



Квантовые оптические нейронные сети с программируемыми нелинейностями

Е.А. Черных, М.Ю. Сайгин, С.С. Страупе, С.П. Кулик
Центр квантовых технологий МГУ имени М.В. Ломоносова

План доклада

- Квантовые оптические нейронные сети (Quantum optical neural networks (QONNs))
- Линейная оптика и квантовые нелинейности
- Квантовые оптические нейронные сети с программируемыми нелинейностями

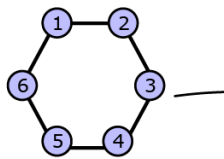
Оптические квантовые вычисления

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

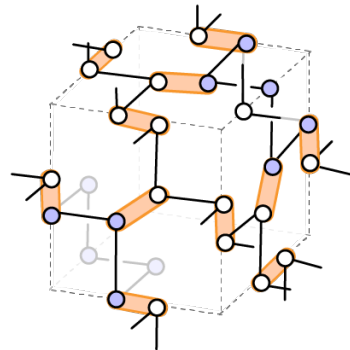
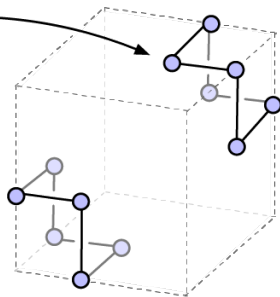
Модель KLM (Knill-Milburn-Laflamme)

P.Kok et al. // Rev.Mod.Phys. 79, pp. 135 (2007)

Кластерные & fusion-based модели



$$\begin{aligned} S_1 &= Z_1 X_2 Z_3 I_4 I_5 I_6 \\ S_2 &= I_1 Z_2 X_3 Z_4 I_5 I_6 \\ S_3 &= I_1 I_2 Z_3 X_4 Z_5 I_6 \\ S_4 &= I_1 I_2 I_3 Z_4 X_5 Z_6 \\ S_5 &= Z_1 I_2 I_3 I_4 Z_5 X_6 \\ S_6 &= X_1 Z_2 I_3 I_4 I_5 Z_6 \end{aligned}$$



S. Bartolucci et al., Nat. Commun. 14, 912 (2023)

доклад С. Страупе во вторник

ОГРАНИЧЕННЫЕ МОДЕЛИ

- **Бозонный сэмплинг**

S.Aaronson & A.Arhipov, arxiv:1011.3245 (2010)

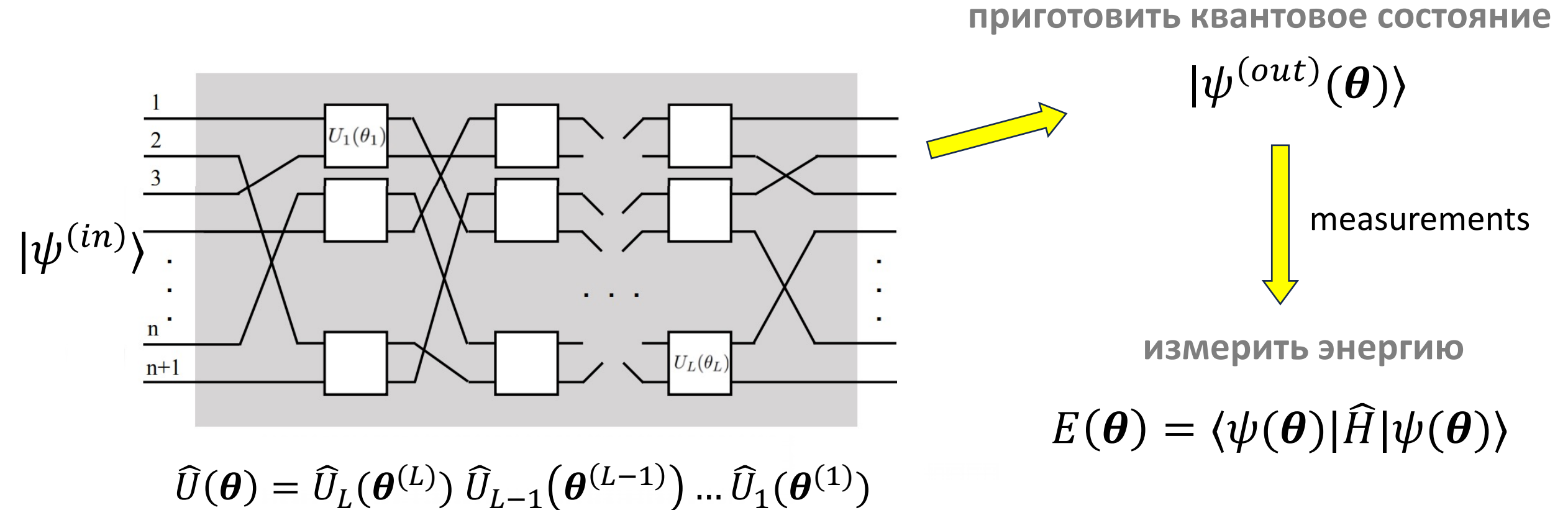
- **Вариационные оптические вычислители**

R.R. Ferguson et al., PRL 126, 220501 (2021)

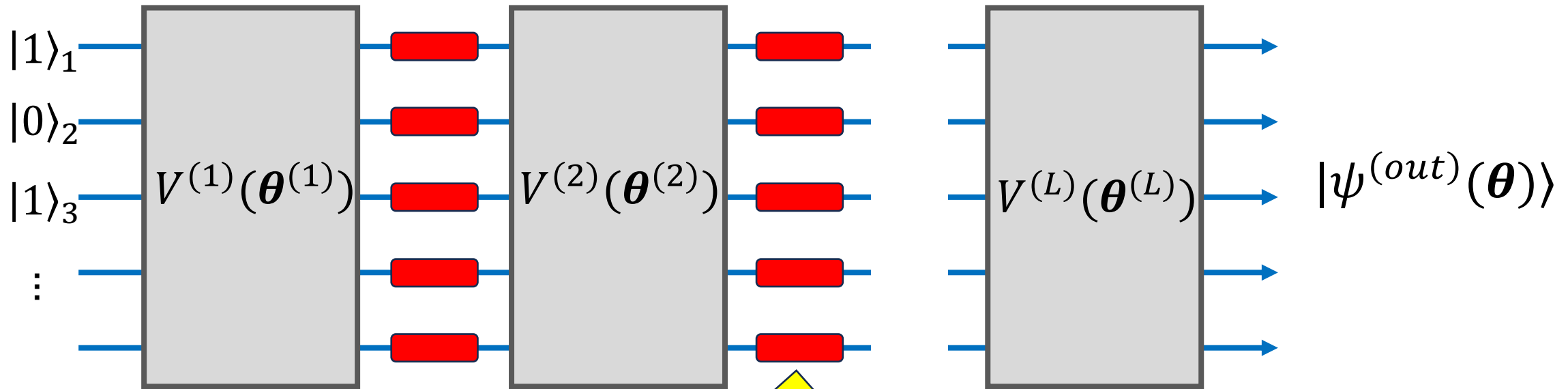
- **Решатели задач на графах:**

R. Mezher et al., PRA 108, 032405 (2023)

Параметризованные квантовые цепочки



Квантовые оптические нейронные сети (QONNs)



Статические нелинейности – $\widehat{NS} = \exp(i\pi\hat{n}(\hat{n} - 1)/2)$:
 $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle + \gamma|2\rangle + \dots \rightarrow \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle - \gamma|2\rangle + \dots$

Программируемая линейная оптика

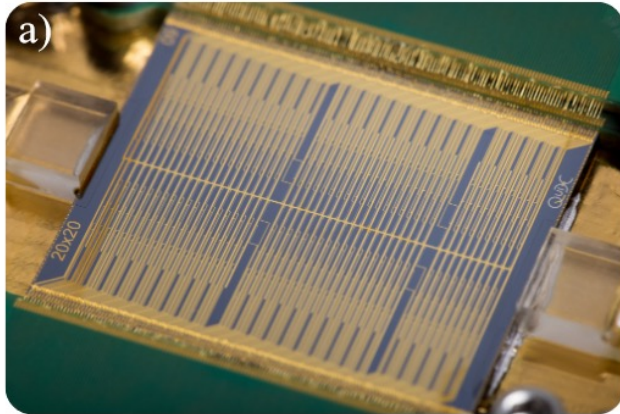
1 слой – M^2 параметров θ

Тренировка линейно-оптической части (фазовые сдвиги $\theta^{(1)}, \dots, \theta^{(L)}$):

G.R. Steinbrecher et al., NPJ Quan. Inf. 5, 60 (2019)

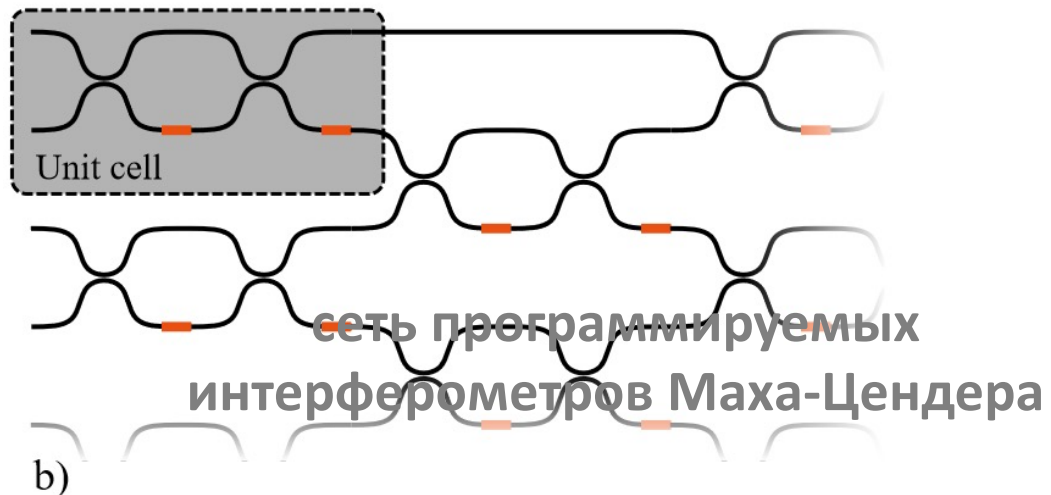
Программируемая линейная оптика

20-канальный интерферометр Quix



Универсальный M -канальный интерферометр – минимум M^2 программируемых параметров:

- M. Reck et al., PRL **73**, 58 (1994).
- W.R. Clements et al, Optica **3**, No 12, pp. 1460-1465 (2016).
- S.A. Fldzhyan, M.Yu. Saygin, S.P. Kulik, Opt. Lett. **45**, 9, pp. 2632-2635 (2020).
- M.Yu. Saygin et al., PRL **124**, 010501 (2020).



Программируемые нелинейности

Parametrized nonlinear phase shift gate
(Kerr-like nonlinearity):

$$\widehat{NS}(\chi) = \exp(i\chi\hat{n}(\hat{n} - 1)/2)$$

$0 \leq \chi \leq \pi$ – programmable parameter (nonlinearity strength)

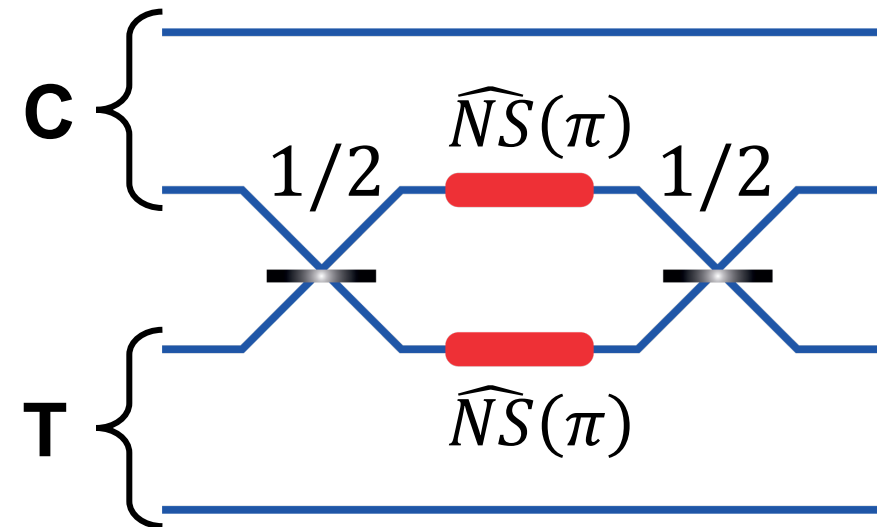
$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle + \gamma|2\rangle + \dots \xrightarrow{\widehat{NS}(\chi)} \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle + \gamma e^{i\chi}|2\rangle + \dots$$

Inefficient using solely linear optics – non-deterministic and require large resource overhead.
See, e.g.:

E.Knill, R.Laflamme & G.J.Milburn // Nature **409**, p. 46-52 (2001)

N.Spagnolo et al. // NPJ Quant. Inf. **9**, No 3 (2023)

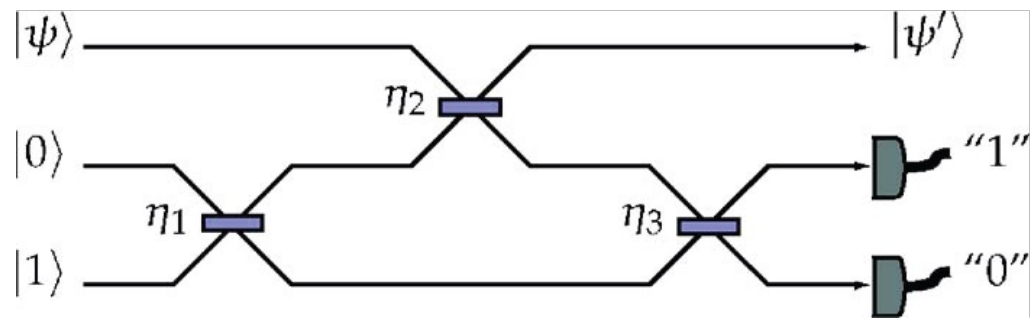
Детерминистический CZ-гейт



Линейно-оптическая реализация нелинейных гейтов

NS-гейт

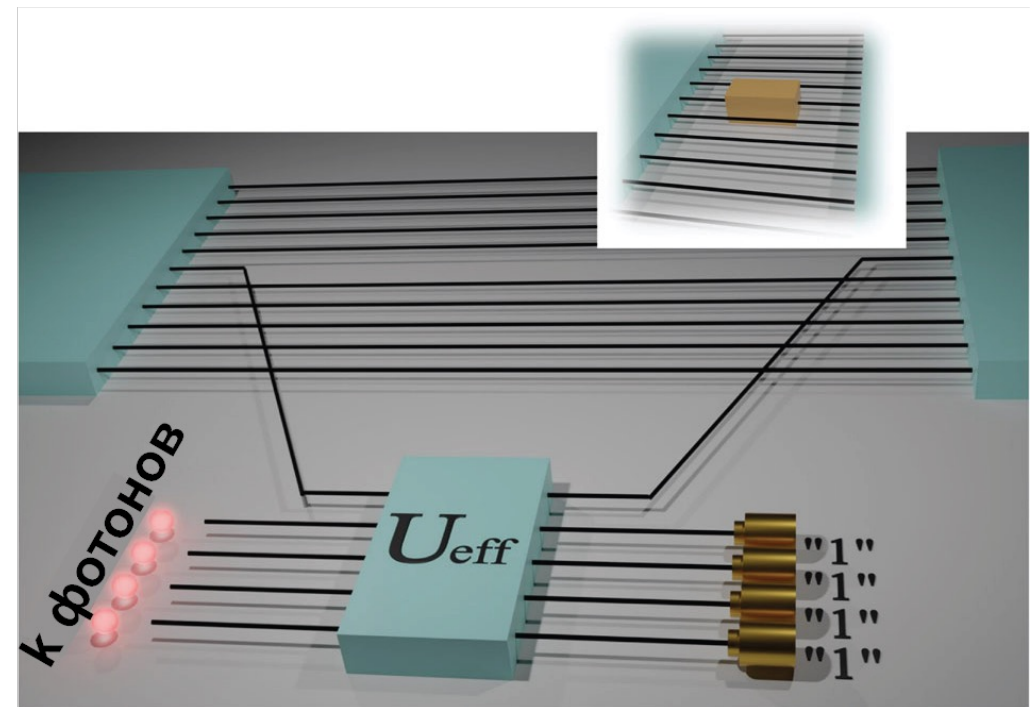
$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle + \gamma|2\rangle \longrightarrow \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle - \gamma|2\rangle$$

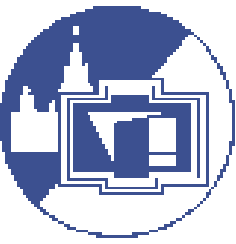


$$NS = \exp\left(\frac{i\pi}{2} \hat{n}(\hat{n} - 1)\right) \text{ для } k \leq 2 \text{ фотонов в состоянии}$$

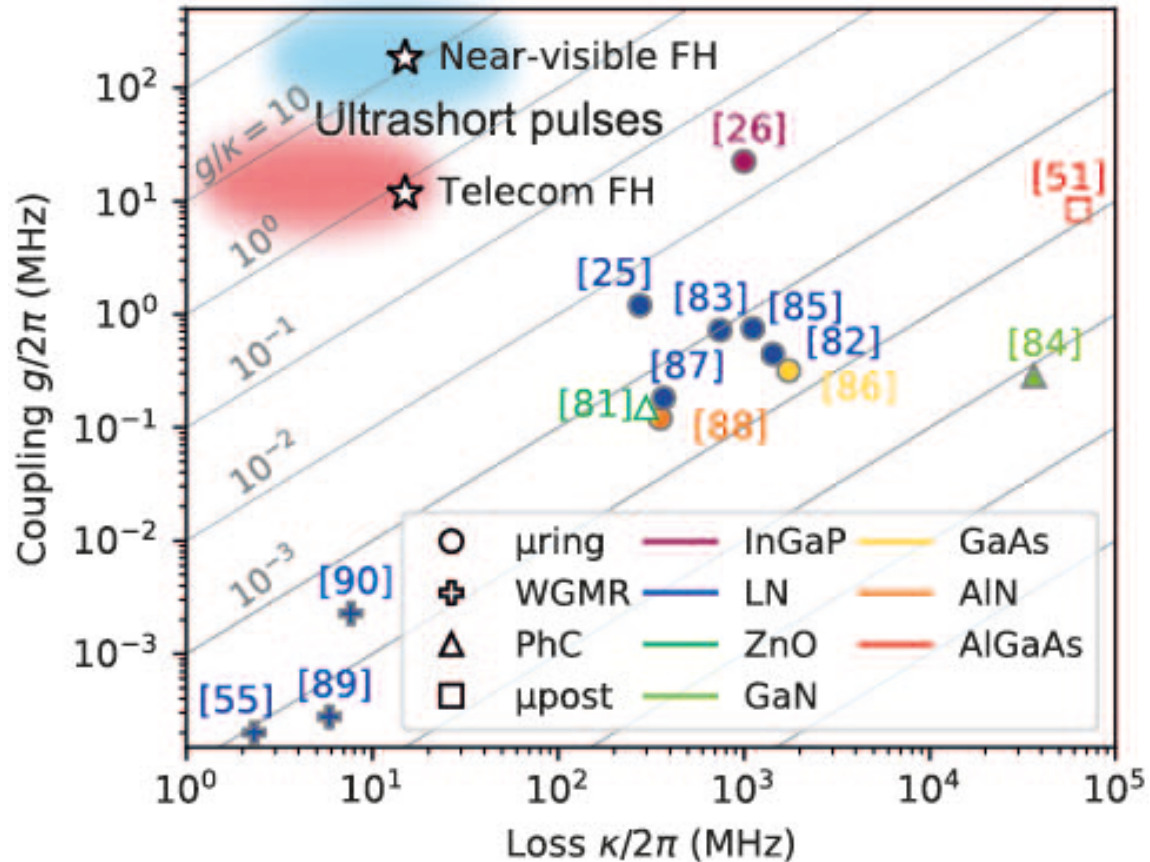
$$\text{Вероятность успешного срабатывания: } p_{NS} = \frac{1}{4}$$

Обобщение на нелинейность до k порядка





Соотношения между g и κ для разных оптических платформ



Для квантовых гейтов необходим режим сильной связи:

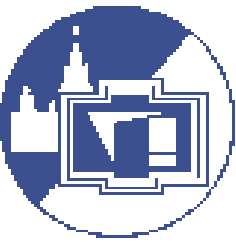
$$\frac{g}{\kappa} \geq 10$$

Наибольшее значение среди bulk нелинейных сред:

$$\frac{g}{\kappa} = 1.5 \cdot 10^{-2}$$

в работе M. Zhao and K. Fang, "InGaP quantum nanophotonic integrated circuits with 1.5% nonlinearity-to-loss ratio" // Optica 9, No 2, pp. 258 (2022)

R. Yanagimoto et al., "Temporal trapping: a route to strong coupling and deterministic optical quantum computation" // Optica 9, No 11, pp. 1289 (2022)



Сильная связь $\frac{g}{\kappa} \gg 1$

Tunable Microwave Single-Photon Source Based on Transmon Qubit with High Efficiency

Yu Zhou, Zhihui Peng, Yuta Horiuchi, O.V. Astafiev, and J.S. Tsai
Phys. Rev. Applied **13**, 034007 – Published 3 March 2020

Article

References

Citing Articles (16)

PDF

HTML

Export Citation

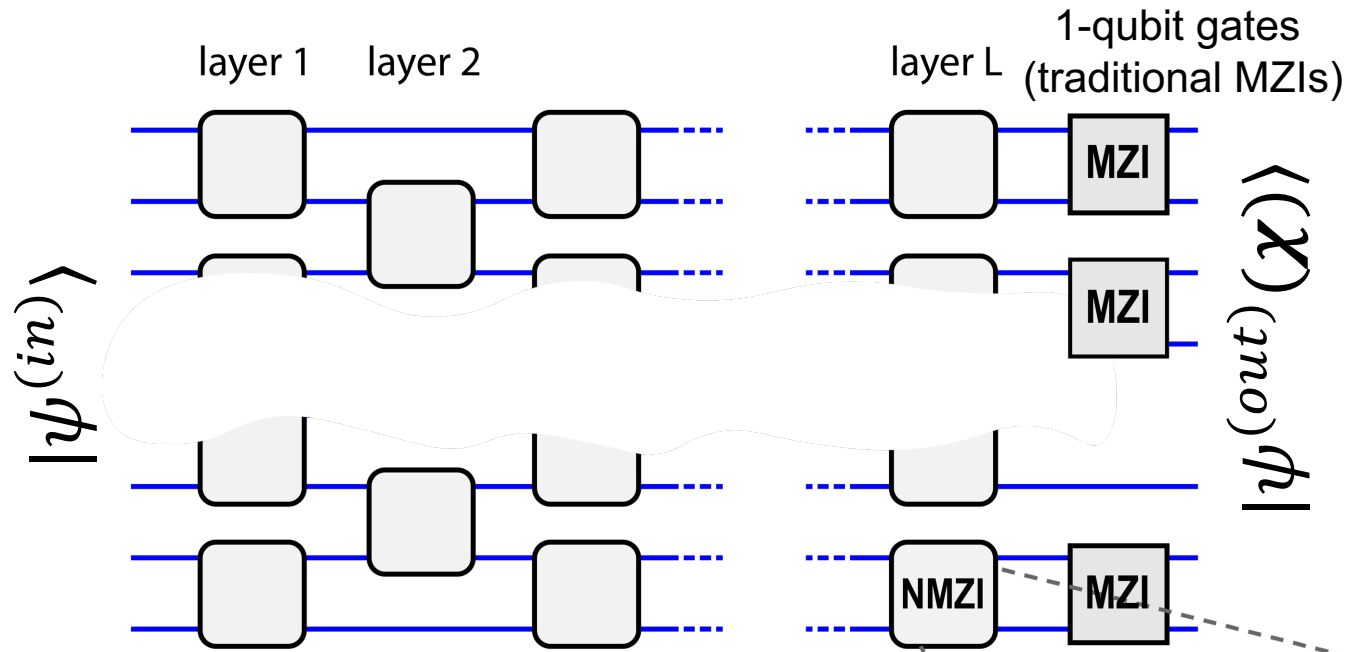


ABSTRACT

Single-photon sources are of great interest because they are key elements in different promising applications of quantum technologies. Here we demonstrate a highly efficient tunable on-demand microwave single-photon source based on a transmon qubit with an intrinsic emission efficiency above 98%. The high efficiency ensures a negligible pure dephasing rate and the necessary conditions for generation of indistinguishable photons. We provide an extended discussion and analysis of the efficiency of the photon generation. To further experimentally confirm the single-photon property of the source, correlation functions of the emission field are also measured using linear detectors with a GPU-enhanced signal-processing technique. Our results experimentally demonstrate that frequency tunability and negligible pure dephasing rate can be achieved simultaneously and show that such a tunable single-photon source can be good for various practical applications in quantum communication, simulations and information processing in the microwave regime.

Эффективные источники фотонов

QONN #1: нелинейные интерферометры Маха-Цендера (NMZI)



Состояния кубитов –
двухрельвовая кодировка:

$$|0\rangle_L = |0\rangle_1|1\rangle_2, \quad |1\rangle_L = |1\rangle_1|0\rangle_2$$

Программируемые керровские
нелинейности:

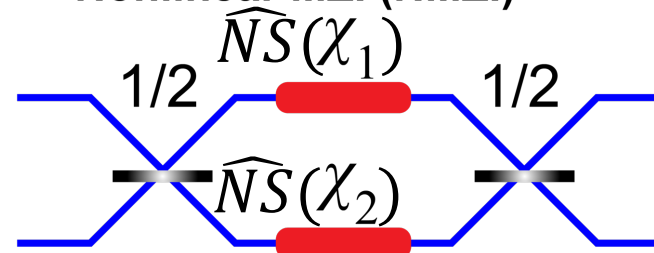
$$\widehat{NS}(\chi) = e^{i\hat{n}(\hat{n}-1)\chi/2}$$

1 слой – M параметров χ

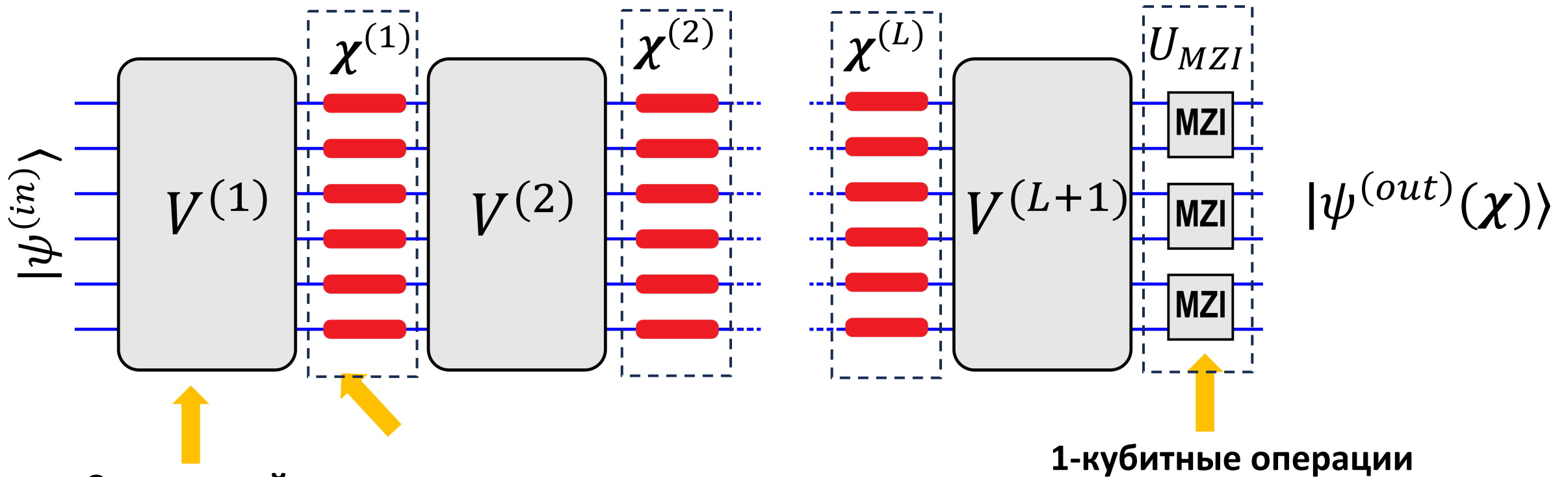
Balanced splitters:

$$\text{transfer matrix } U_{BS} = \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} / \sqrt{2}$$

Nonlinear MZI (NMZI)



QONN #2: многомодовое смешивание + нелинейности



Статический интерферометр: $\hat{b}_m^+ = \sum_j V_{mj}^{(1)} \hat{a}_j^+$

Программируемые нелинейности: $e^{i\hat{n}(\hat{n}-1)\chi/2}$

$V^{(l)}$ – дискретное преобразование Фурье

1 слой – M параметров χ

Генерация 2-кубитных состояний

Входное состояние

$$|\psi^{(in)}\rangle = |1100\rangle$$

QONN

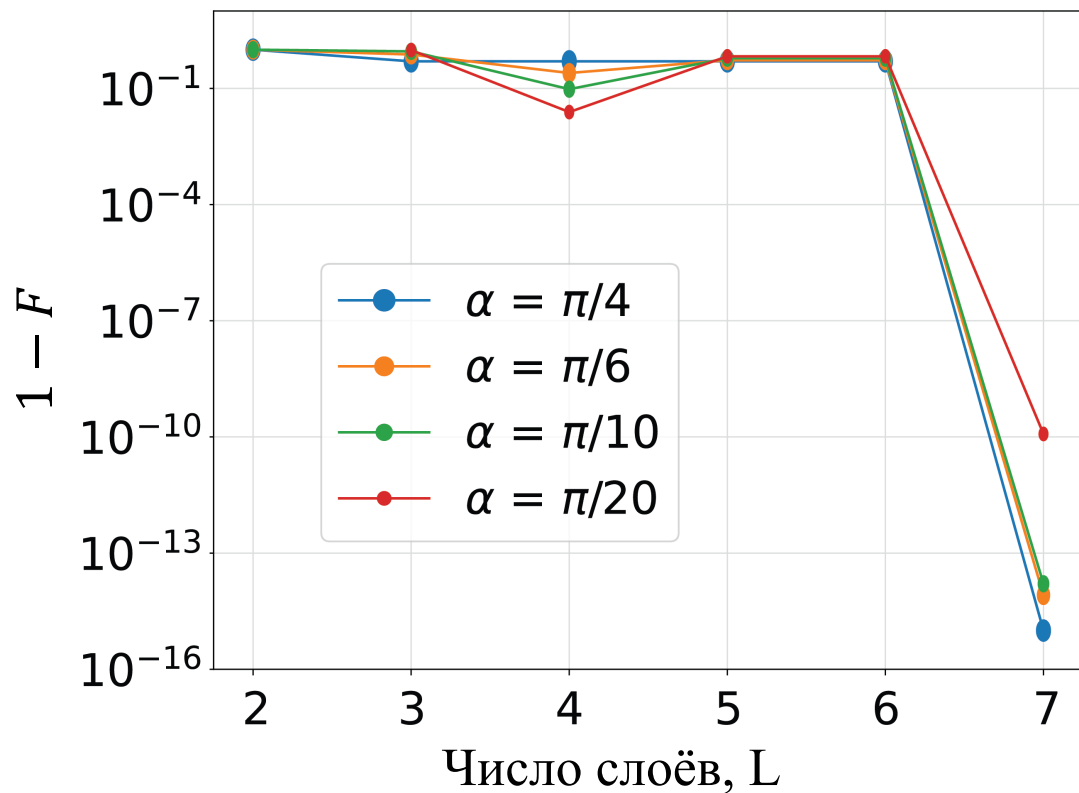


Выходные состояния

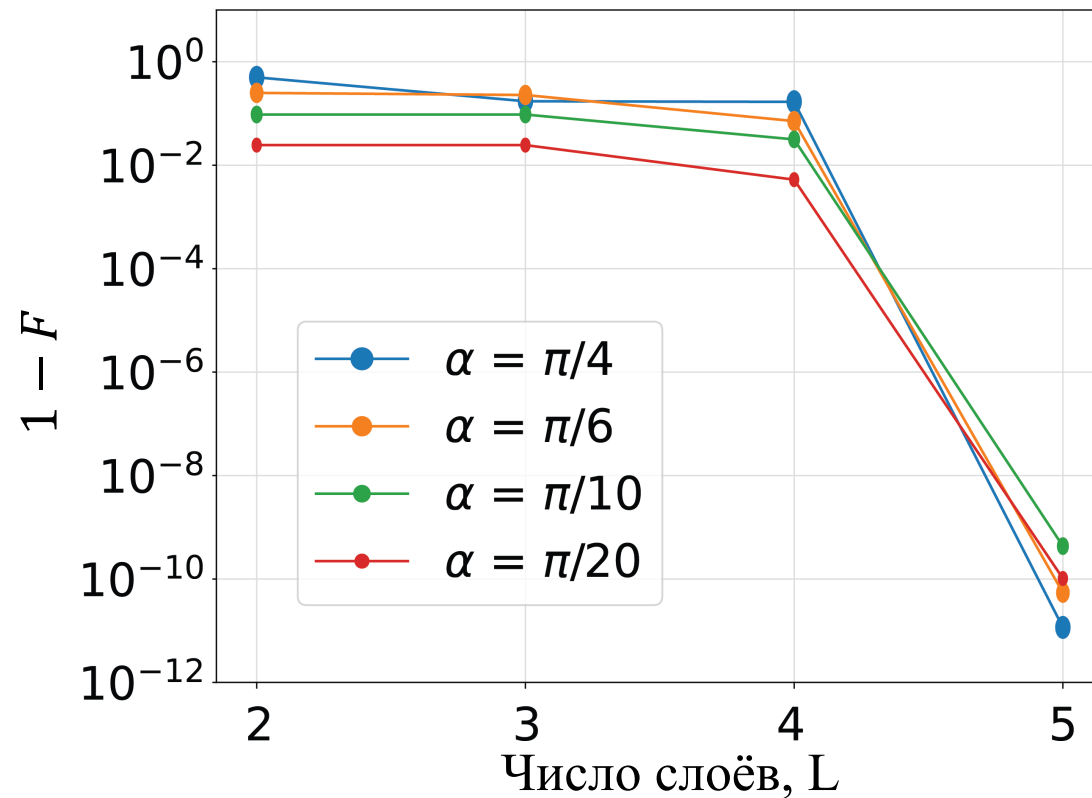
$$|\Psi(\alpha)\rangle = \cos \alpha |0101\rangle + \sin \alpha |1010\rangle$$

ЛО генерация. See, e.g., [S.A.Fldzhyan et. al., arXiv:2204.08788 \(2023\)](https://arxiv.org/abs/2204.08788)

QONN#1: нелинейные интерферометры



QONN#2: многомодовое смешивание



Генерация 3-кубитных состояний

Входное состояние

$$|\psi^{(in)}\rangle = |111000\rangle$$

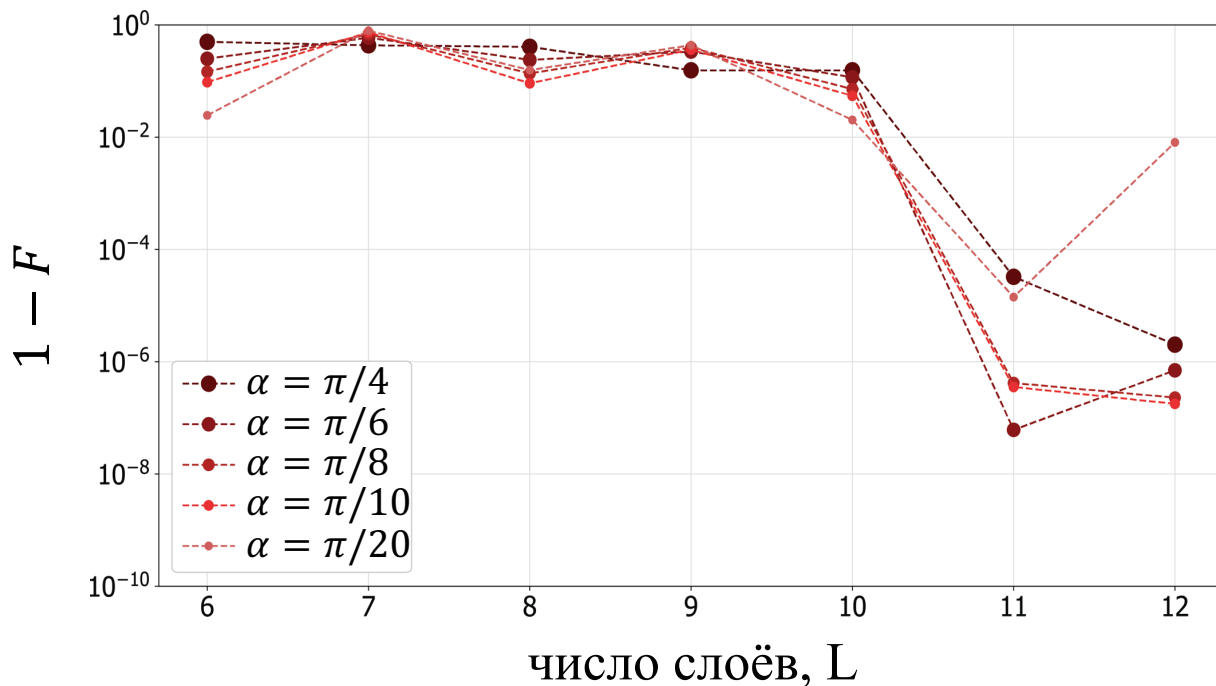
QONN



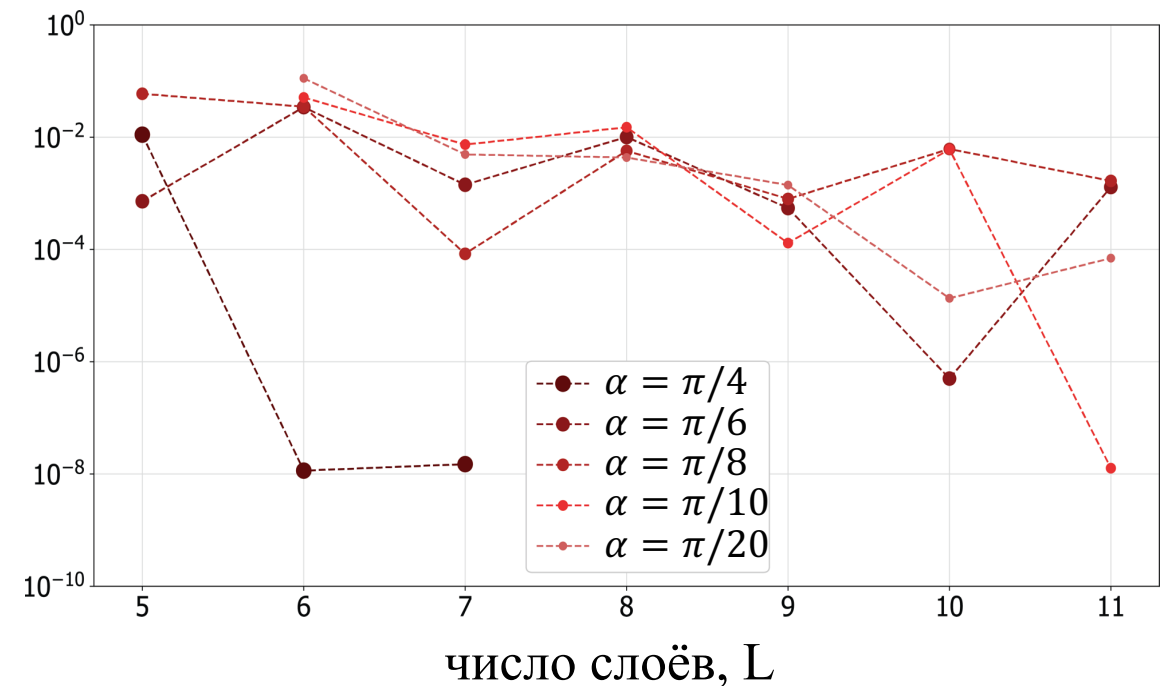
Выходное состояние

$$|\Psi(\alpha)\rangle = \cos \alpha |010101\rangle + \sin \alpha |101010\rangle$$

QONN#1: нелинейные интерферометры



QONN#2: многомодовое смешивание

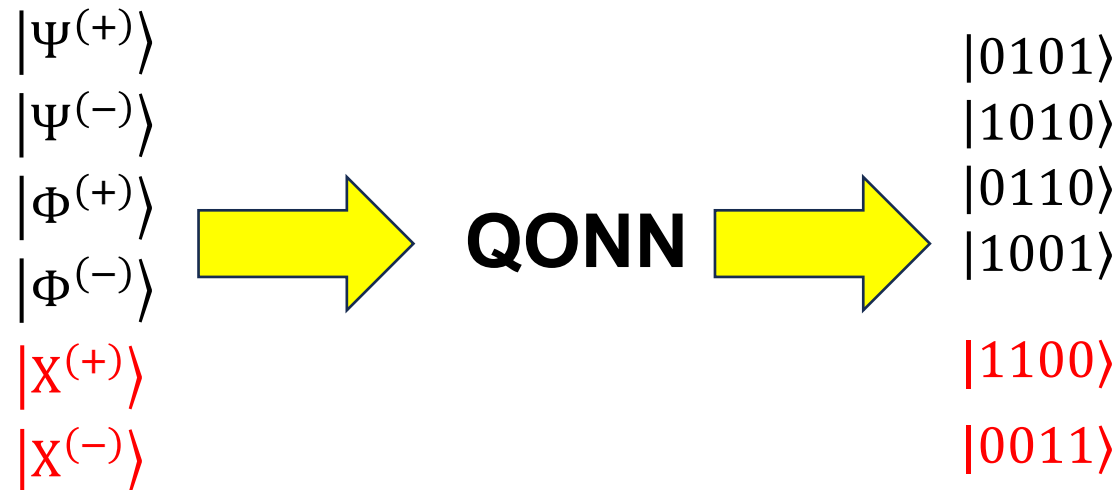


Дискриминатор квантовых состояний

4 состояния Белла:

$$|\Psi^{(\pm)}\rangle = \frac{|0101\rangle \pm |1010\rangle}{\sqrt{2}} \quad |\Phi^{(\pm)}\rangle = \frac{|0110\rangle \pm |1001\rangle}{\sqrt{2}}$$

2 состояния, которые сводятся к $|\Psi^{(\pm)}\rangle$ и $|\Phi^{(\pm)}\rangle$ линейной оптикой: $|X^{(\pm)}\rangle = \frac{|1100\rangle \pm |0011\rangle}{\sqrt{2}}$



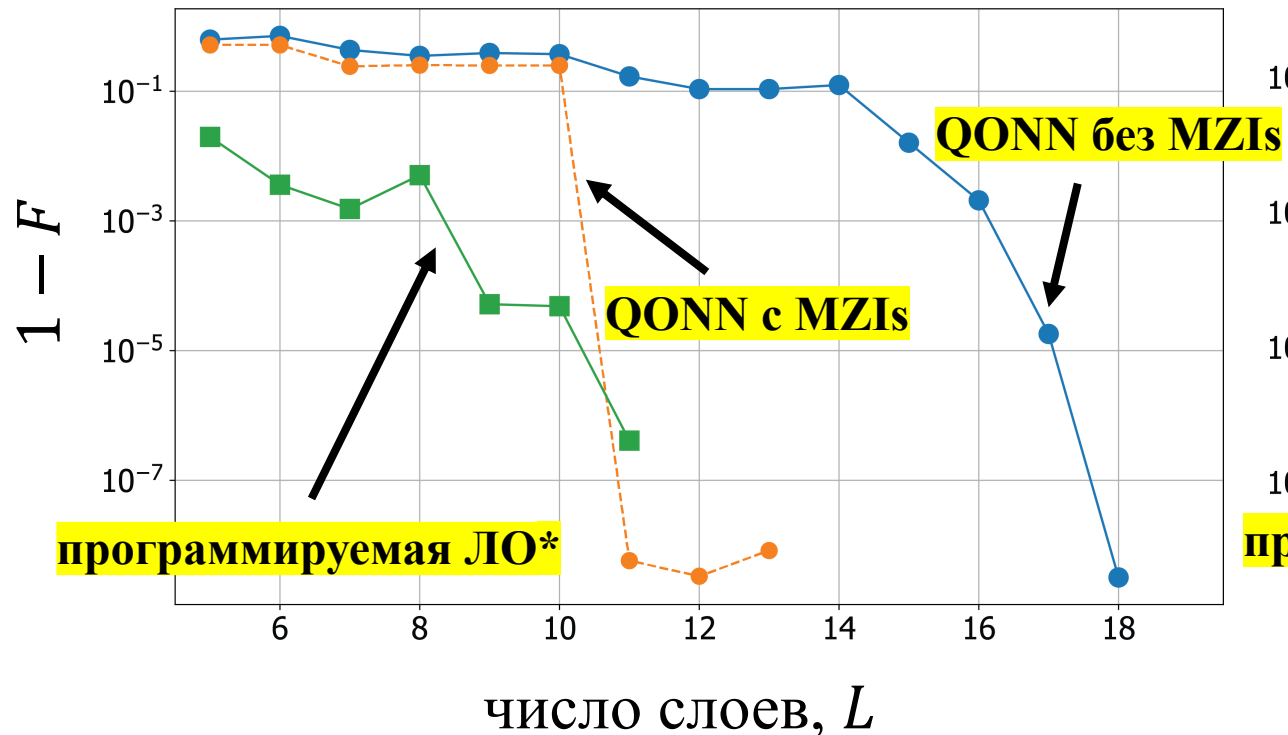
В ЛО схемах невозможно однозначно (со 100% вероятностью) различить состояния Белла!

Максимальная вероятность (без дополнительных ресурсов) = 50:

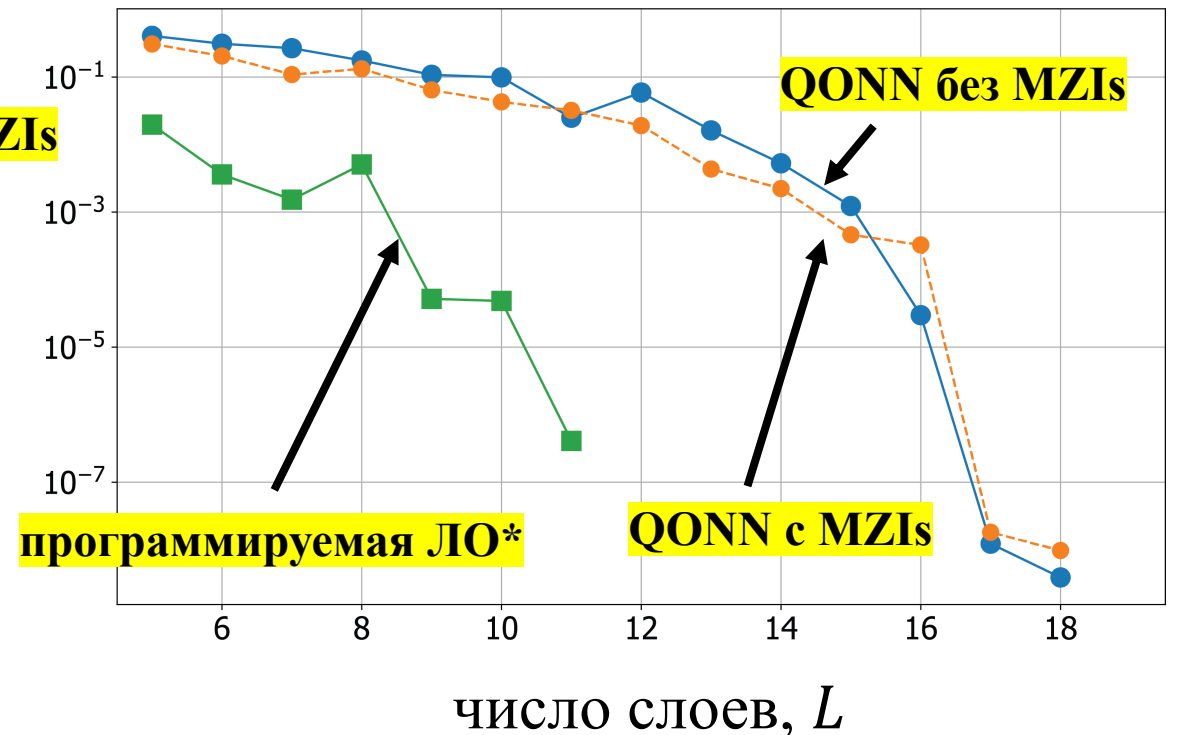
J. Calsamiglia & N. Lutkenhaus, Appl. Phys. B 72, p. 67-71 (2001)

Дискриминатор 4 состояний: $|\Psi^{(\pm)}\rangle$ и $|\Phi^{(\pm)}\rangle$

QONN#1: нелинейные интерферометры



QONN#2: многомодовое смешивание

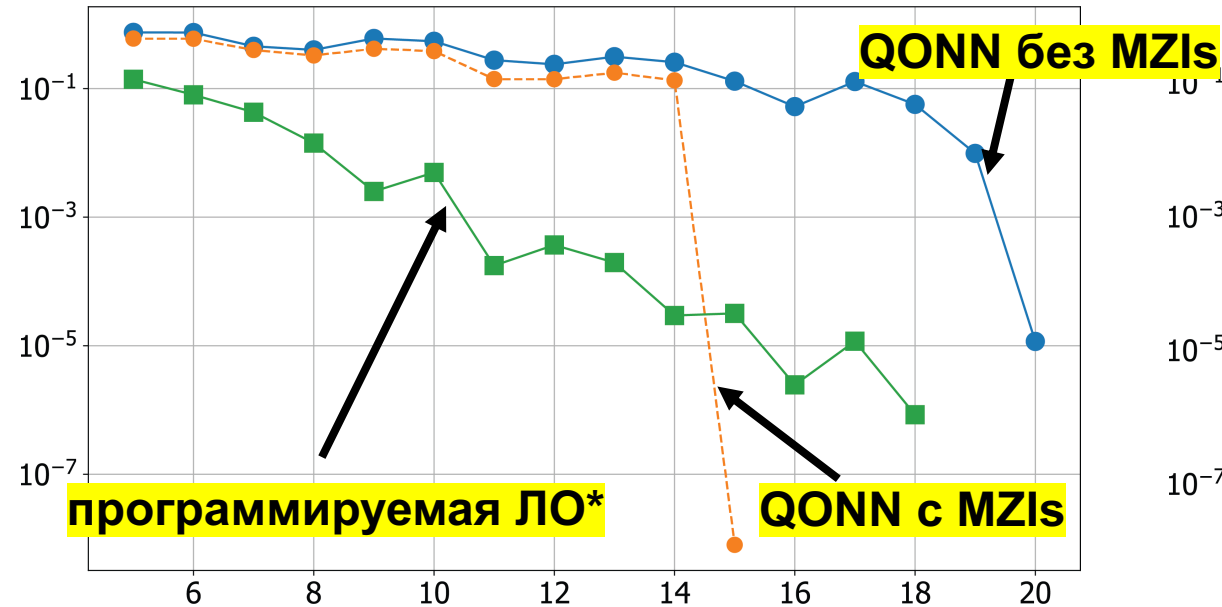


Фиделити: $F(\chi) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 |\langle \psi^{(j)} | \psi^{(out)}(\chi) \rangle|^2$

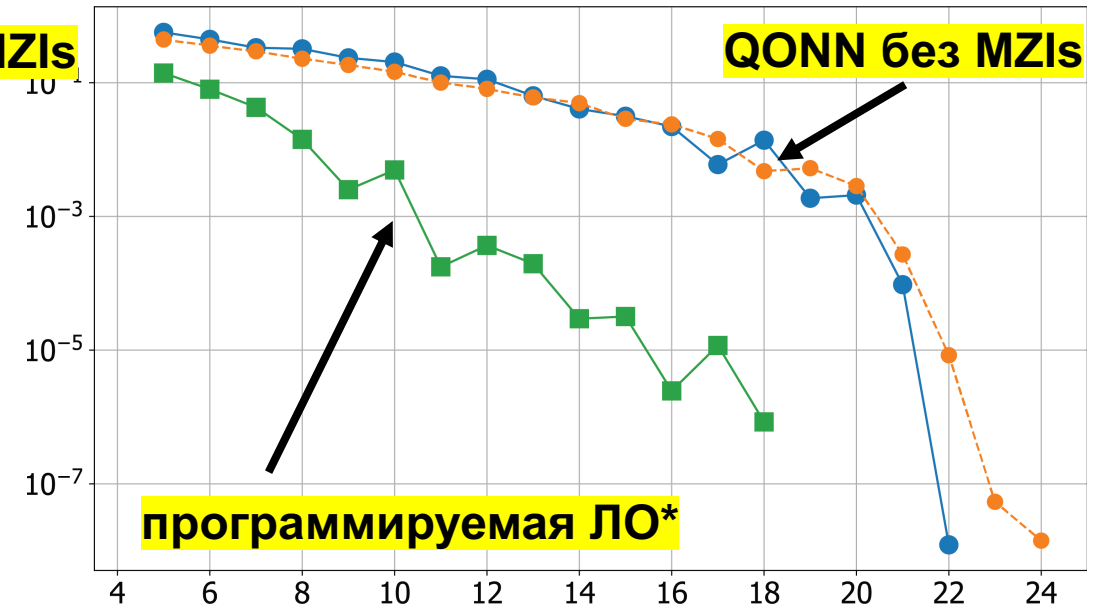
Результаты для программируемой ЛО: [J.Ewaniuk et al., Adv. Quant. Tech. 6, 2200125](#)

Дискриминатор 6 состояний: $|\Psi^{(\pm)}\rangle$, $|\Phi^{(\pm)}\rangle$ и $|X^{(\pm)}\rangle$

QONN#1: нелинейные интерферометры



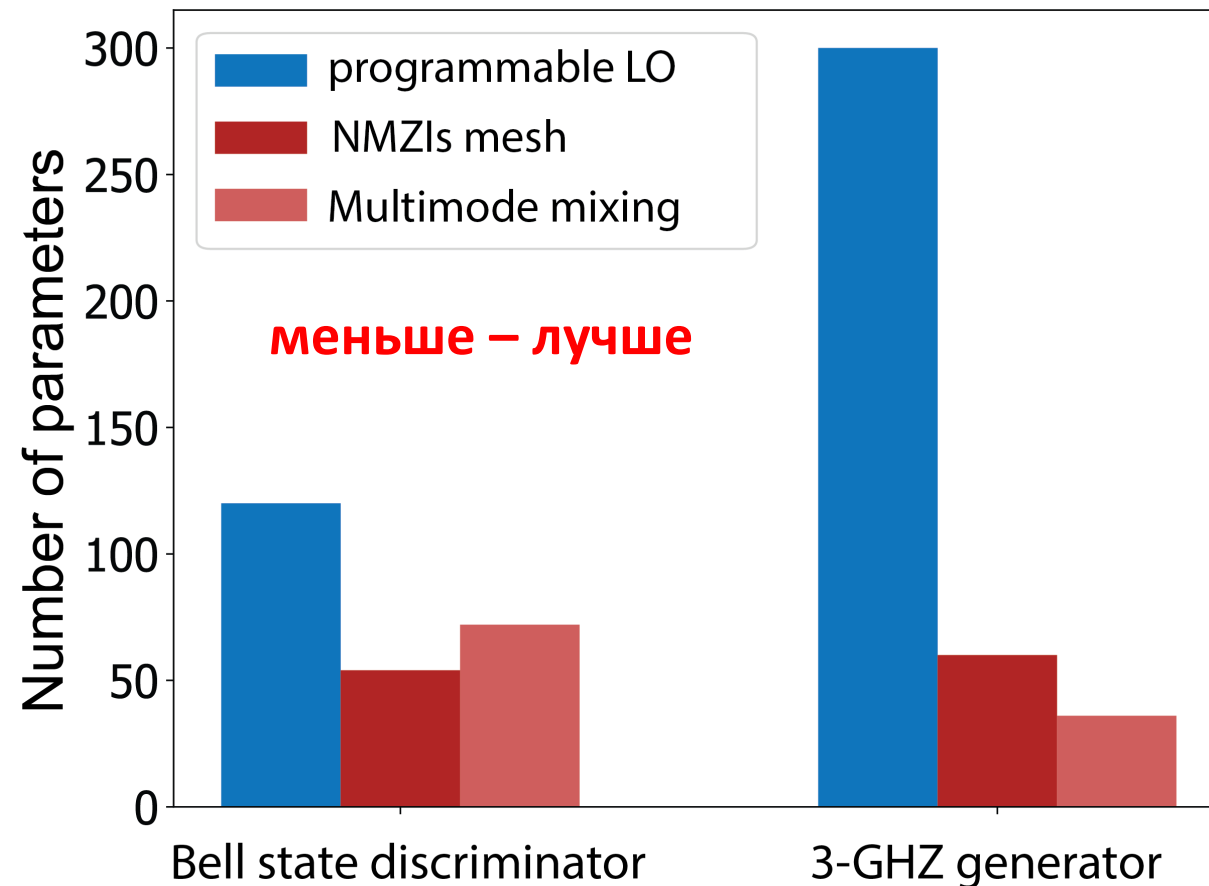
QONN#2: многомодовое смешивание



Фиделити:
$$F(\chi) = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 |\langle \psi^{(j)} | \psi^{(out)}(\chi) \rangle|^2$$

Сравнение QONNs

Для QONNs с программируемыми нелинейностями требуется меньше параметров, чем QONNs с программируемой линейной оптикой



QONNs с программируемой линейной оптикой:

[G.R.Steinbrecher et al., NPJ Quan. Inf. 5, 60 \(2019\)](#)

[J.Ewaniuk et al., Adv. Quant. Tech. 6, 2200125 \(2023\)](#)

Заключение

- QONNs с программируемыми нелинейностями χ могут быть лучше QONNs с программируемой линейной оптикой θ .
- Тренировка нелинейностей χ и линейной оптики θ в QONNs еще лучше.