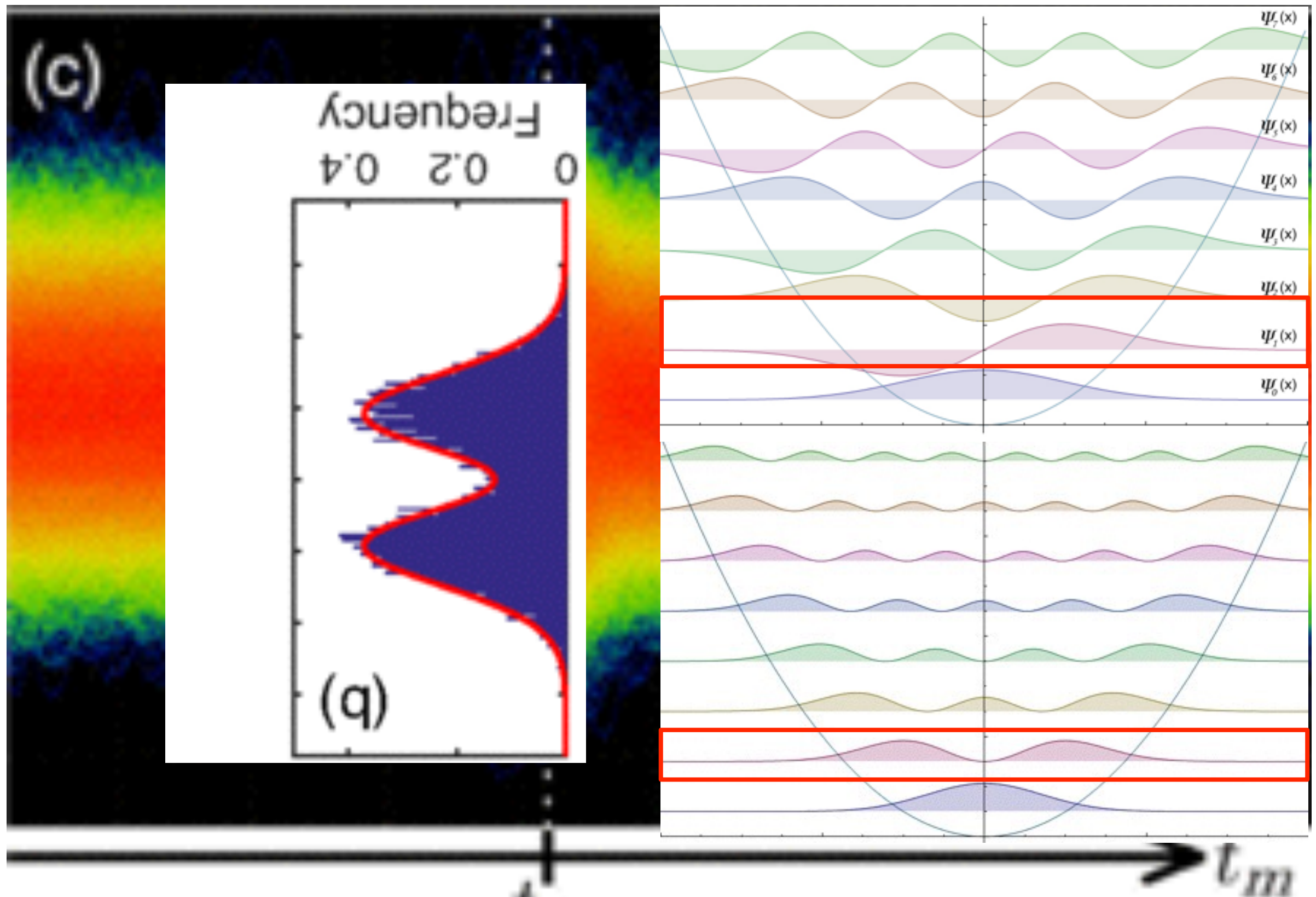
Real-Time Quadrature Measurement of a Single-Photon Wave Packet with Continuous Temporal-Mode Matching

<https://journals.aps.org/prl/abstract/120160.1103/PhysRevLett.116.233602>

Hisashi Ogawa, Hideaki Ono, Kazunori Miyata, Masahiro Taguchi, Kenzo Makino, Hidehiro Yonezawa, Jun-ichi Yoshikawa, and Akira Furusawa

Phys. Rev. Lett. 116,233602 (2016-11-11) Fig.3

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.233602> (最終閲覧日2017年5月26日)



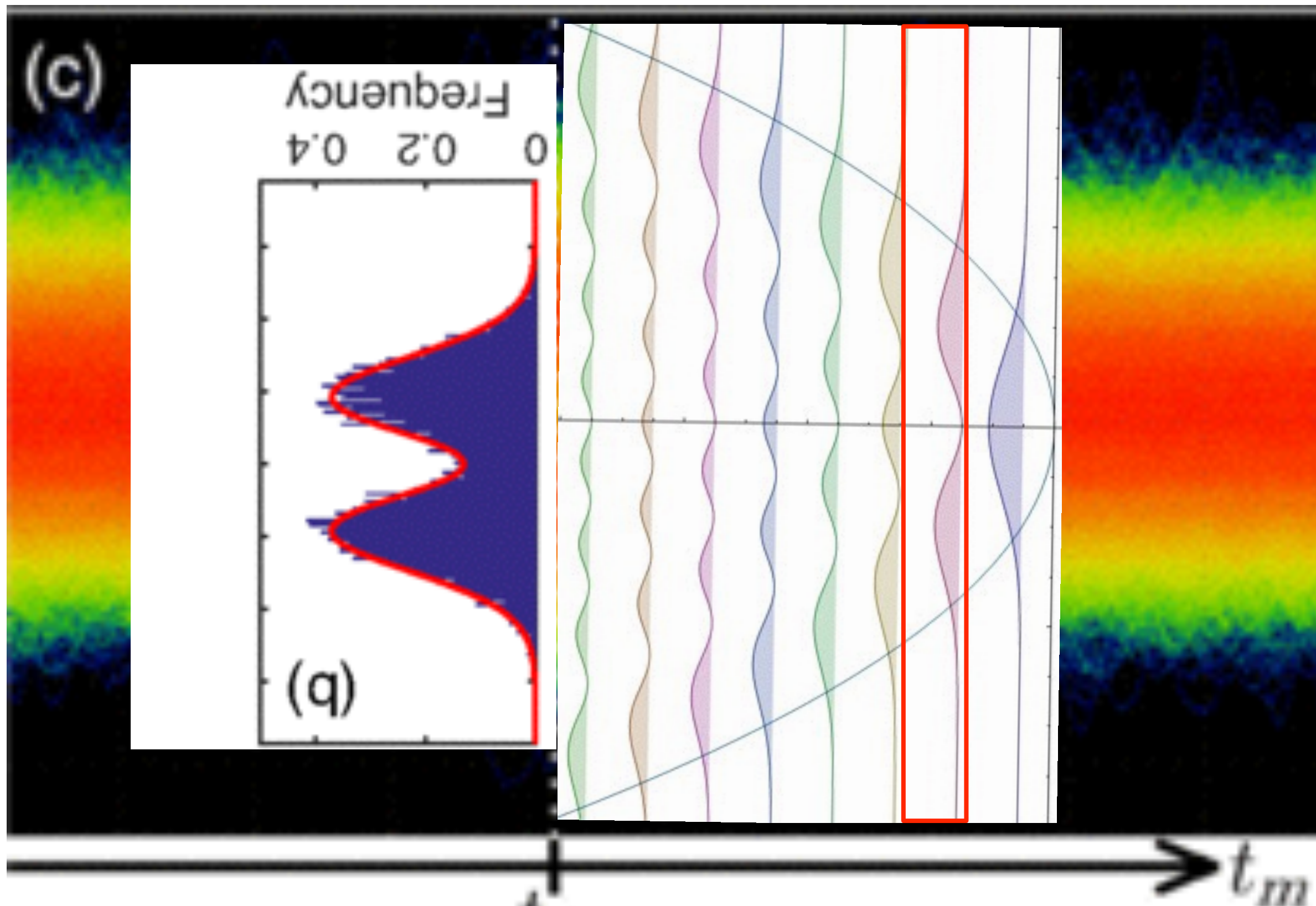
Real-Time Quadrature Measurement of a Single-Photon Wave Packet with Continuous Temporal-Mode Matching

<https://journals.aps.org/prl/abstract/120160.1103/PhysRevLett.116.233602>

Hisashi Ogawa, Hideaki Ohdan, Kazunori Miyata, Masahiro Taguchi, Kenzo Makino, Hidehiro Yonezawa, Jun-ichi Yoshikawa, and Akira Furusawa

Phys. Rev. Lett. 116,233602 (2016) Fig3, 4

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.233602> (最終閲覧日2017年5月26日)



Real-Time Quadrature Measurement of a Single-Photon Wave Packet with Continuous Temporal-Mode Matching

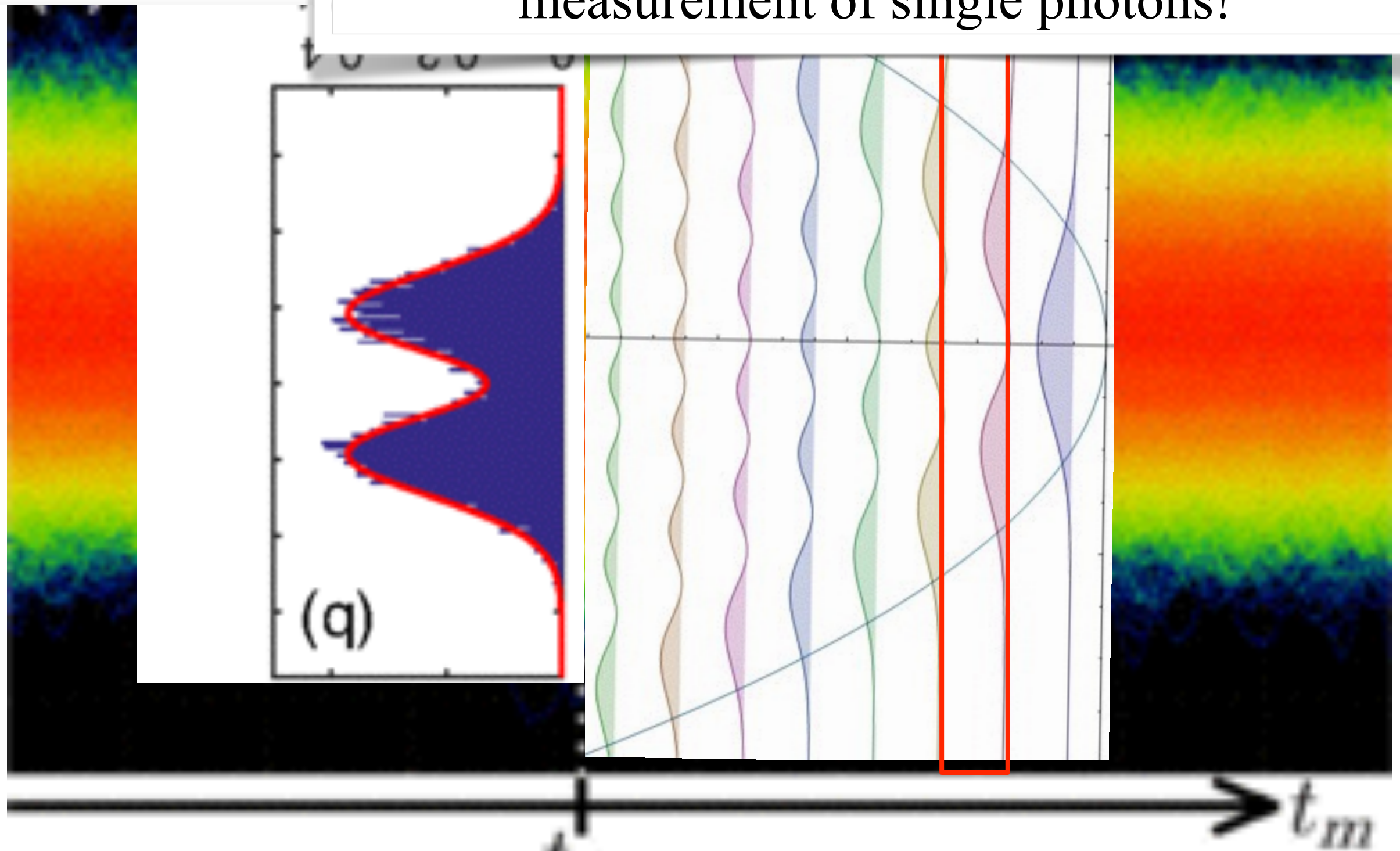
<https://journals.aps.org/prl/abstract/120160.1103/PhysRevLett.116.233602>

Hisashi Ogawa, Hideaki Ohdan, Kazunori Miyata, Masahiro Taguchi, Kenzo Makino, Hidehiro Yonezawa, Jun-ichi Yoshikawa, and Akira Furusawa
 Phys. Rev. Lett. 116,233602 (2016年) Fig3、 4

<https://journals.aps.org/prl/abstract/120160.1103/PhysRevLett.116.233602> (最終閲覧日2017年5月26日)



We can make a real-time quadrature-amplitude measurement of single photons!



Real-Time Quadrature Measurement of a Single-Photon Wave Packet with Continuous Temporal-Mode Matching

<https://journals.aps.org/prl/abstract/120160.1103/PhysRevLett.116.233602>

Hisashi Ogawa, Hideaki Ueda, Kazunori Miyata, Masahiro Taguchi, Kenzo Makino, Hidehiro Yonezawa, Jun-ichi Yoshikawa, and Akira Furusawa
Phys. Rev. Lett. 116,233602 (2016) Fig3, 4

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.233602> (最終閲覧日2017年5月26日)

UTokyo Graduate School of Science 学術俯瞰講義 2017 古澤明 [CC BY-NC-ND](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

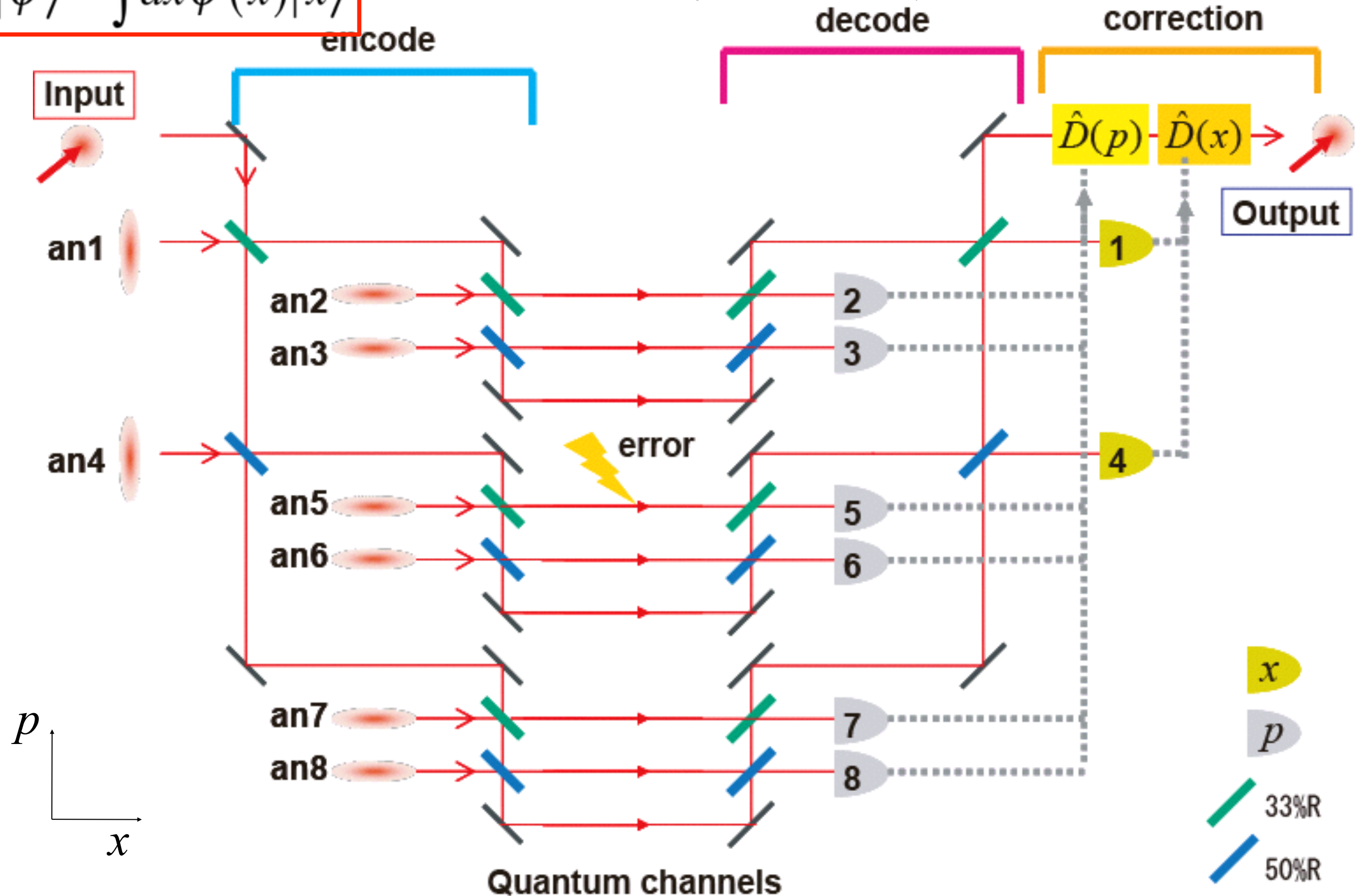
Quantum error correction with a 9-wavepacket code

$$|\psi\rangle = \int dx \psi(x) |x\rangle$$

Quantum error correction beyond qubits

Takao Aoki, Go Takahashi, Tadashi Kajiya, Jun-ichi Yoshikawa, Samuel L. Braunstein, Peter van Loock & Akira Furusawa

Nature Physics 5, 541 - 546 (2009) P541, fig1 <http://www.nature.com/nphys/journal/v5/n8/abs/nphys1309.html> (最終閲覧日：2017年5月26日)



Quantum error correction with a 9-wavepacket code

Quantum error correction beyond qubits
Takao Aoki, Go Takahashi, Tadashi Kajiya, Jun-ichi Yoshikawa, Samuel L. Braunstein, Peter van Loock & Akira Furusawa
Nature Physics 5, 541 - 546 (2009) P541, fig1 <http://www.nature.com/nphys/journal/v5/n8/abs/nphys1309.html>
(最終閲覧日: 2017年5月26日)

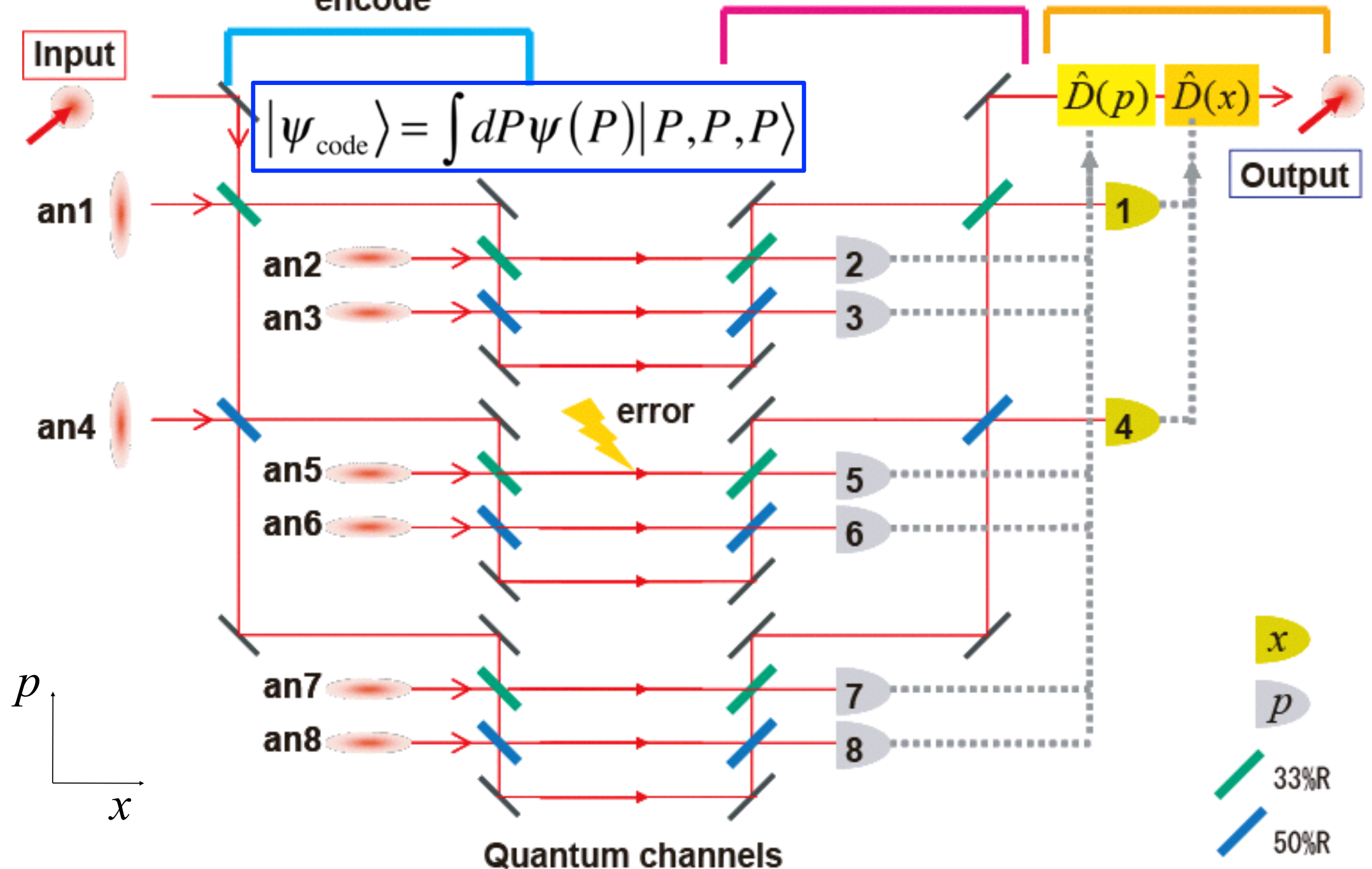
$$|\psi\rangle = \int dx \psi(x) |x\rangle$$

$$|P\rangle = \frac{1}{\pi} \int dx e^{2ixP} |x, x, x\rangle$$

encode

decode

correction

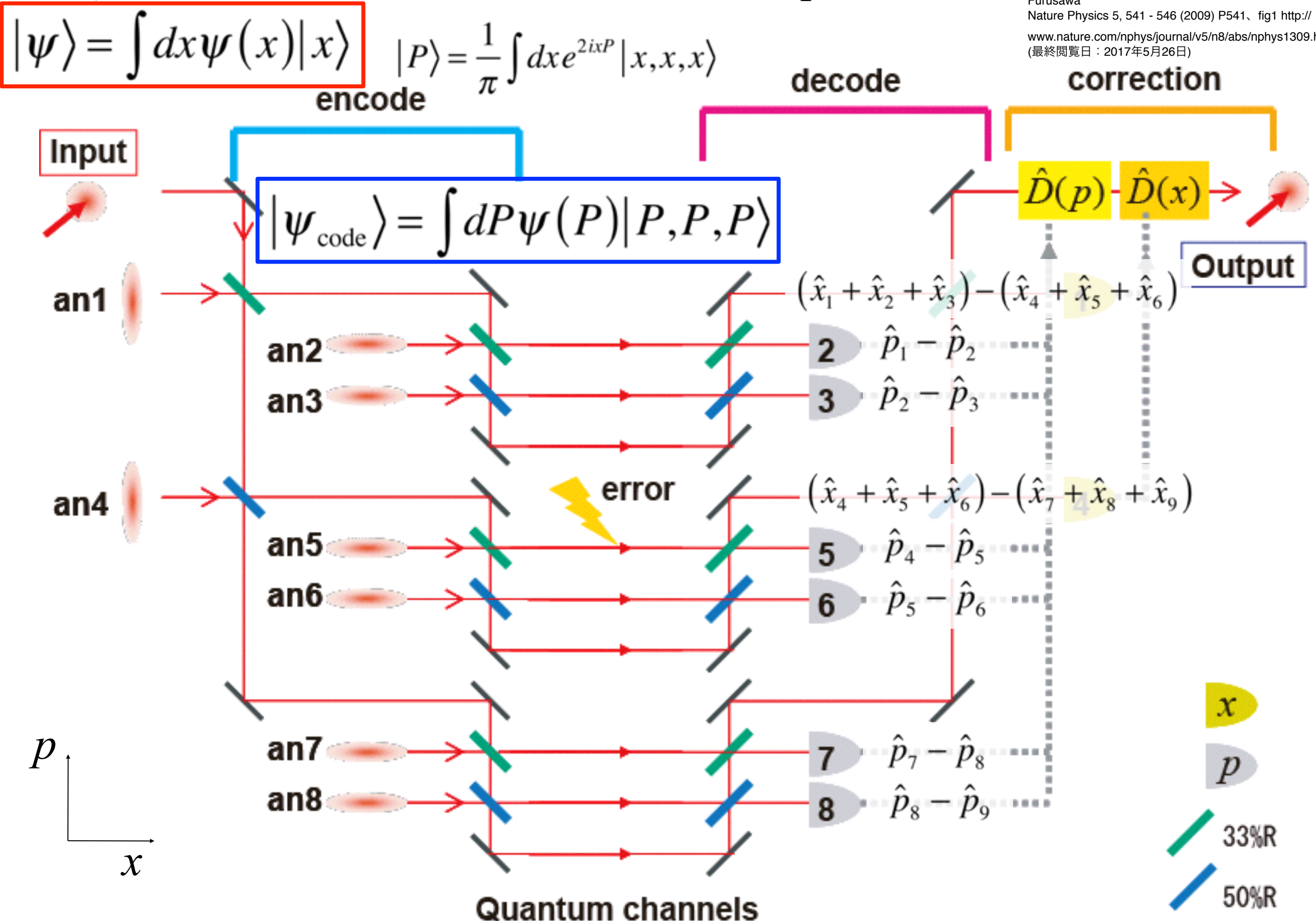


$$|\psi_{\text{code}}\rangle = \int dP \psi(P) |P, P, P\rangle$$

$$\hat{D}(p) \hat{D}(x)$$

Quantum error correction with a 9-wavepacket code

Quantum error correction beyond qubits
Takao Aoki, Go Takahashi, Tadashi Kajiya, Jun-ichi Yoshikawa, Samuel L. Braunstein, Peter van Loock & Akira Furusawa
Nature Physics 5, 541 - 546 (2009) P541, fig1 <http://www.nature.com/nphys/journal/v5/n8/abs/nphys1309.html>
(最終閲覧日: 2017年5月26日)

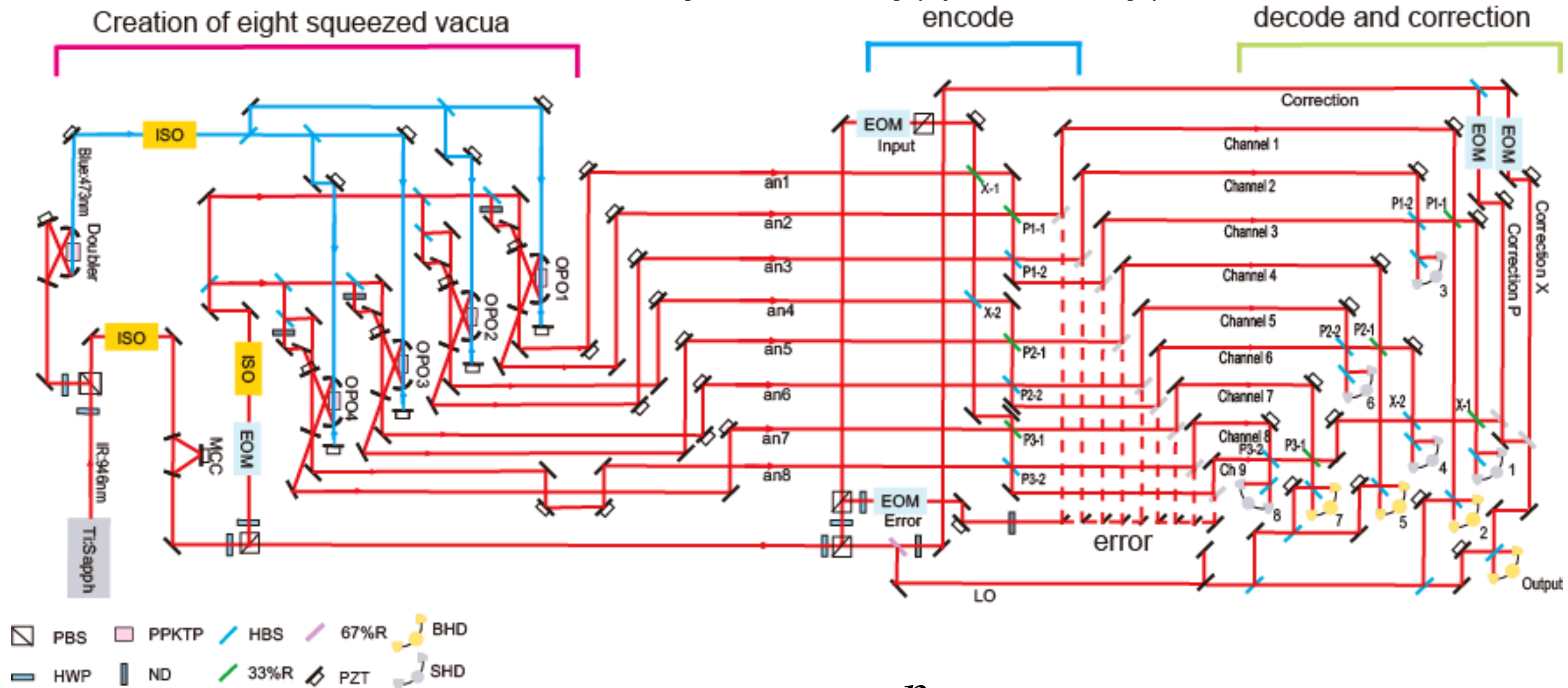


Experimental setup

Quantum error correction beyond qubits

T. Aoki, G. Takahashi, T. Kajiya, J. Yoshikawa, S. L. Braunstein, P. van Loock, and A. Furusawa,
Nature Physics 5, 541 (2009)P542、 Fig2

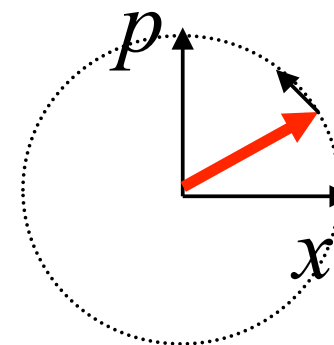
<http://www.nature.com/nphys/journal/v5/n8/abs/nphys1309.html> (最終閲覧日：2017年5月26日)



Input: a coherent state

squeezing: 1-2 dB

Error:



drifting displacement error

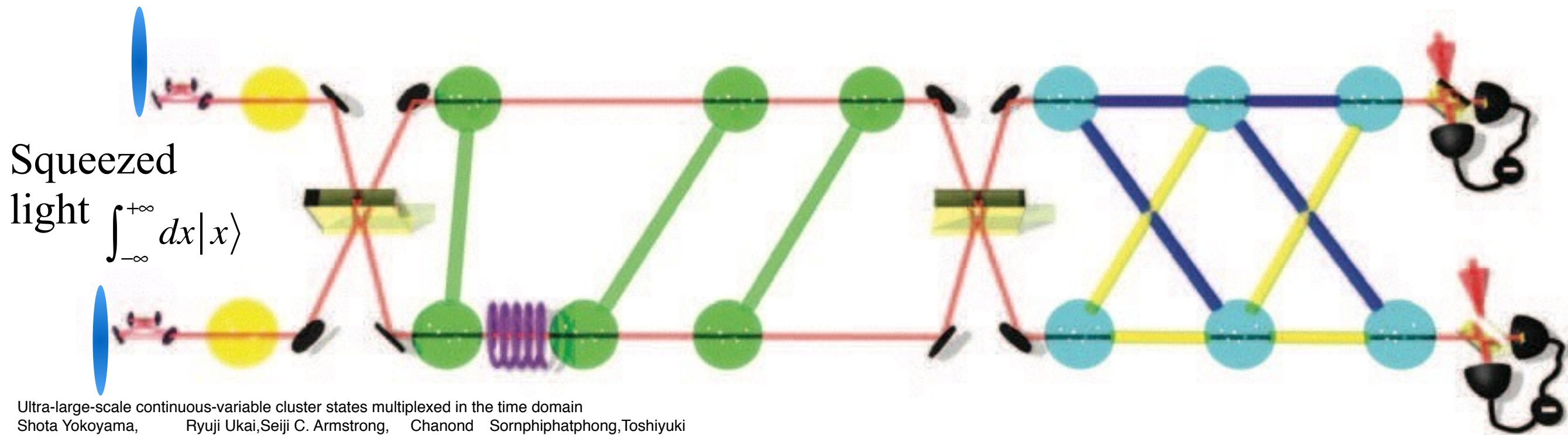
著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

書籍表紙

Akira Furusawa and Peter van Loock
Quantum Teleportation and Entanglement
A Hybrid Approach to Universal Quantum Information Processing
Wiley-VCH, 2011年

[http://www.wiley-vch.de/de?
option=com_eshop&view=product&isbn=9783527409303&title=Quantu
m%20Teleportation%20and%20Entanglement](http://www.wiley-vch.de/de?option=com_eshop&view=product&isbn=9783527409303&title=Quantum%20Teleportation%20and%20Entanglement)
[http://onlinelibrary.wiley.com/book/
10.1002/9783527635283;jsessionid=87DCF7A3B4FF643C0073A6F26
2B6A73F.f01t04](http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9783527635283;jsessionid=87DCF7A3B4FF643C0073A6F262B6A73F.f01t04)

Ultra-large-scale CV cluster state



Ultra-large-scale continuous-variable cluster states multiplexed in the time domain
Shota Yokoyama, Ryuji Ukai, Seiji C. Armstrong, Chanond Sornphiphatphong, Toshiyuki Kaji, Shigenari Suzuki, Jun-ichi Yoshikawa, Hidehiro Yonezawa, Nicolas C. Menicucci & Akira Furusawa
Nature Photonics 7, (2013), pp982–986
<http://www.nature.com/nphoton/journal/v7/n12/full/nphoton.2013.287.html>
Supplementary information
<https://www.nature.com/article-assets/npg/nphoton/journal/v7/n12/extref/nphoton.2013.287-s1.pdf>
P5, Fig S2

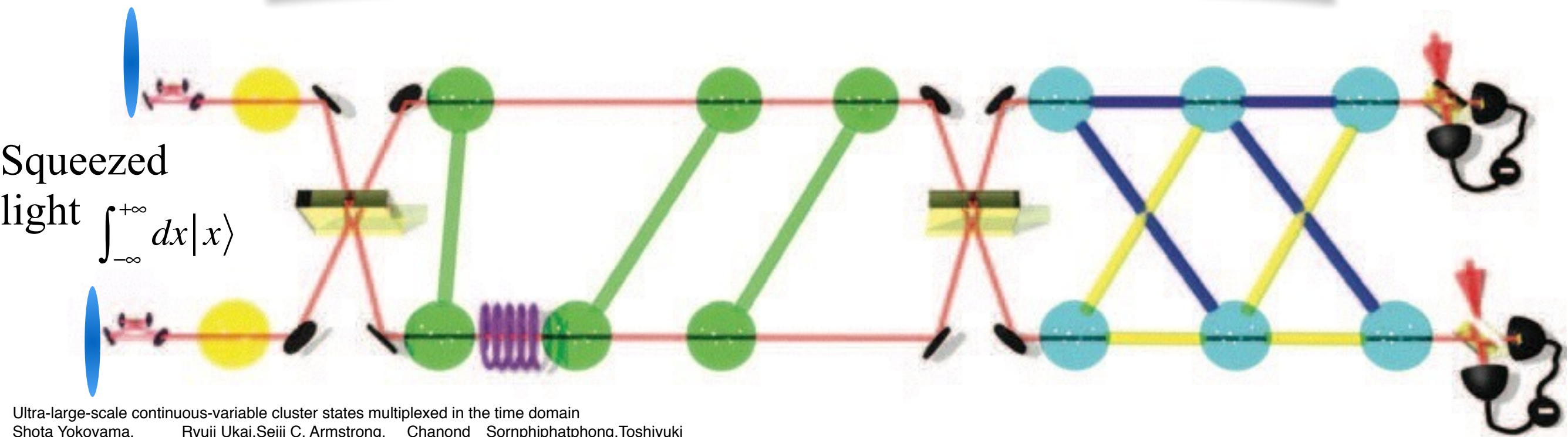
(最終閲覧日：2017年5月26日)

Unlimited time-domain multiplexing technology

One-million wave-packet entanglement!!

Ultra-large-scale continuous-variable cluster states multiplexed in the time domain
Shota Yokoyama, Ryuji Ukai, Seiji C. Armstrong, Chanond Sornphiphatphong, Toshiyuki Kaji, Shigenari Suzuki, Jun-ichi Yoshikawa, Hidehiro Yonezawa, Nicolas C. Menicucci & Akira Furusawa
Nature Photonics 7, (2013), pp982–986
<http://www.nature.com/nphoton/journal/v7/n12/full/nphoton.2013.287.html>
Supplementary information
<https://www.nature.com/article-assets/npg/nphoton/journal/v7/n12/extref/nphoton.2013.287-s1.pdf>
P5, Fig S2 (最終閲覧日：2017年5月26日)

Ultra-large-scale CV cluster state



Ultra-large-scale continuous-variable cluster states multiplexed in the time domain
 Shota Yokoyama, Ryuji Ukai, Seiji C. Armstrong, Chanond Sornphiphatphong, Toshiyuki Kaji, Shigenari Suzuki, Jun-ichi Yoshikawa, Hidehiro Yonezawa, Nicolas C. Menicucci & Akira Furusawa
 Nature Photonics 7, (2013), pp982–986
<http://www.nature.com/nphoton/journal/v7/n12/full/nphoton.2013.287.html>
 Supplementary information
<https://www.nature.com/article-assets/npg/nphoton/journal/v7/n12/extref/nphoton.2013.287-s1.pdf>
 P5, Fig S2

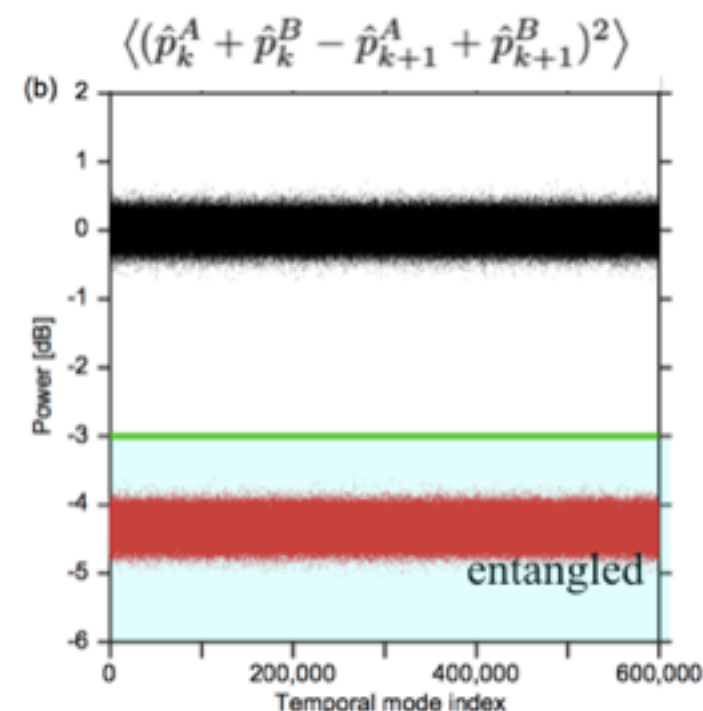
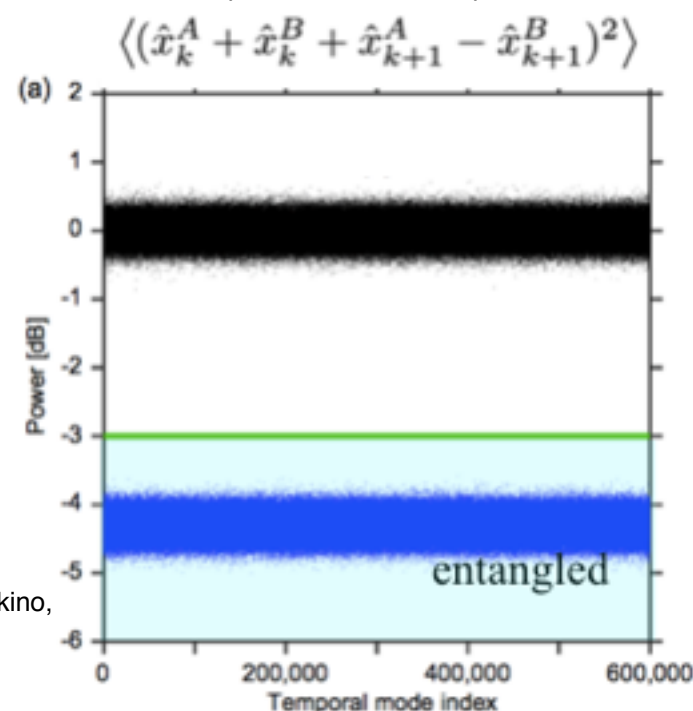
(最終閲覧日：2017年5月26日)

Unlimited

One-m

Generation of one-million-mode continuous-variable cluster state by unlimited time-domain multiplexing
 Jun-ichi Yoshikawa, Shota Yokoyama, Toshiyuki Kaji, Chanond Sornphiphatphong, Yu Shiozawa, Kenzo Makino, and Akira Furusawa
 APL Photonics 1, (2016) pp1-11
 P9, Fig7 CC BY 4.0

<http://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4962732>
 (最終閲覧日：2017年5月26日)



Technology

ent!!

