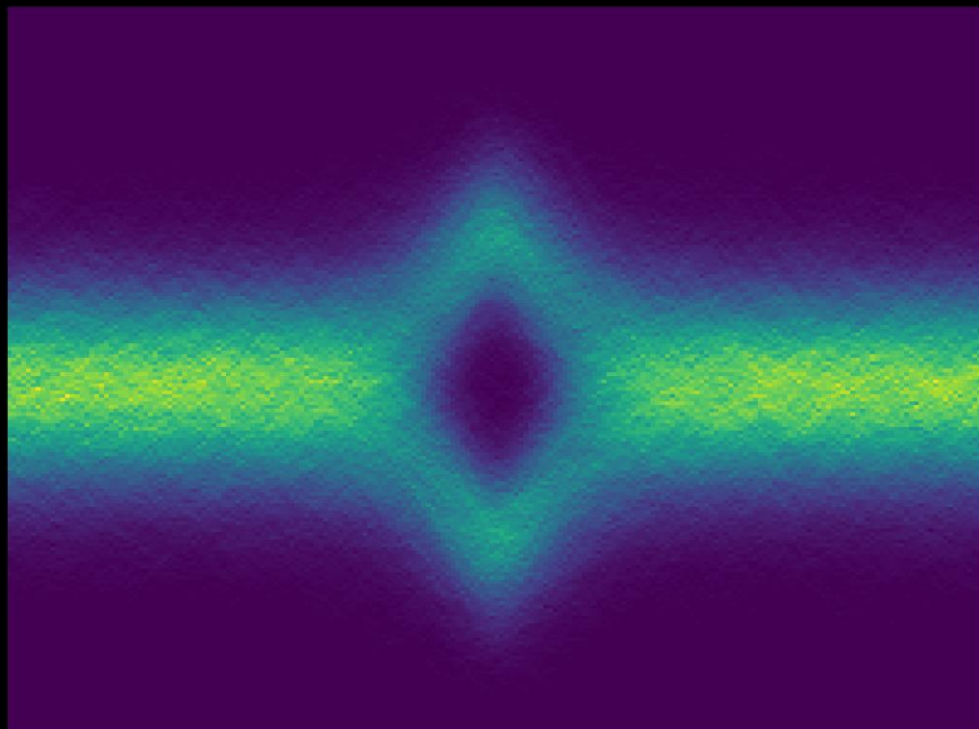
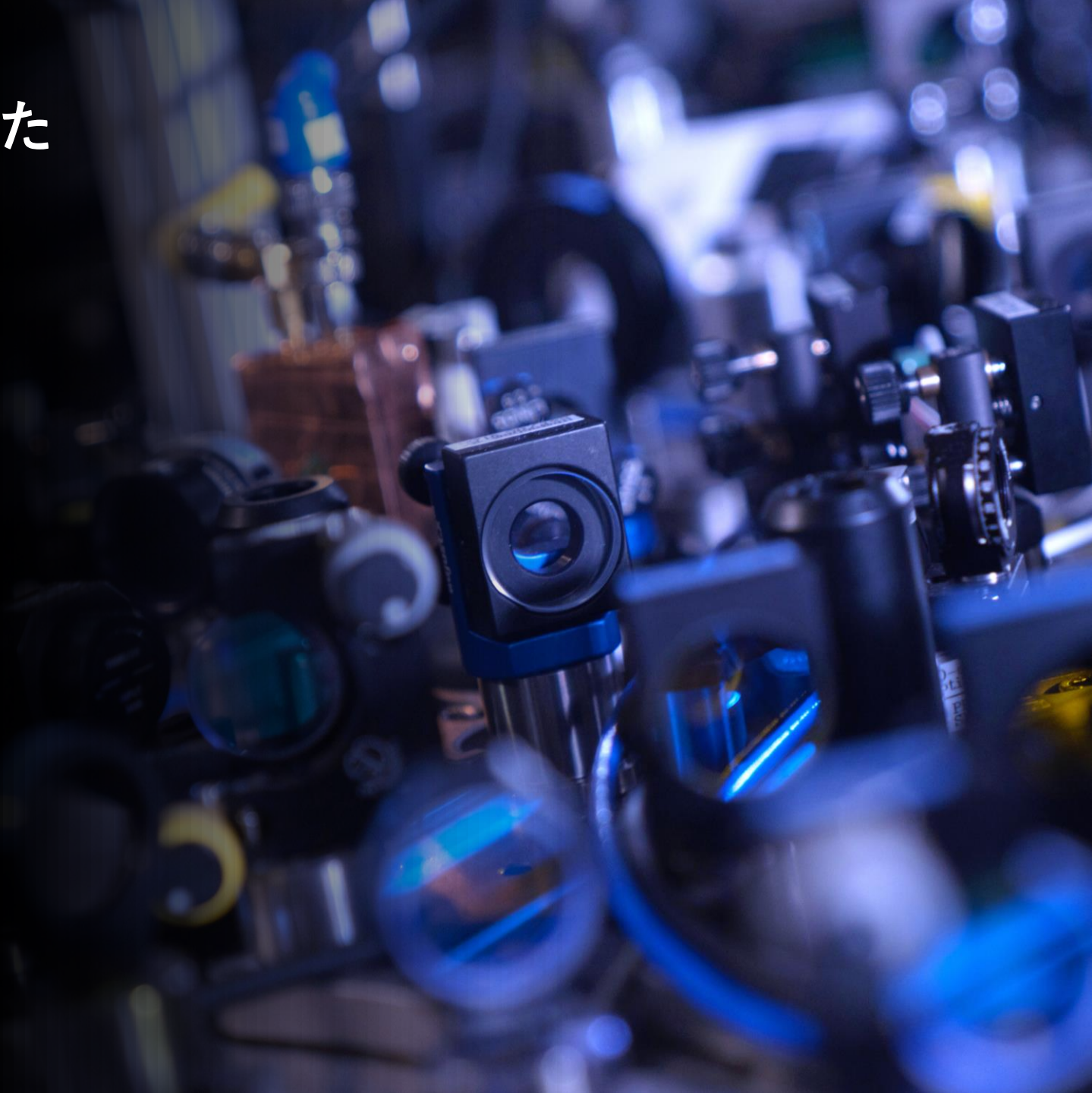


# 量子テレポーテーションを用いた 誤り耐性型光量子コンピュータ



東京大学, 理研RQC

高瀬 寛





Takase Kan  
高瀬 寛

兵庫県たつの市出身

2016 卒論生として古澤研に参加

2022 古澤研で博士号取得  
同研究室助教に着任  
理研RQC客員研究員

2024 (予定)株式会社OptQC 代表取締役

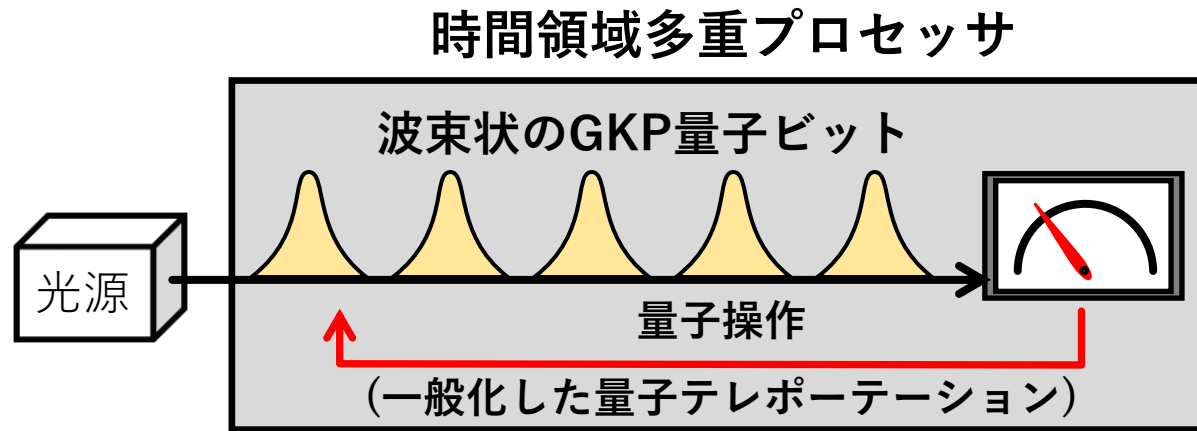
- ・ 年内に共同研究者向けに試作実機公開
- ・ 利活用に向けたコンソーシアム立ち上げ
- ・ 来年度中に商用1号機を一般公開





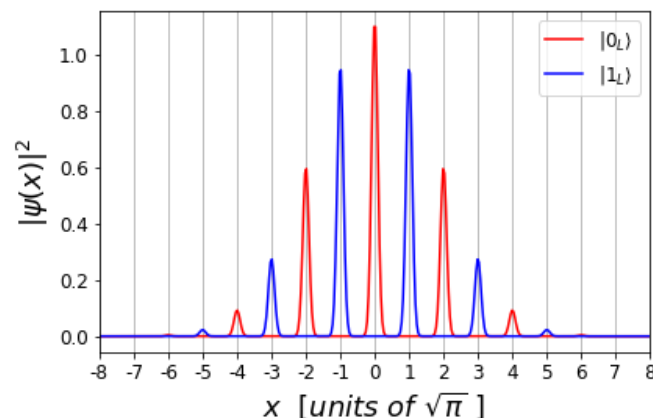


# 古澤研の方式：光パルス × 連続量量子計算



- 光のメリットが活かされている！
- ・コンパクトで配線は4本
  - ・常温常圧
  - ・高いクロック周波数

GKP量子ビット Phys. Rev. A **64**, 012310 (2001).



光量子コンピュータの難しさは  
GKP量子ビットの生成に詰まっている！

# 今日のトピック

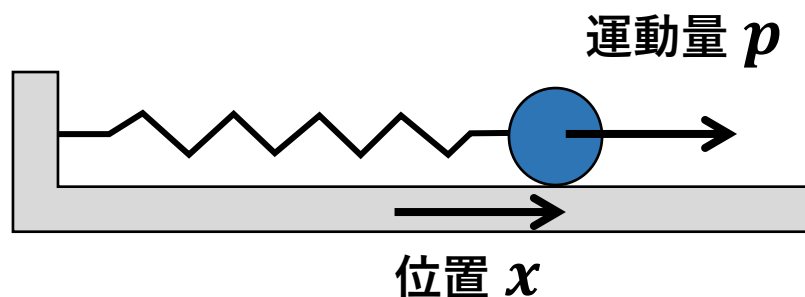
1. GKP量子ビットはどのような状態か？

2. GKP量子ビットをどうやって作るのか？

- ・ 伝令付き状態生成
- ・ 確率性をどう乗り越えるか？

# 連続量系：量子的な調和振動子

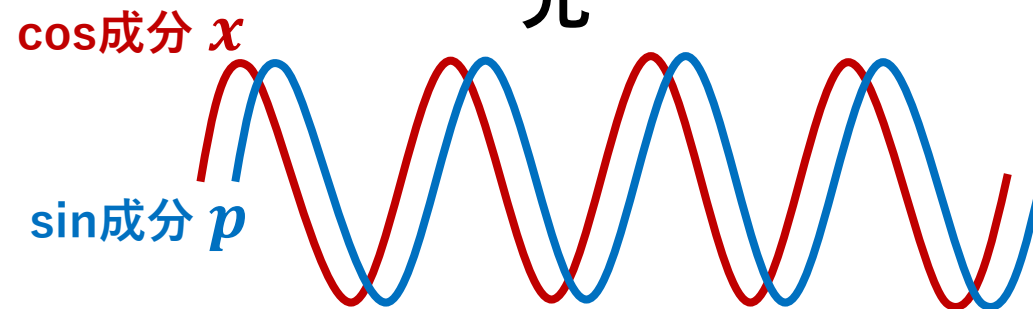
バネ振動



正準交換関係  $[x, p] = i$   
( $x, p$ の不確定性に関係)

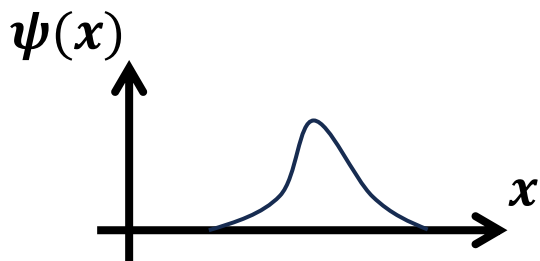
↔  
アナロジー

光



正準交換関係  $[x, p] = i$

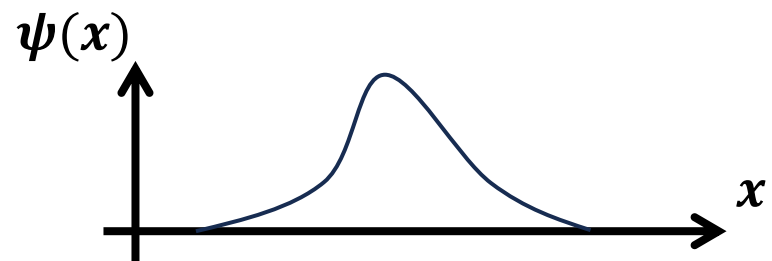
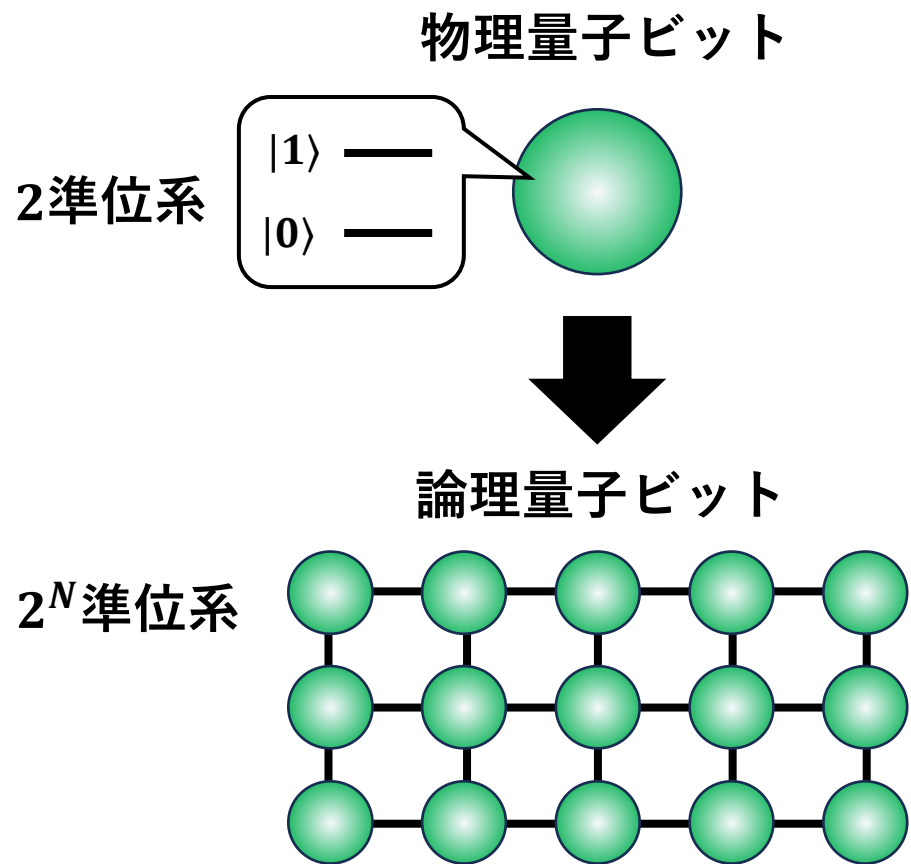
状態の表現は(当面)波動関数で行う



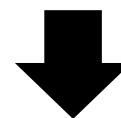
$\psi(x)$ は $x$ の確率密度関数

# 論理量子ビット

■ 論理量子ビットは多準位系にエンコードされる



連続量系はもともと無限次元系

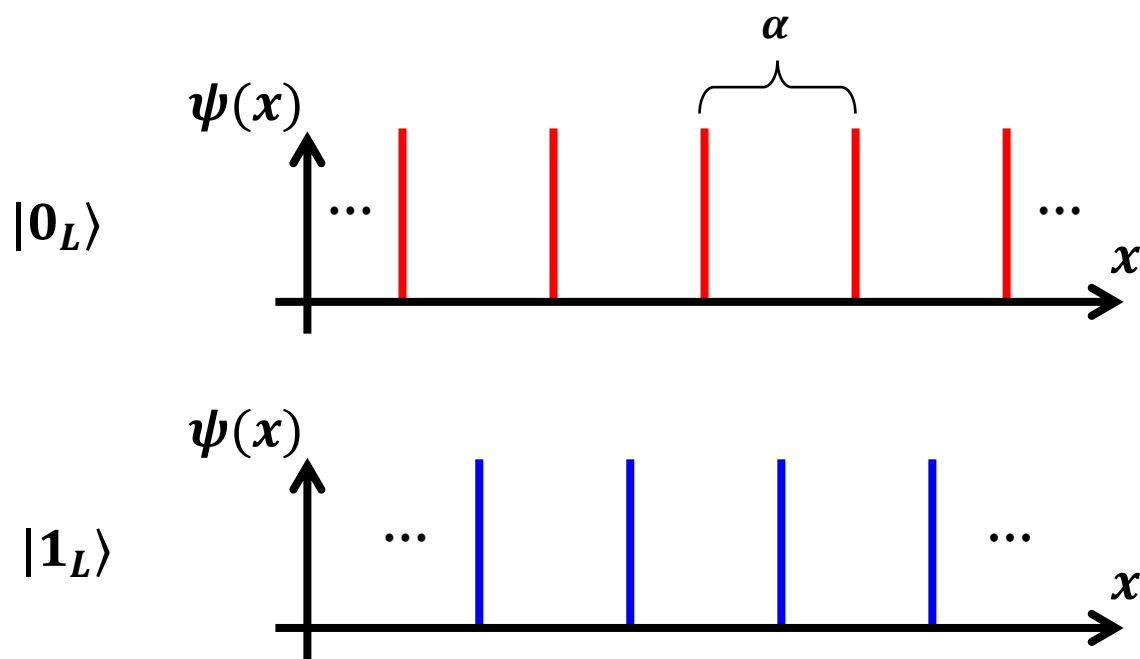


1モードで論理量子ビットを  
エンコードできる

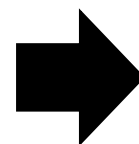
# Gottesman-Kitaev-Preskill量子ビット

Phys. Rev. A 64, 012310 (2001).

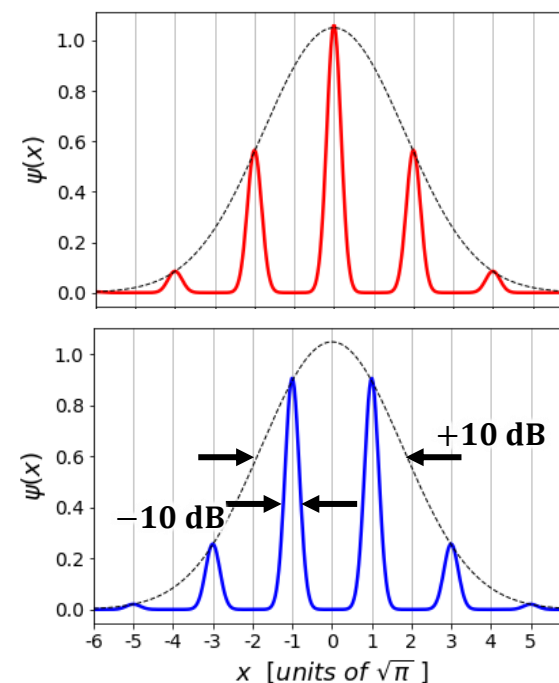
## ■ 1つの調和振動子で作る論理量子ビット



スタビライザーは  $e^{i \cdot \alpha p}, e^{i \cdot \alpha x}$   
大抵  $\alpha = 2\sqrt{\pi}, \sqrt{2\pi}$  の場合を議論する



有限エネルギーで近似



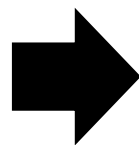
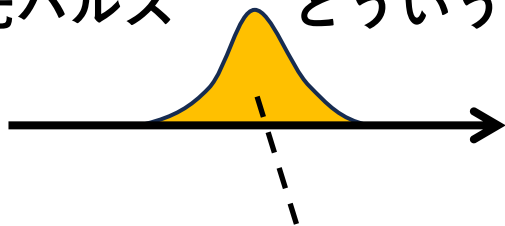
(真空場に比べて)10 dBの分散達成が目標

K. Fukui et al., PRX 8, 021054 (2018).

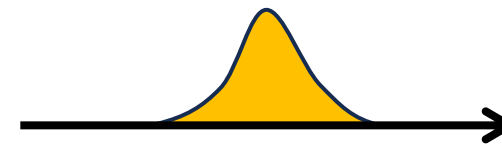
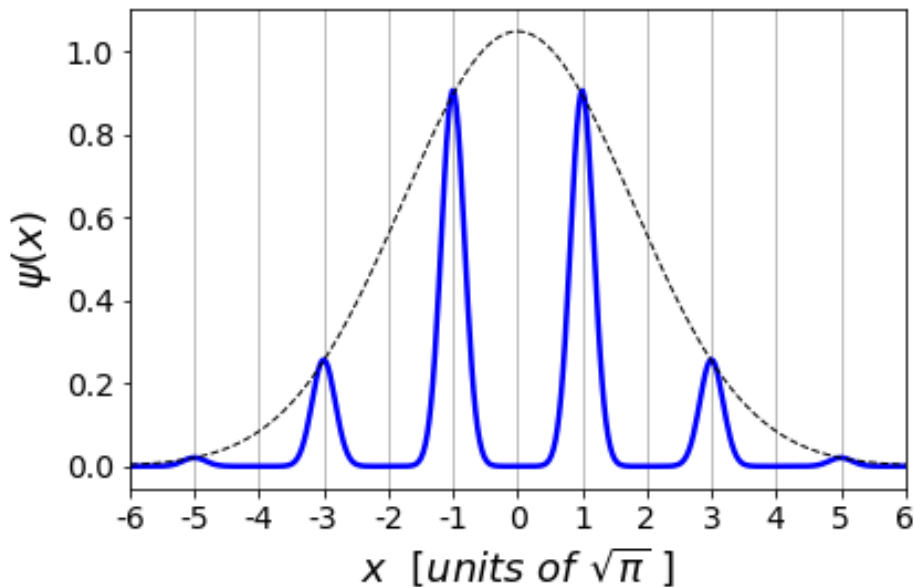


# GKP量子ビットの物理的直観

光パルス どのような状態？



異なる振幅のパルスの重ね合わせ



||

⋮

振幅  $3\sqrt{\pi}$



+

振幅  $\sqrt{\pi}$



振幅  $-\sqrt{\pi}$

+



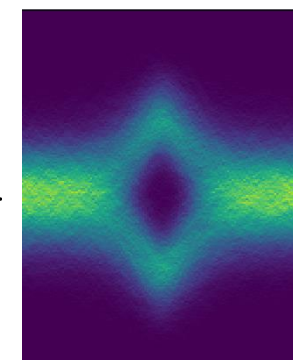
振幅  $-3\sqrt{\pi}$

+



⋮

シュレディンガーの猫状態



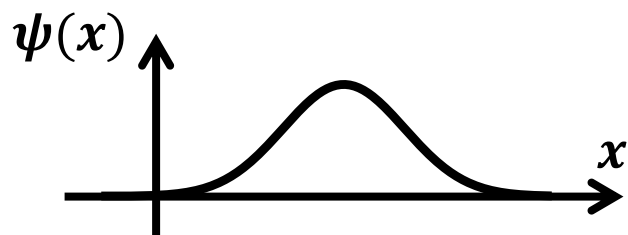
# 今日のトピック

1. GKP量子ビットはどのような状態か？
2. GKP量子ビットをどうやって作るのか？
  - ・ 伝令付き状態生成
  - ・ 確率性をどう乗り越えるか？

# 非ガウス型状態の光パルスは生成が難しい

## ガウス型状態

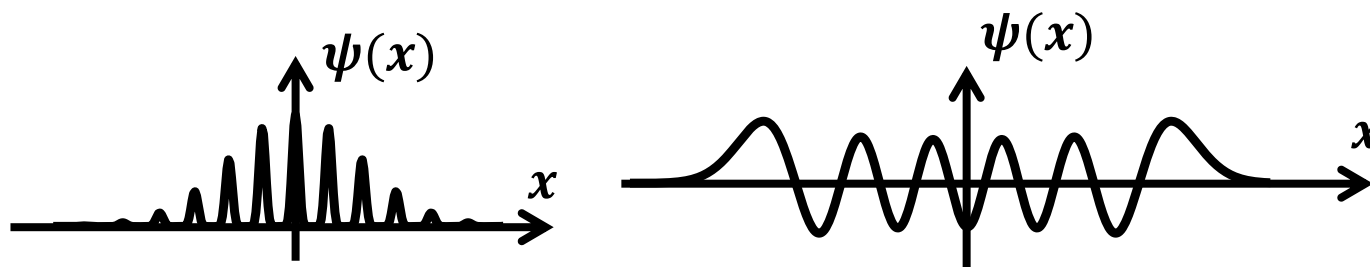
波動関数が単項のガウス関数の状態  
真空状態、コヒーレント状態、スクイーズド状態、...



✓決定論的に作れる(確率1)

## 非ガウス型状態

波動関数が単項のガウス関数でない状態  
GKP状態、光子数状態、シュレディンガーの猫状態、...



×決定論的な生成が非常に難しい

量子ドット Nat. Nanotechnol. **12**, 1026 (2017).  
共振器QED Nat. Photonics **13**, 110 (2019).  
3次以上の非線形光学効果 PRX Quantum **4**, 010333 (2023).

確率的に非ガウス型状態に変換する  
(伝令付き状態生成)

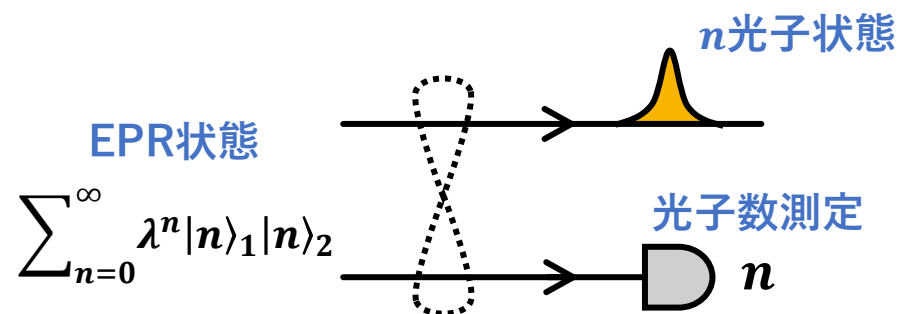
✓高純度な状態を比較的容易に生成できる



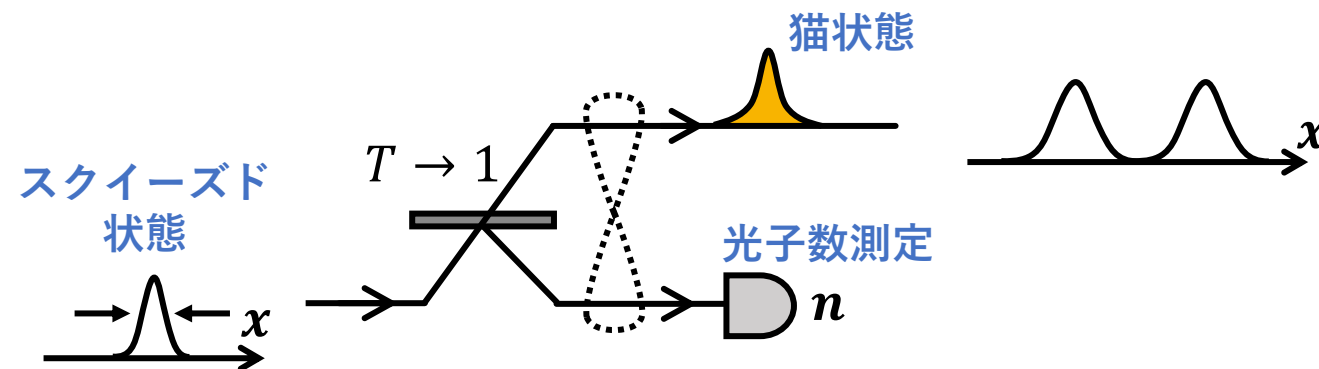
# 伝令付き状態生成

量子もつれ状態の部分系を測定し、残りの部分系に所望の状態を生成する手法

## 例1) 光子数状態の生成



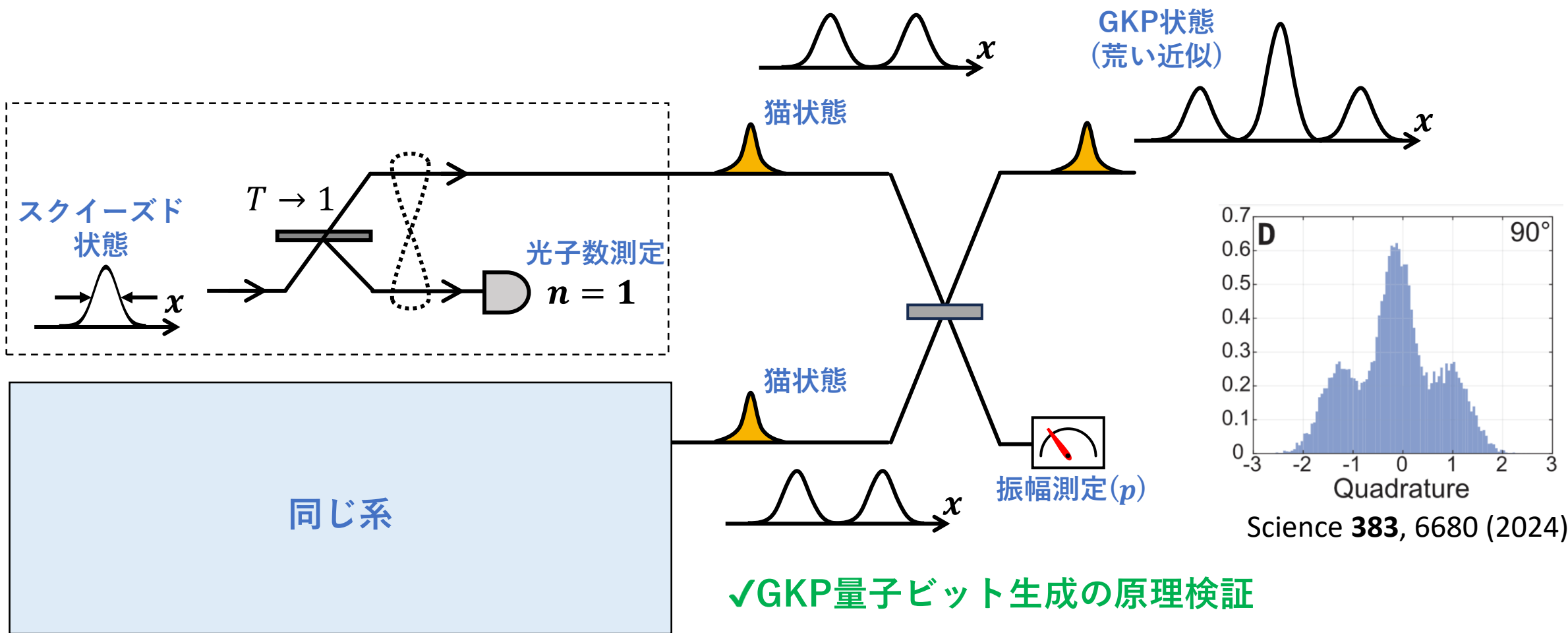
## 例2) シュレディンガーの猫状態の生成



光子数測定器の強い非古典性を取り出す手法といえる

# GKP生成の先行手法：cat breeding

Phys. Rev. A **97**, 022341 (2018).

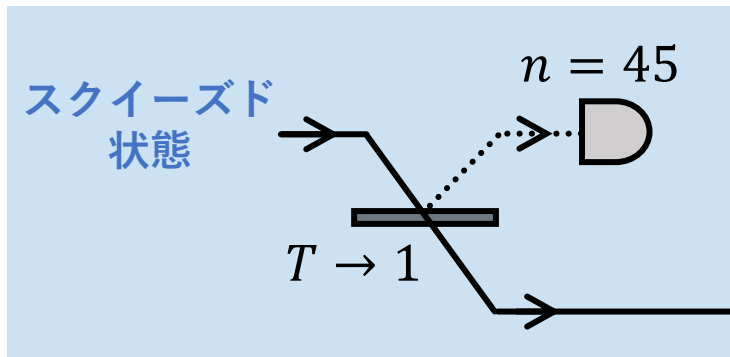


✓GKP量子ビット生成の原理検証

×初等的な状態なのにすでに生成レートが低い

試行レート $\sim 10$  MHz, 成功確率 $\sim 10^{-7}$ , 生成レート $\sim 1$  Hz

# Cat breedingの課題

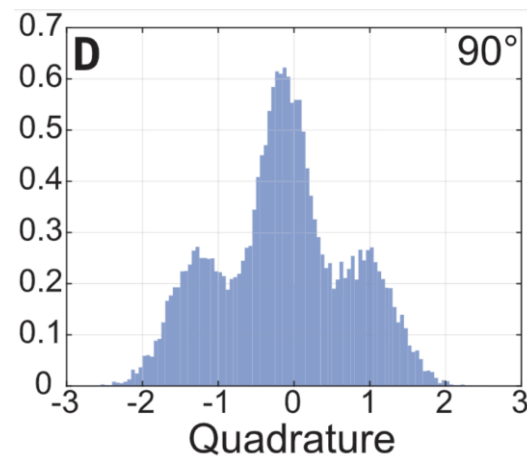


$n = 45$

$n = 45$

$n = 45$

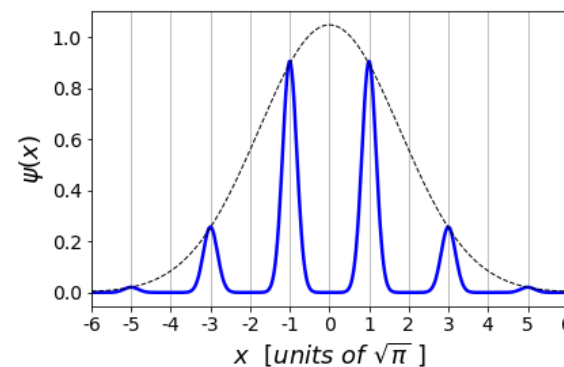
$n = 45$



Science **383**, 6680 (2024)

総検出光子数  $n_{total} = 2$   
生成レート ~1 Hz

総検出光子数  $n_{total} = 225$   
生成レート ~??? Hz



成功確率は  $n_{total}$  に対して指数的に減少  
とてもじゃないが実験できない

変位操作

振幅測定 ( $p$ )



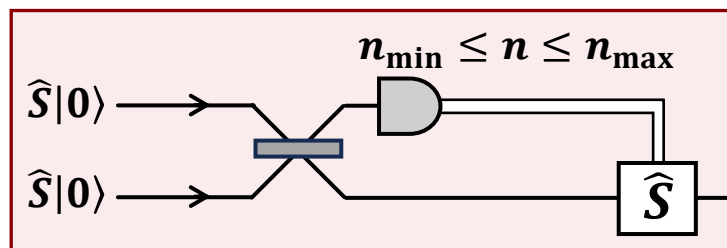
# 今日のトピック

1. GKP量子ビットはどのような状態か？
2. GKP量子ビットをどうやって作るのか？
  - ・ 伝令付き状態生成
  - ・ 確率性をどう乗り越えるか？

# 動的なbreeding protocol

K. Takase, arXiv:2401.07287 [quant-ph]

## Adaptive generalized photon subtraction



K. Takase, PRA **103**, 013710 (2021)

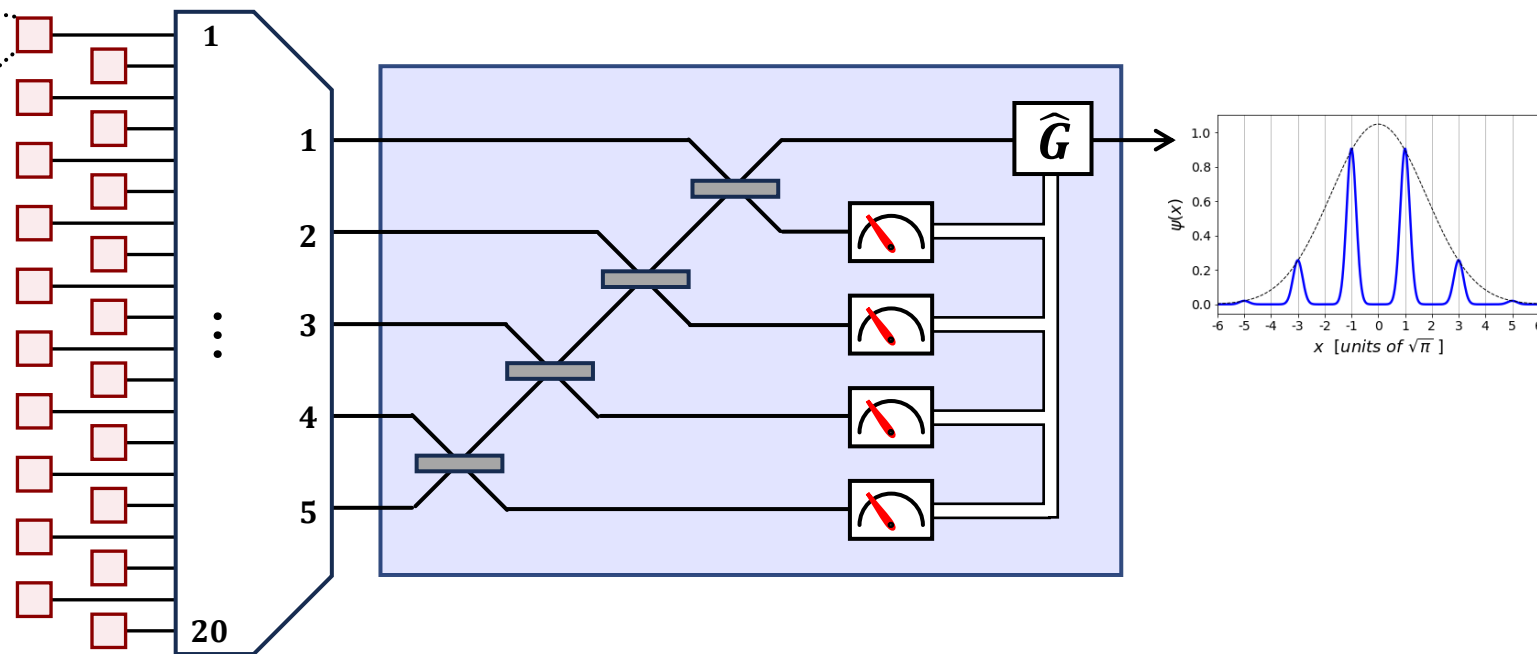
- ✓ 少ない検出光子数でGKP生成
- ✓ 様々な光子検出イベントを許容



原理的には成功確率 1  
確率性を排除！

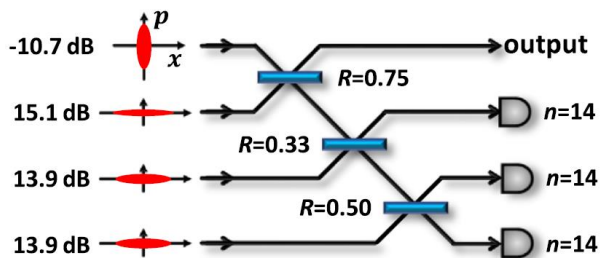


将来的に到達できそうな仮定 ( $n_{max} = 20$ , スクイーミング 20 dB, 並列度 20)  
成功確率 = 10%, 生成レートは 1 MHz を超える



# GKP量子ビットをよく近似する波動関数

## ■ Gaussian breeding

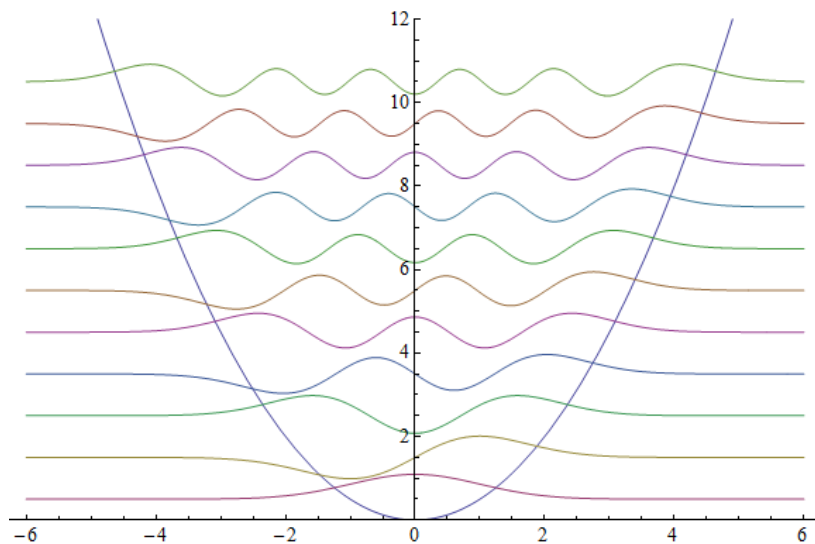


K. Takase, npj Quantum Information **9**, 98 (2023)

この研究を通じた発見

$$\phi_0(x) \cdot (\phi_n(x))^N \approx \text{GKP qubits}$$

$\phi_n(x) = \langle x|n \rangle$  は  $n$  光子状態の波動関数

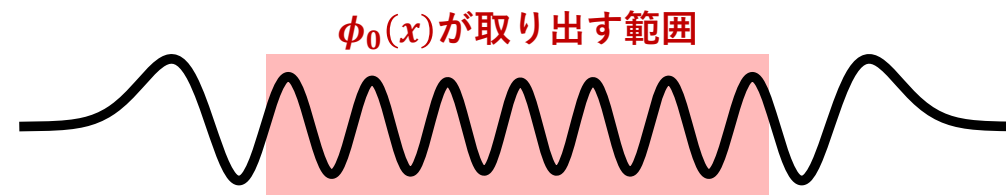
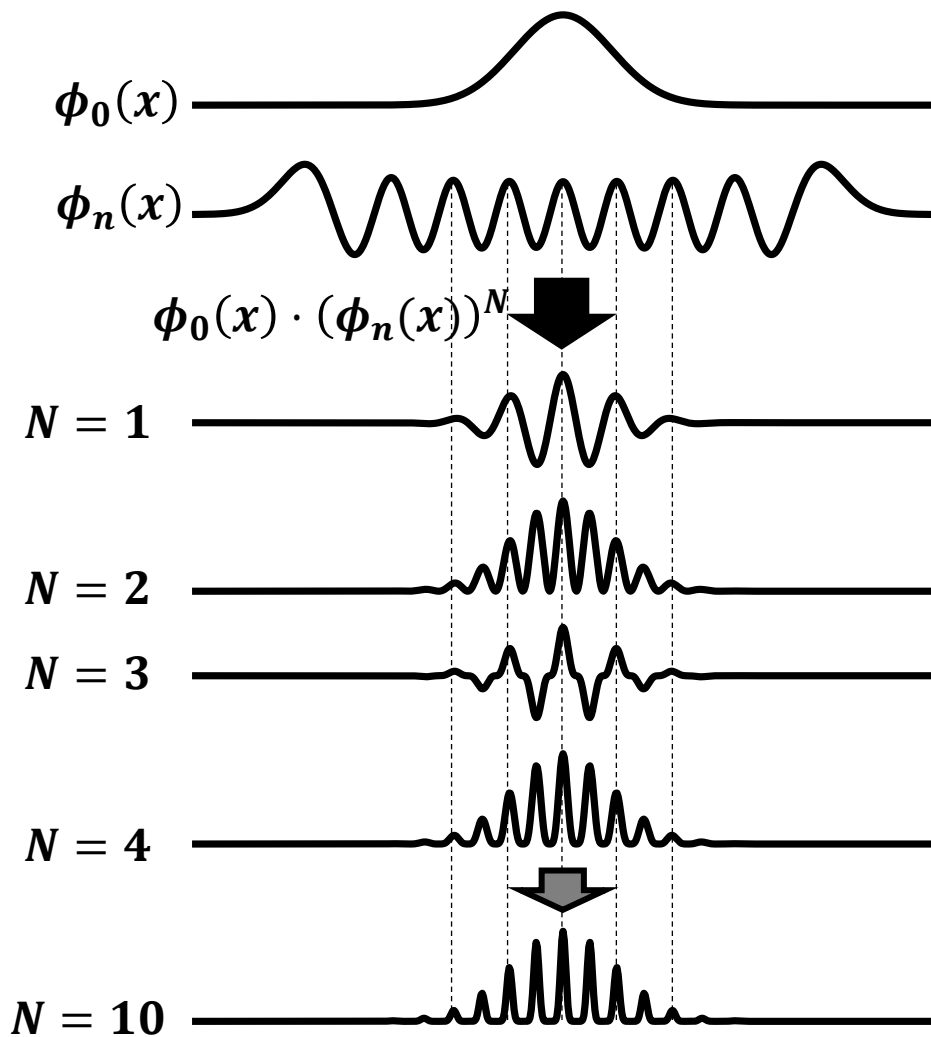


ほんとにGKPになる？



# GKP量子ビットをよく近似する波動関数

■  $\phi_0(x) \cdot (\phi_n(x))^N$        $\phi_n(x) = \langle x|n\rangle$



WKB  
 $\approx \cos\left(\sqrt{2n+1}x - \frac{n\pi}{2}\right)$

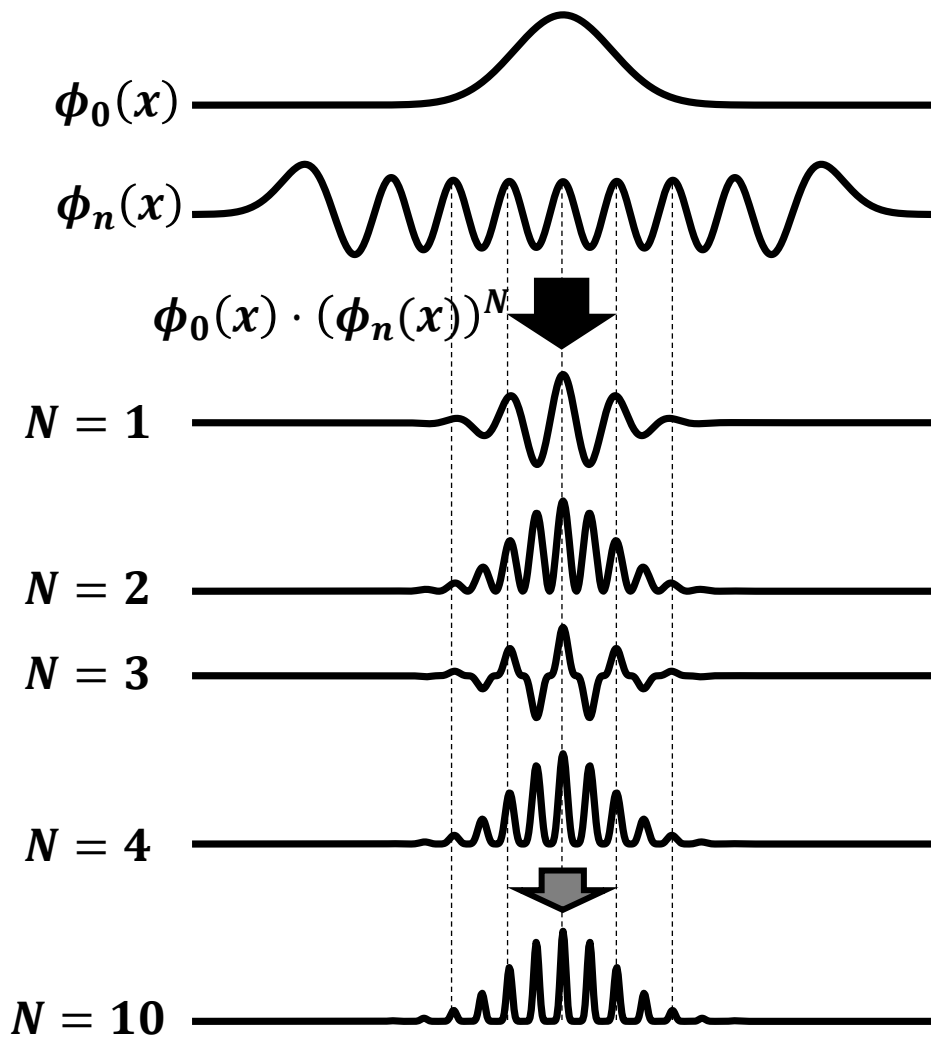
➡ GKP量子ビットの周期性に対応

10 dBのスケーリングを実現するには

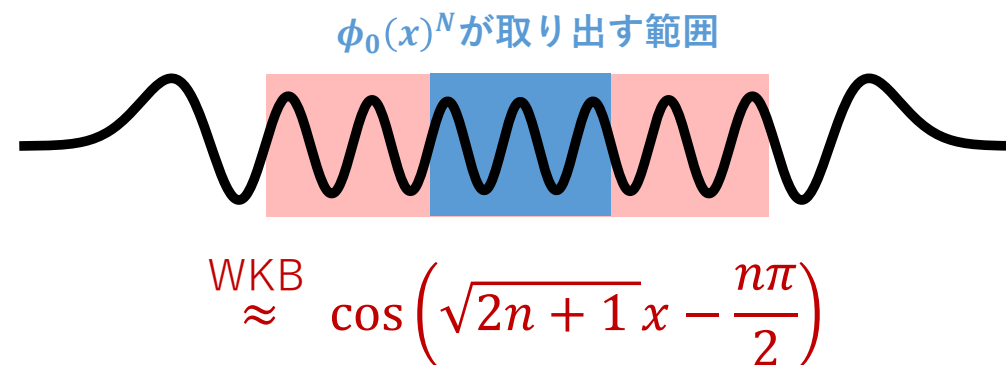
$$N \geq 5, n \geq 8$$

# GKP量子ビットをよく近似する波動関数

■  $\phi_0(x) \cdot (\phi_n(x))^N$        $\phi_n(x) = \langle x|n \rangle$



Cat breedingは  $\phi_0(x)^N \cdot (\phi_n(x))^N$  を生成

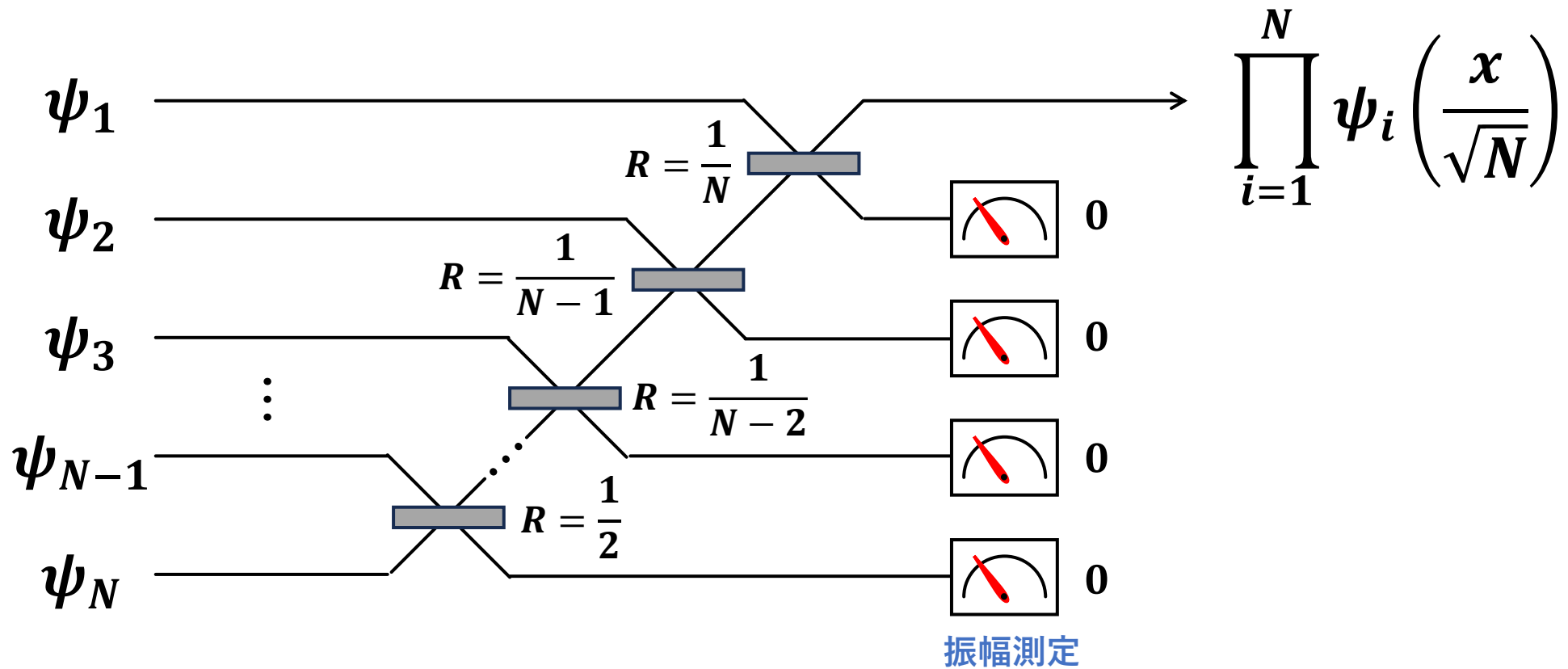


10 dBのスケーリングを実現するには

$N \geq 5, n \geq 8$

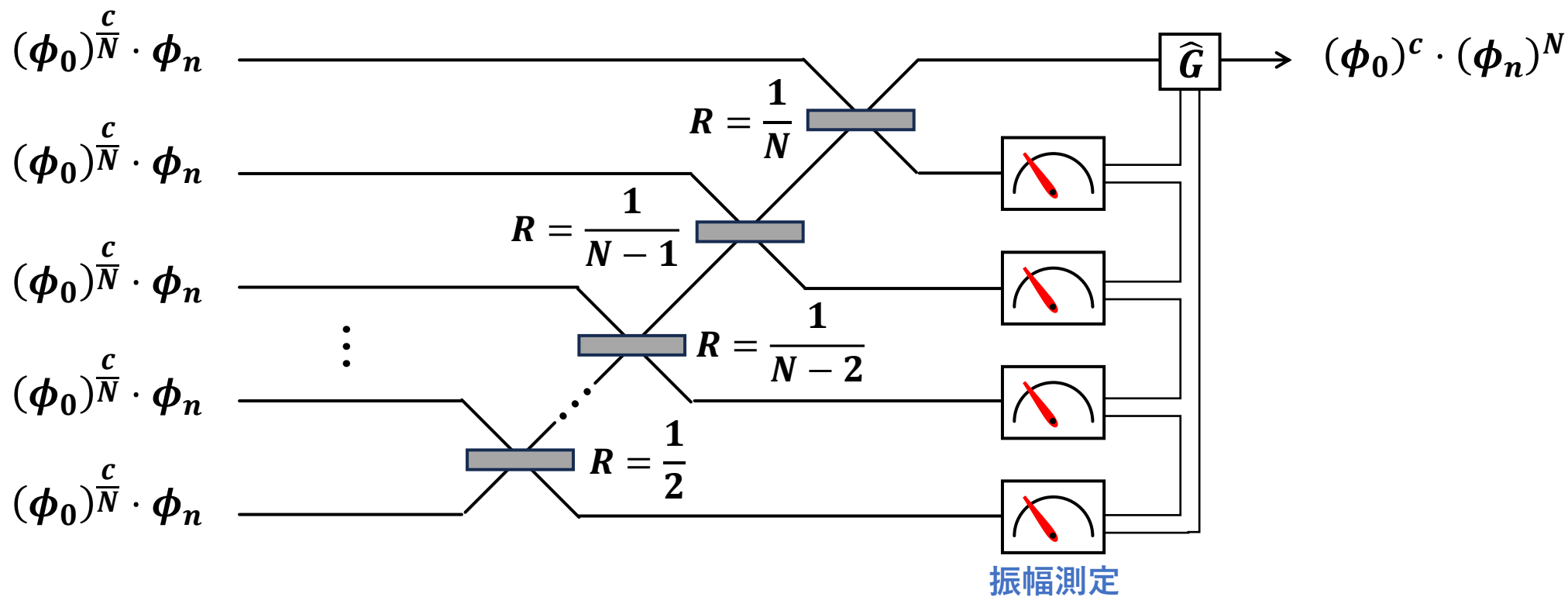
# 波動関数の合成の仕方

干渉と振幅測定により波動関数の掛け算ができる



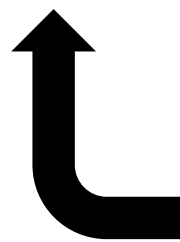
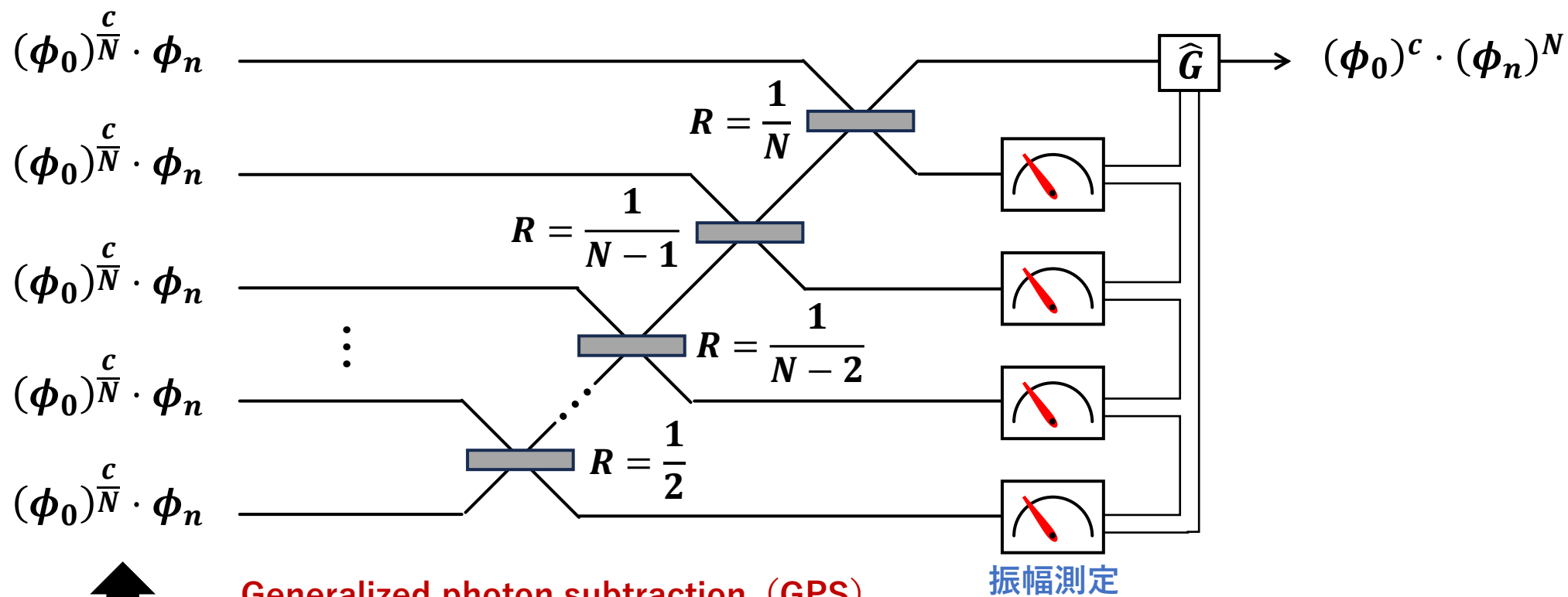
# GKP量子ビットの合成

Target:  $(\phi_0(x))^c \cdot (\phi_n(x))^N$  (Best  $c(\approx 1)$  depends on  $n, N$ )

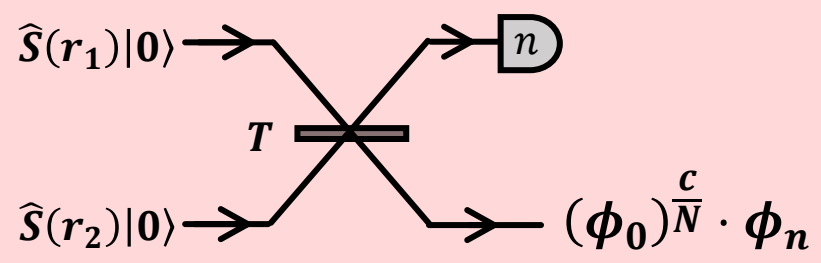


# GKP量子ビットの合成

Target:  $(\phi_0(x))^c \cdot (\phi_n(x))^N$  (Best  $c(\approx 1)$  depends on  $n, N$ )



Generalized photon subtraction (GPS)



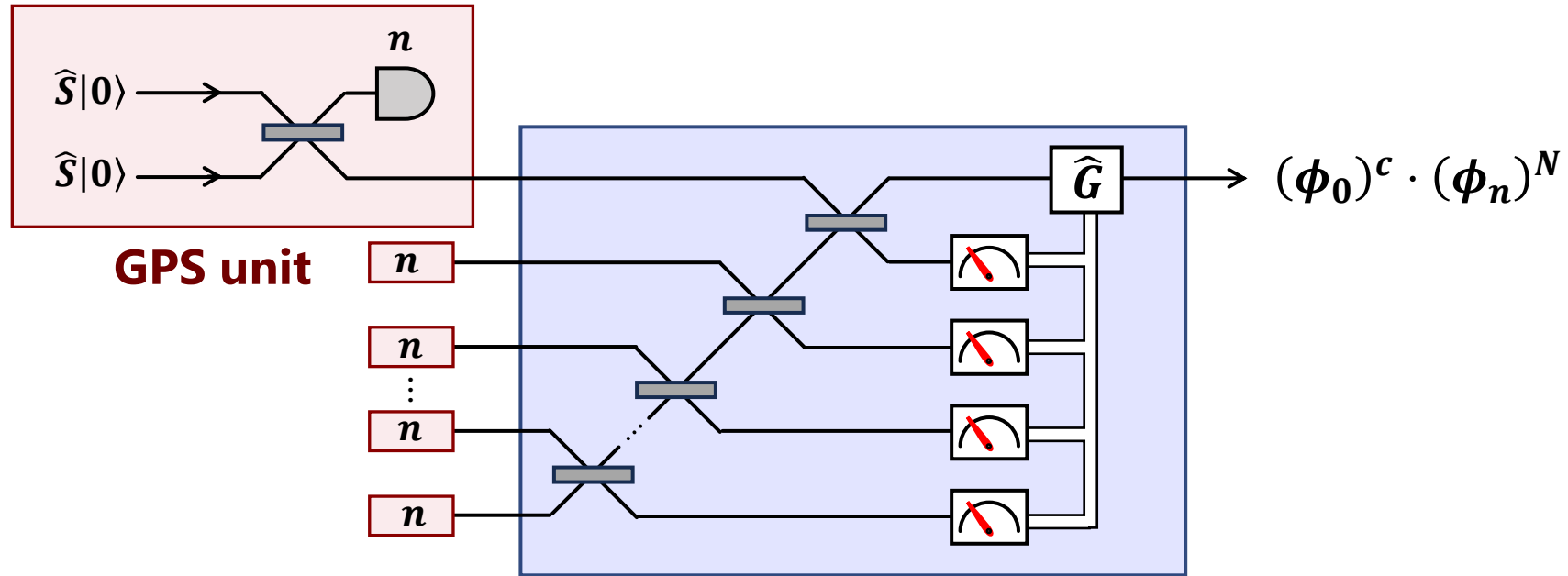
Cat state

Fock state

$$\phi_0 \cdot \phi_n \leftarrow (\phi_0)^{\frac{c}{N}} \cdot \phi_n \rightarrow \phi_n$$



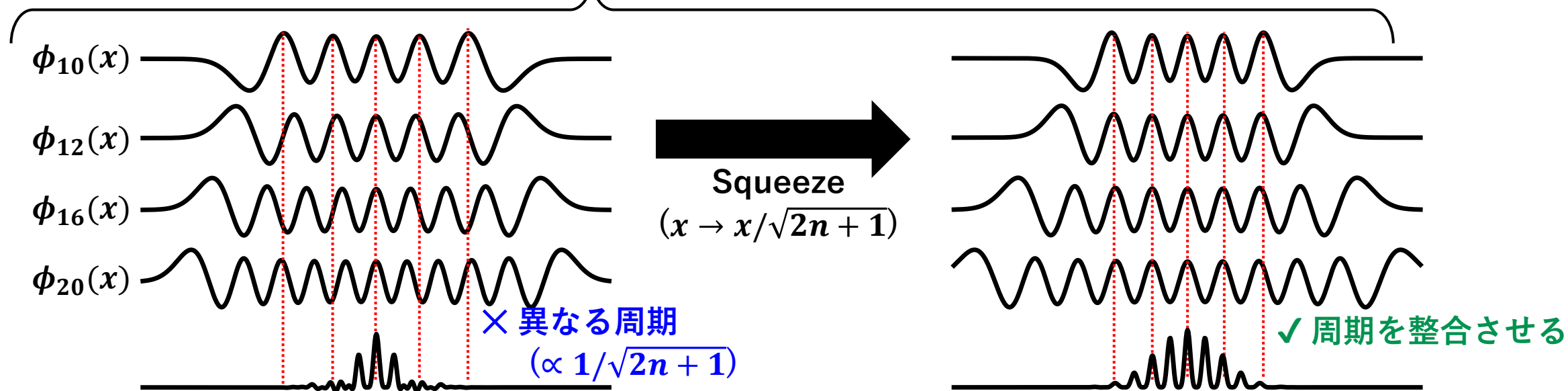
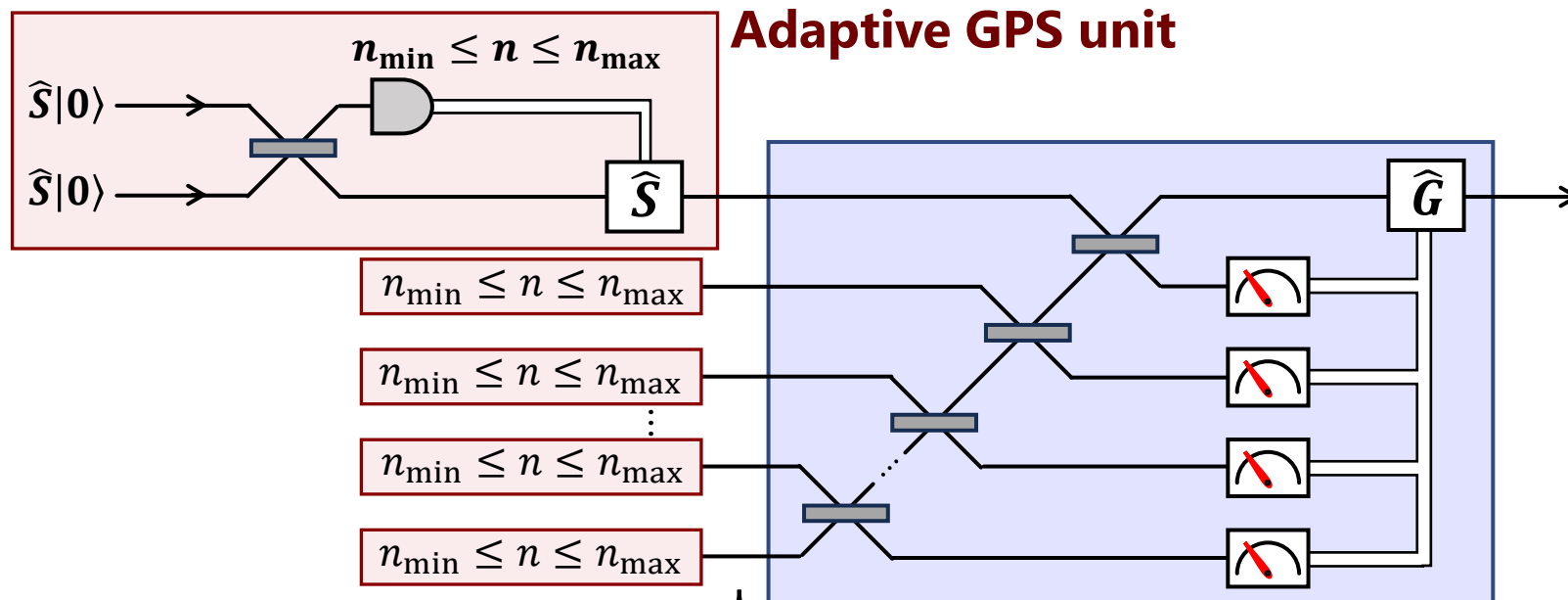
# 光子数状態の周期性の補正



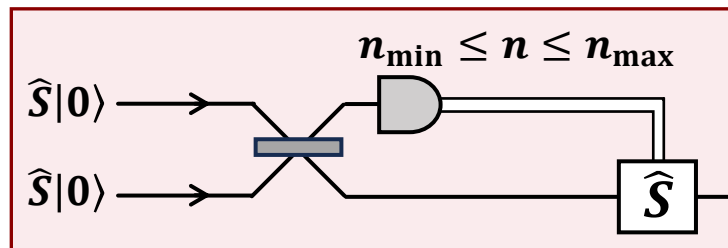
✓ 少ない検出光子数でGKP生成 ( $n=45 \rightarrow n=8$ )

様々な光子検出イベントを許容??

# 光子数状態の周期性の補正

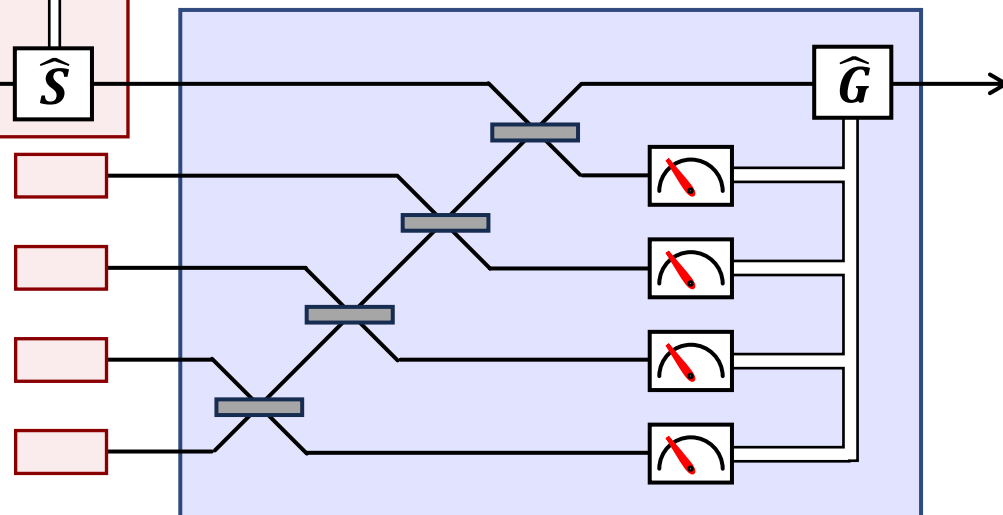


# シミュレーション結果

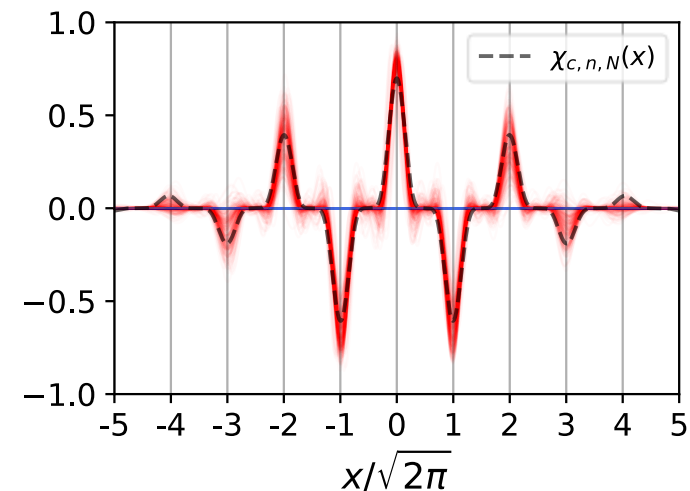


Adaptive GPS unit

Target:  $(\phi_0(x))^c \cdot (\phi_n(x))^N$



✓ この状態を  $P = 0.08\%$  で生成可能



Cat breedingより10桁は改善

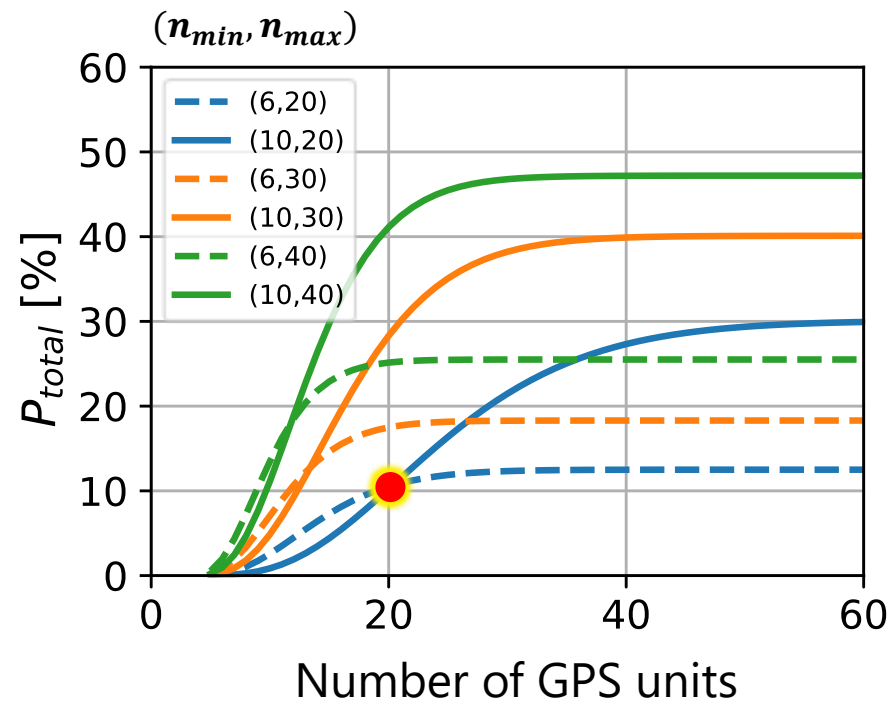
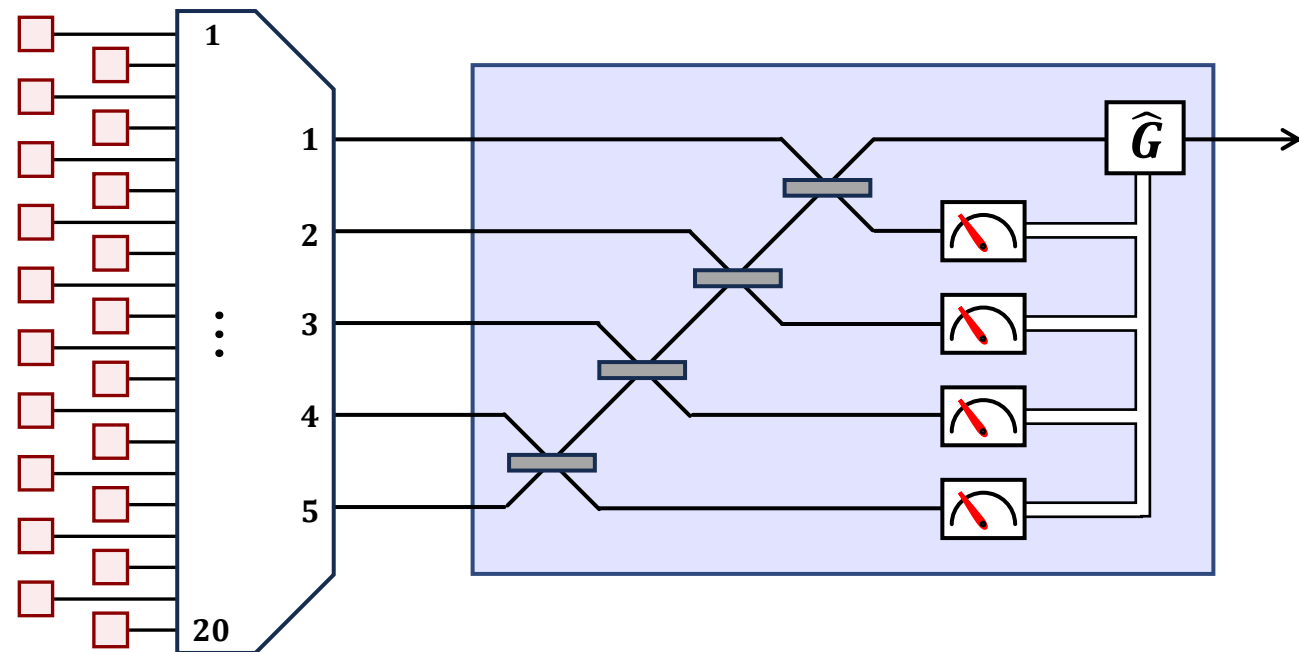


$N$	$n_{\min}$	$n_{\max}$	$c$	$P_{GPS}$	$P_{HD}$	$P_{total}$
5	10	20	1.3	19 %	30 %	0.008 %
		30	1.4	28 %	40 %	0.072 %
		40	1.4	34 %	47 %	0.23 %

$P_{total} = (P_{NGS})^N \times P_{HD}$   
 (原理的には1に漸近可能)

# GPSユニットの多重化

Adaptive  
GPS unit



仮定:  $n_{min} = 10, n_{max} = 20, 20$  dB までのスクイーズ (今は困難だが将来的には現実的)

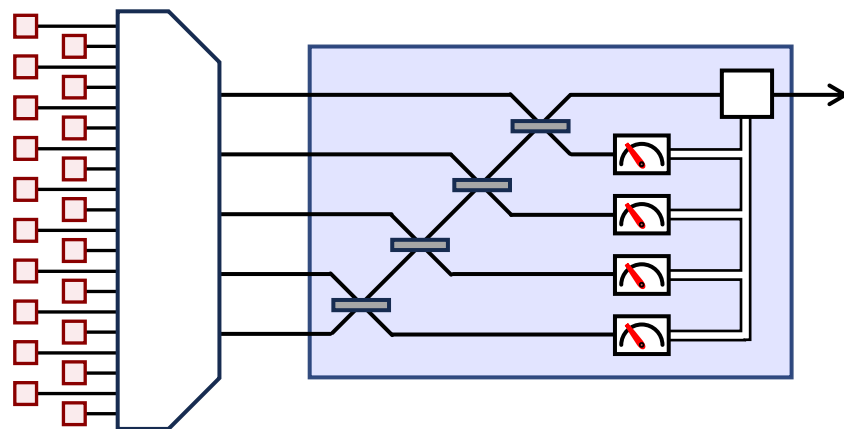
5 GPS units  $\Rightarrow P = 0.008$  %

20 GPS units  $\Rightarrow P = 10$  % ✓ 非常に高い成功確率を達成可能

生成レートは1 MHz~1 GHzに到達可能

# まとめと展望

光量子コンピュータの難しさはGKP量子ビットの生成に詰まっている！



✓ 確率性が大きく改善

少ない検出光子数でGKP生成  
様々な光子検出イベントを許容

✓ GPSを実験的に検証

(近日公開)

## FTQCの実現に向けて

- ・ 単一光子検出器(SSPD)から光子数識別器(TES)へ(近いうちに4~6光子検出の結果が出る)
- ・ 状態生成の繰り返しレートの向上(10 MHz→1 GHz)
- ・ プロセッサの高精度化(NTT,産総研と連携)

➡ 5年で量子誤り訂正の原理検証を、10年でFTQCを実現へ