
ボソニック量子ビットの進展 ーその実装とブレークイーブン達成ー

東京大学 大学院工学系研究科
福井浩介

ムーンショット目標6 第2回ミニシンポジウム 2025年1月30日

アウトライン

ボソニック符号 1-2

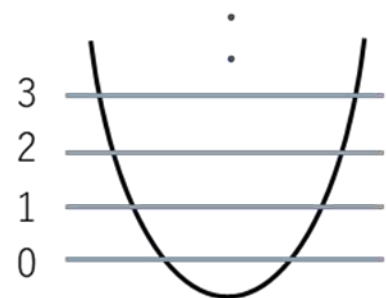
超伝導系によるボソニック符号 3-5

光系によるボソニック符号 6-9

まとめ 10

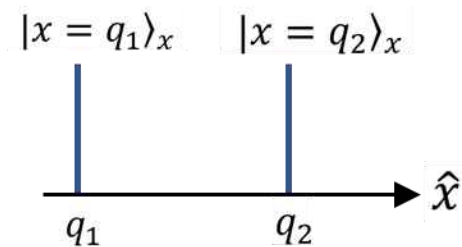
ボソニックモード

(光子)数基底 $|n\rangle_F$



$$\hat{n}|n_i\rangle_F = n_i|n_i\rangle_F$$

(振幅)位置基底 $|q\rangle_x$



$$\hat{x}|q_i\rangle_x = q_i|q_i\rangle_x$$

様々な系で基底状態として表現

Electromagnetic

光共振器
マイクロ波共振器
自由空間
光ファイバ
⋮

Mechanical

フォノン結晶
ナノメカニカル共振器
原子
分子
⋮

ボソニック符号

- ボソニックモードの基底状態を適切に選んで qubit (qudit) を構成

(光子)数基底

$$|0\rangle_L = \sum A_i |i\rangle_F$$

$$|1\rangle_L = \sum B_j |j\rangle_F$$

(振幅)位置基底

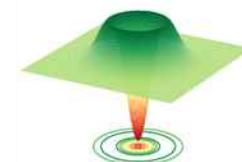
$$|0\rangle_L = \sum \int_{-\infty}^{\infty} dq F_i(q) |q\rangle_x$$

$$|1\rangle_L = \sum \int_{-\infty}^{\infty} dq G_j(q) |q\rangle_x$$

符号例) 偏光モードによる単一光子

$$|0\rangle_L = \text{H} \quad \text{水平偏光}$$

$$|1\rangle_L = \text{V} \quad \text{垂直偏光}$$



※空間、時間、周波数といった自由度も活用

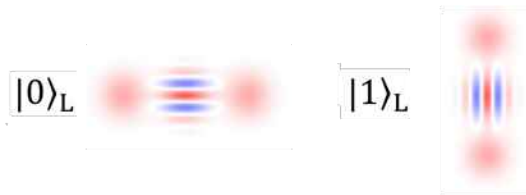
- 上手に選ぶことで効率的なゲート操作や高い誤り耐性を持つことも可能

Cat code

T. C Ralph et al., PRA 68 042319 (2003)

$$|0\rangle_L \propto |\alpha\rangle + |-\alpha\rangle$$

$$|1\rangle_L \propto |i\alpha\rangle + |-i\alpha\rangle$$



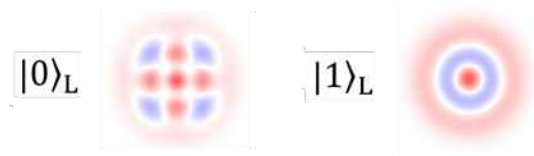
Binomial code

M. H. Michael et al., PRX 6, 031006 (2016)

$$|0\rangle_L = \frac{1}{\sqrt{2^N}} \sum_{p \in \text{even}}^{[0, N+1]} \sqrt{\binom{N+1}{p}} |pM\rangle$$

$$|1\rangle_L = \frac{1}{\sqrt{2^N}} \sum_{p \in \text{odd}}^{[0, N+1]} \sqrt{\binom{N+1}{p}} |pM\rangle$$

(M < losses + gains, N/2 < dephasing)

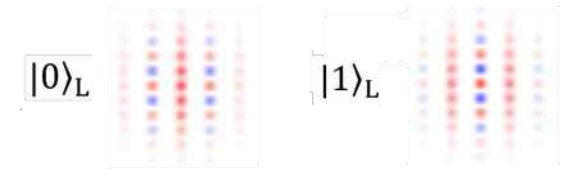


GKP code

D. Gottesman et al., PRA 64, 012310 (2001)

$$|0\rangle_L = \sum_{m=-\infty}^{\infty} |2m\sqrt{\pi}\rangle_q$$

$$|1\rangle_L = \sum_{m=-\infty}^{\infty} |(2m+1)\sqrt{\pi}\rangle_q$$



量子誤り訂正に有利な例

Cat code $\Leftrightarrow$ repetition code

- エラーに対するスケールリング

Dephasing error scaling

Cat $\propto e^{-\alpha^2}$ α

Bit flip error

Repetition $\propto e^{-n \ln E_{\text{flip}}}$ n

Binomial code $\Leftrightarrow$ 4-qubit code

- amplitude damping 検知に必要なヒルベルト空間

Binomial $|0\rangle_L = (|0\rangle + |4\rangle)/\sqrt{2}$
 $\{5\}$ $|1\rangle_L = |2\rangle$

4-qubit $|0\rangle_L = (|0000\rangle + |1111\rangle)/\sqrt{2}$
 $\{2^4=16\}$ $|1\rangle_L = (|0011\rangle + |1100\rangle)/\sqrt{2}$

GKP $\Leftrightarrow$ other bosonic codes

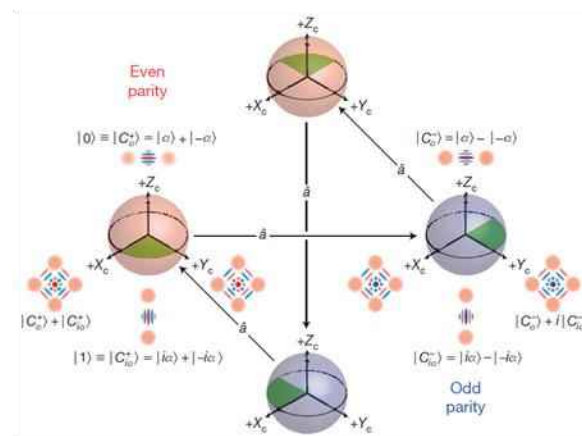
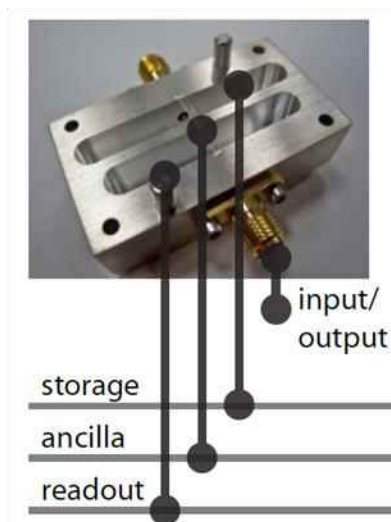
- 光子損失に対し他のボソニック符号の中で**最大の誤り耐性**

VV Albert et al., PRA 97, 032346 (2018)

- 光の波の情報を復号に利用すると誤り耐性が最大限向上 (白色ノイズに対し**最大の誤り耐性**)

KF et al., PRL 119, 180507 (2017)

超伝導系によるボソニック量子ビット



Ofek, N., Petrenko, A., Heeres, R. et al. Nature 536, 441–445 (2016).

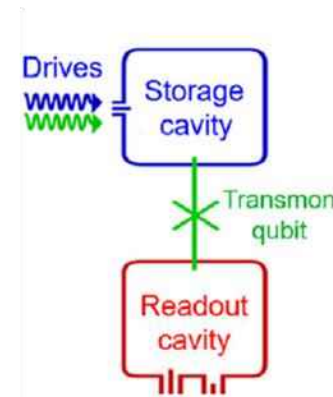
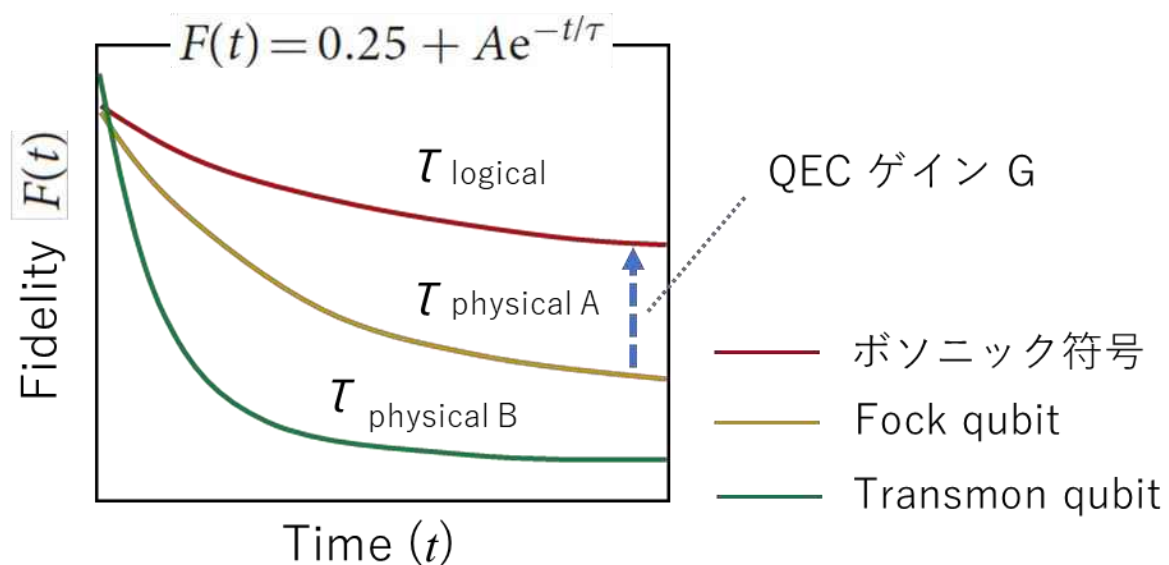
● マイクロ波ボソニック符号のブレイクイーブンの達成条件

- 同一システムにおける基礎的な符号と比べコヒーレンス時間が伸びればブレイクイーブン達成

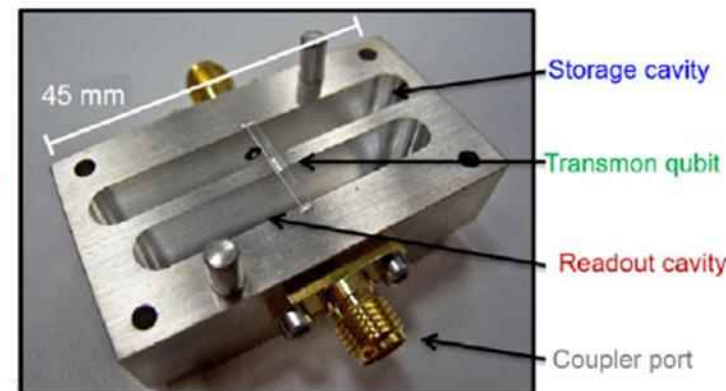
$$\text{QECゲイン } G = \frac{\tau_{\text{physical}}}{\tau_{\text{logical}}} > 1 \quad \text{ブレイクイーブン達成}$$

τ_{physical} Fock qubit (QEC無し)

τ_{logical} ボソニック符号 (QECあり)



マイクロ波キャビティ



(ボソニック符号用共振器のコヒーレンス~ms)

N.Ofek et al., Nature 536, 441 (2016)

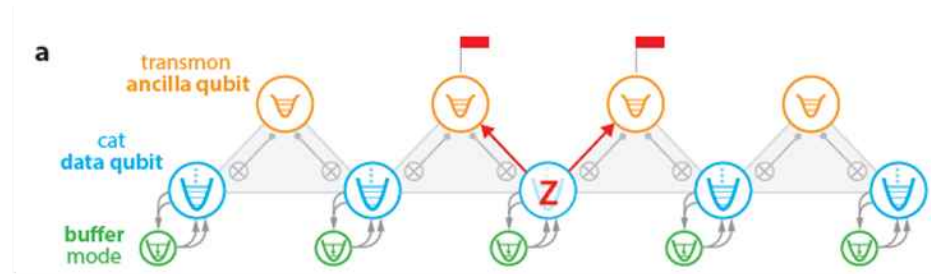
WL. Ma et al., Science Bulletin, 66, 1789 (2021)

様々なマイクロ波ボソニック符号のブレークイーブンに次々成功

2016	●	Cat	$G \sim 1.1$	N.Ofek et al., Nature 536, 441 (2016)
2019	●	Binomial	$G < 1$	L. Huet et al., Nature Phys. 15, 503 (2019)
2020	●	GKP	$G < 1$	P. Campagne-Ibarcq et al., Nature 584, 368 (2020)
2023	●	GKP	$G \sim 2.27$	V. V. Sivak et al., Nature 616, 50 (2023)
2023	●	Binomial	$G \sim 1.16$	N. Zhongchu et al. Nature 616, 56 (2023)
2024	●	GKP qudit	$G \sim 1.82$	B.L. Brock, arXiv preprint arXiv:2409.15065
2024	●	Concatenated Cats		H Putterman et al., arXiv preprint arXiv:2409.13025

単一モードの
ブレークイーブン

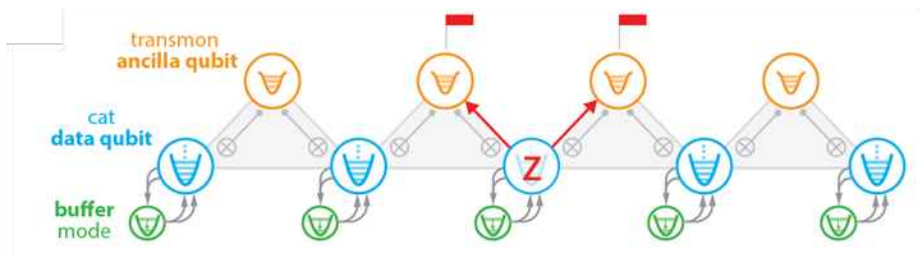
多モードの
量子誤り訂正実現



● FTQCに向けて実験面・理論面は大きく進展している

- 今後はGKPやBinomialにおいて冗長化ボソニック符号の量子誤り訂正実現が予想される
- FTQCのオーバーヘッド削減の可能性を拓げるための原理実証・理論研究が期待

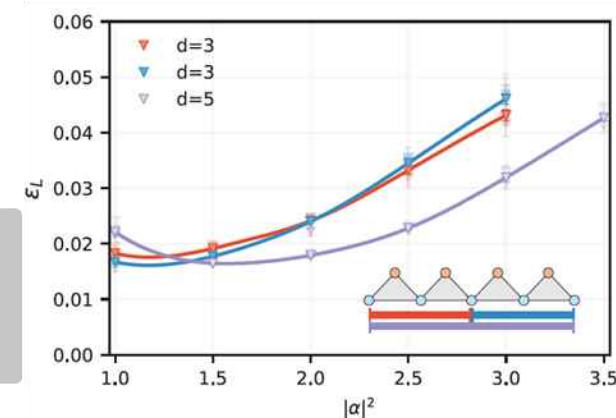
冗長 Cat code の量子誤り訂正実現



Cat code $|0\rangle_L = |\alpha\rangle$ $|1\rangle_L = |-\alpha\rangle$

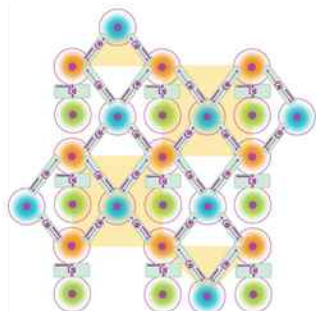
Bit-flip error $\propto e^{-\alpha^2}$ scaling α

bit-flip Err. → 振幅 α を増大させて抑制
phase-flip Err. → repetition code で訂正



アーキテクチャの研究も様々進展

All-GKP 方式

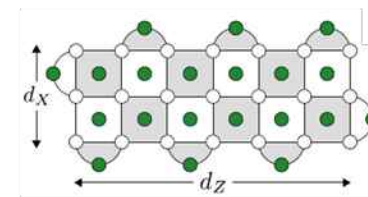


- = Data GKP resonator
- = Ancilla GKP resonator for SC error-correction
- = Ancilla GKP resonator for GKP error-correction
- = Nonlinear couplers, like transmon or SNAILS for tunable gates and non-Gaussian operations
- = Readout resonator

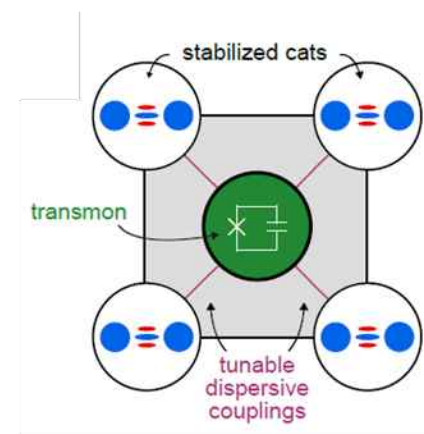
A. L. Grimsmo and S. Puri, PRX Quantum 2, 020101 (2021)

ハイブリッド方式

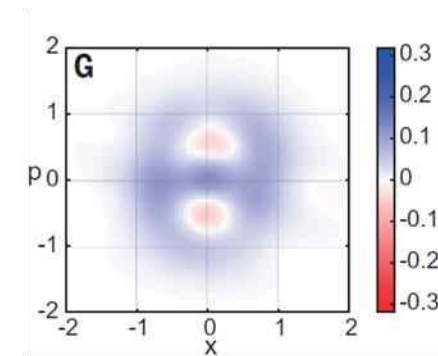
cat = data qubit
transmon = syndrome



CT Hann et al., arXiv preprint arXiv:2410.23363



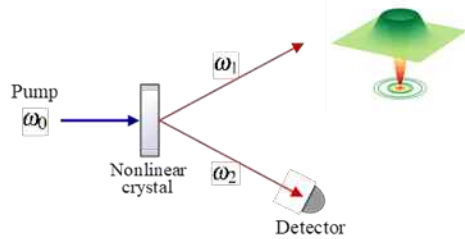
光系によるボソニック量子ビット



Shunya Konno et al.. Science383,289-293(2024)

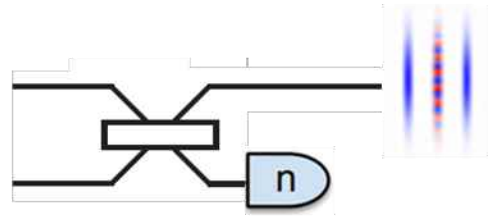
- 伝令付き（条件付き）光子検出を利用して実装する手法が一般的に利用される
 - 量子相関を持つ多モードを測定し、あらかじめ決めた検出条件であれば所望の状態を得る

単一光子生成



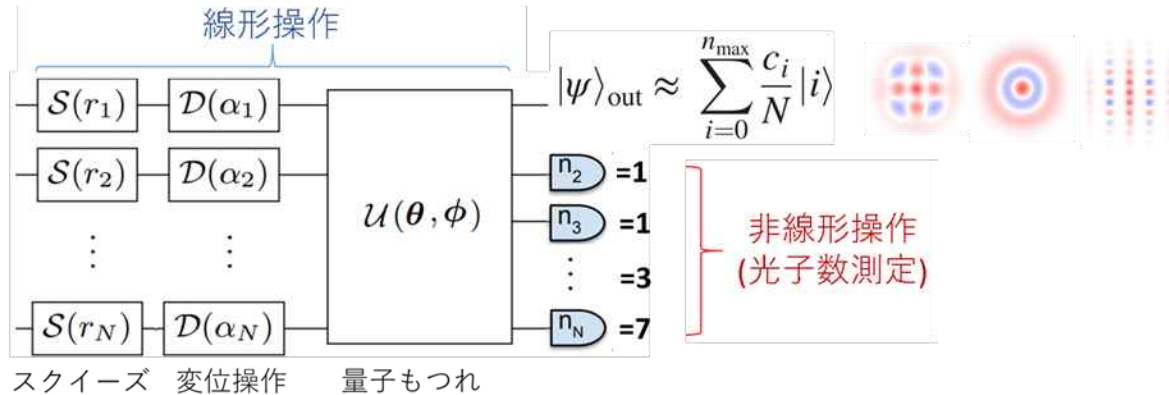
下方パラメトリック変換

Cat qubit 生成



光の干渉と光子数識別器

GKP や binomial 等の生成

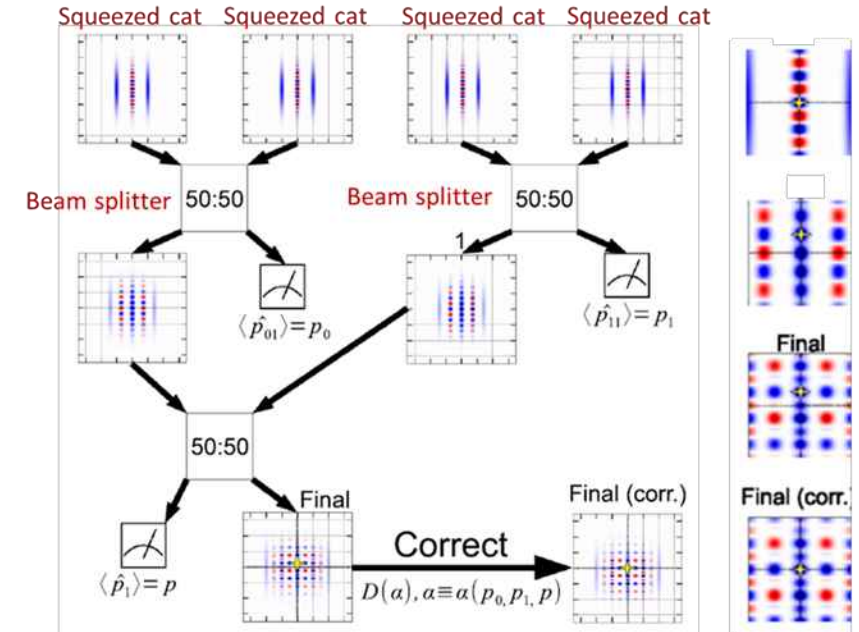


複数の光子検出器の利用（ガウシアンボソンサンプリング型回路）

非ガウス状態リソースを利用した GKP qubit 生成

Breeding protocol

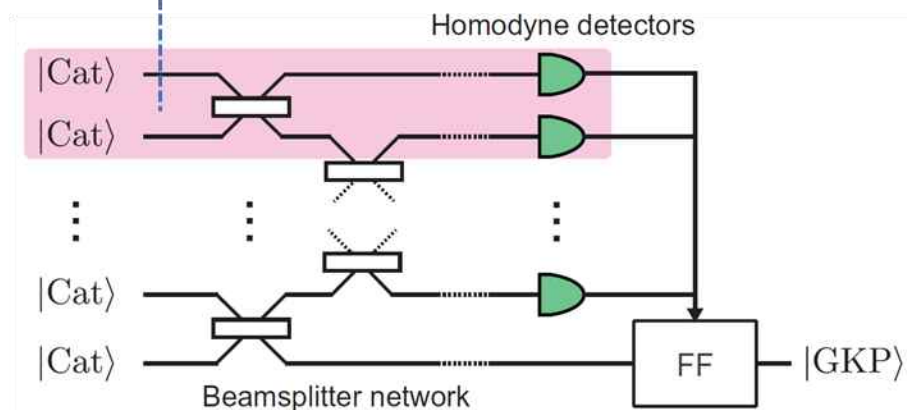
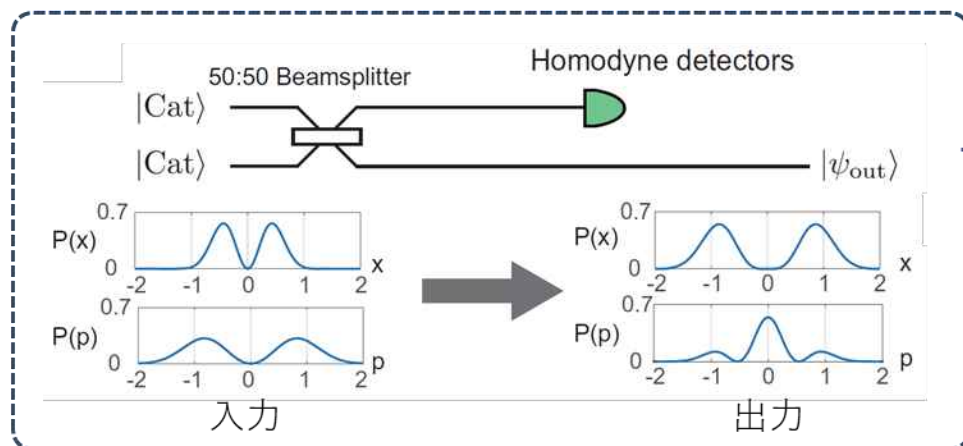
GKP qubit を直接生成するより効率的



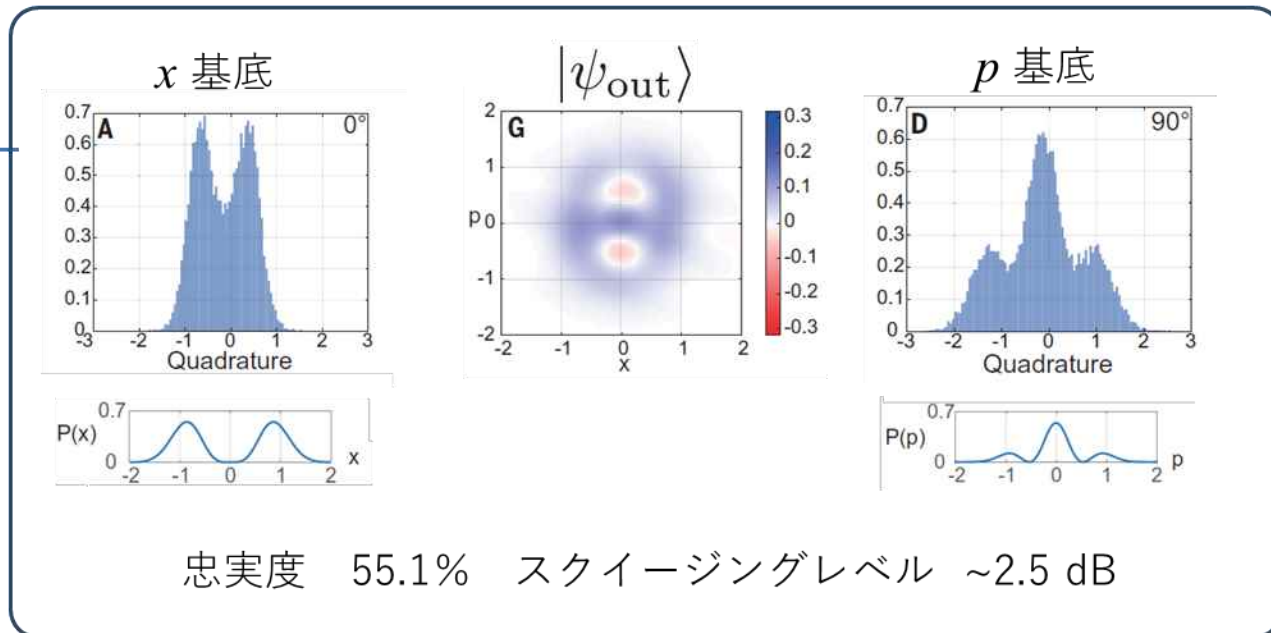
D. J. Weigand et.al., PRA 97, 022341 (2018)

● 光の系でGKP量子ビットが初めて実装 (2024) S. Konno et al., Science 383.289 (2024)

- Breedingプロトコルの初段の光干渉回路を実装したGKP実装の原理実証実験
- GKP量子ビットを用いた光FTQCに向けた着実な一歩



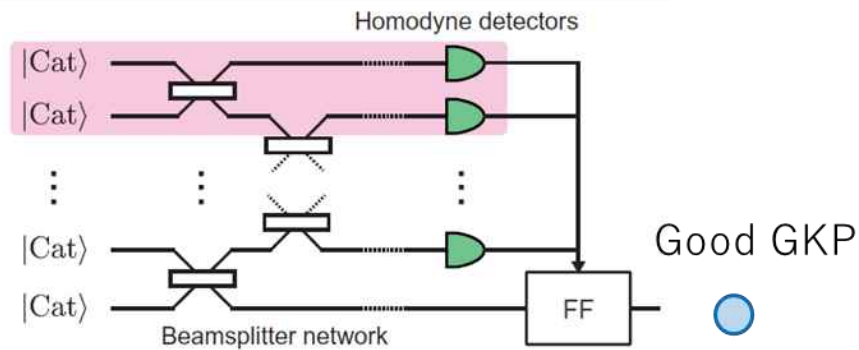
Breeding protocol



- 高精度のGKP量子ビット実装には高精度のCat stateが必要
- Cat state の精度向上には光子数識別器とスクイーミング光源の技術開発が重点課題

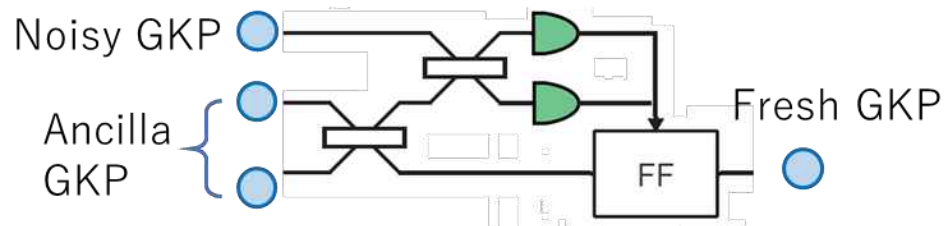
- 光GKP量子ビットのQECの今後の展開としては、高精度GKPの実装、GKPによるQECの原理実証、そしてブレイクイーブン実証の展開に期待

高精度のGKP量子ビット実装



GKPによるQEC

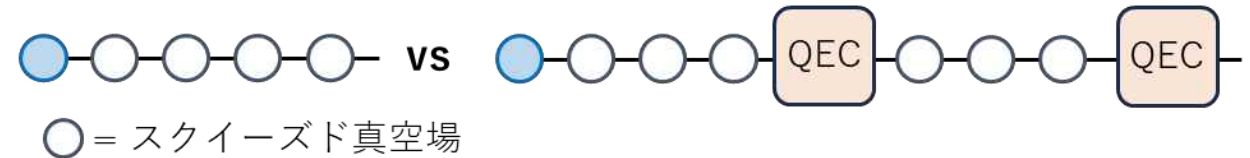
・量子テレポーテーションベースのQEC



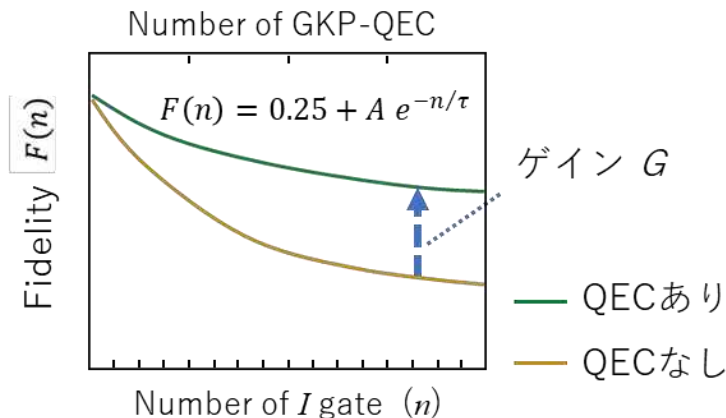
ブレイクイーブンの実証

実験例：IゲートにおけるQECゲインを実証

測定型量子計算 Iゲートで比較（繰り返し量子テレポーテーション）



※クラスター状態を使った測定型量子計算は原理実証済み
W. Asavanant et al., Phys. Rev. Applied **16**, 034005 (2021)
M.V. Larsen et al., Nature Physics **17** (9), 1018-1023 (2021)



ブレイクイーブン条件

$$G = \frac{\tau_{\text{physical}}}{\tau_{\text{logical}}} > 1$$

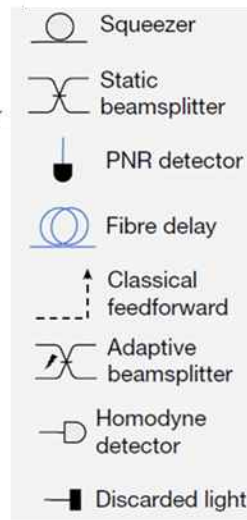
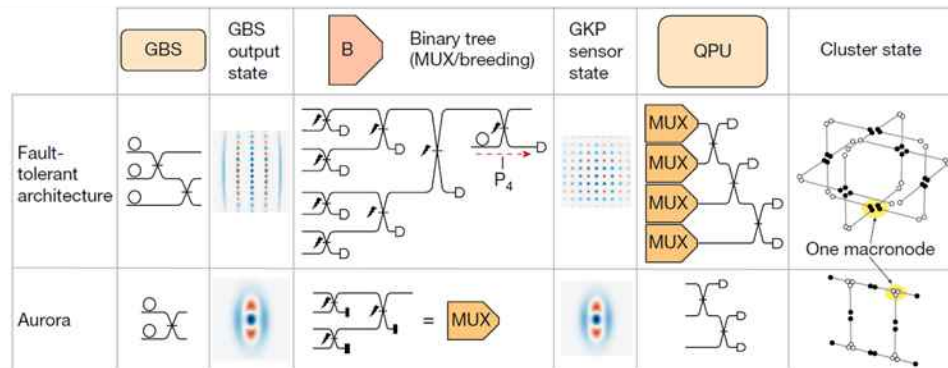
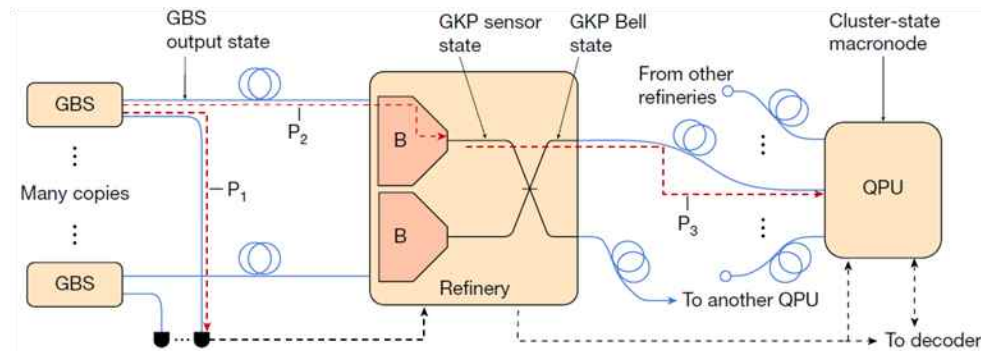
τ_{physical} GKP-QECなし
 τ_{logical} GKP-QECあり

● FTQCに向けた実験・理論研究は着実に進展している

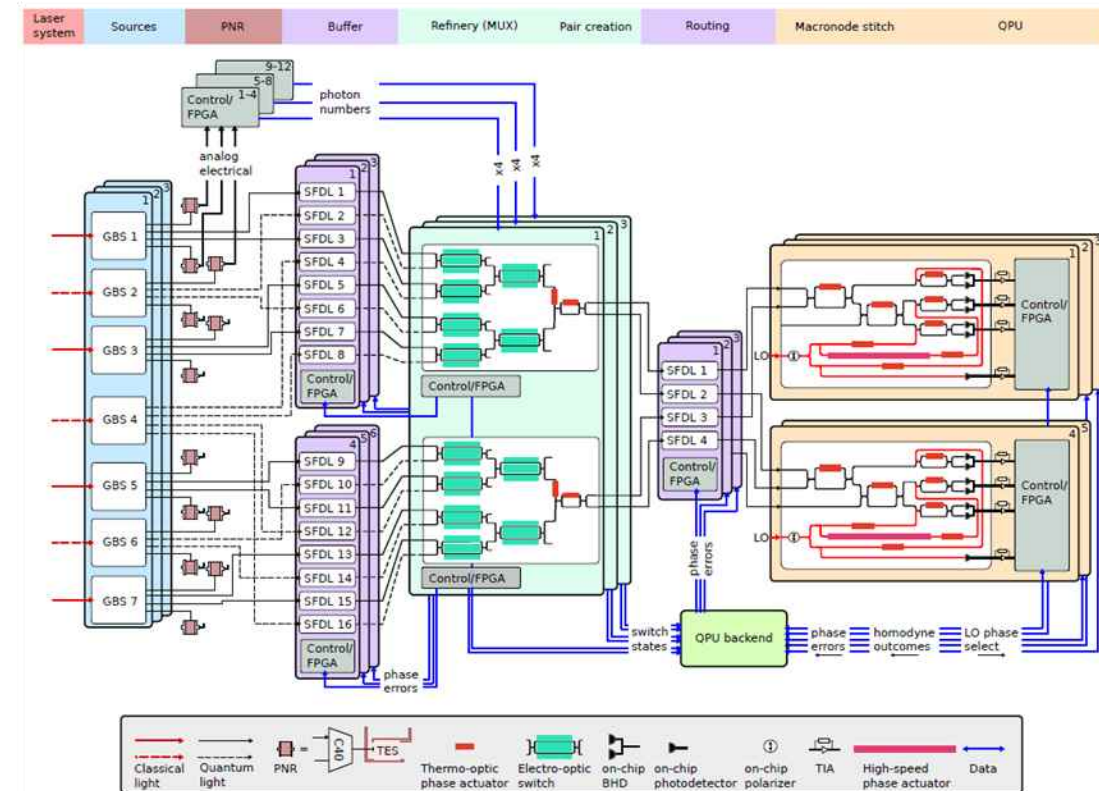
- 今後は光GKP量子ビットのブレークイーブンに期待しつつ、現状の技術レベルで状態生成・量子計算・QECの機能を備えたプロトタイプ設計も必要
- 伝搬光によるフレキシブルな回路設計による表面符号以外のアーキテクチャ研究も必要か

FTQCプロトタイプの研究開発例 (Aurora by Xanadu)

H. Aghaee Rad et al. Nature (2025). (DOI: 10.1038/s41586-024-08406-9)



Aurora's FTQC architecture



● ボソニック符号のブレイクイーブン

超伝導系では多くのボソニック符号で単一モードでのブレイクイーブン達成
光系ではGKP量子ビットの原理実証に成功し、今後はその高精度化に期待

● マイクロ波ボソニック符号によるFTQCに向けて

冗長化ボソニック符号のブレイクイーブン達成・スケーリング実証が期待
FTQCのオーバーヘッド削減の可能性を拡げるための原理実証・理論研究が期待

● 光ボソニック符号によるFTQCに向けて

単一モードのブレイクイーブン達成を期待し、FTQCに向けたロードマップ or ブループリントも必要

量子通信、量子計測といった量子アプリケーションへの展開も期待 例) GKP qubit による量子中継
KF et al., PRR 3, 033118 (2021)

新しい方式の可能性を模索 例) 単一光子とGKPのハイブリッドで原理的に~4.0 dBでFTQC可能
KF and P. van Loock, arXiv:2412.16536