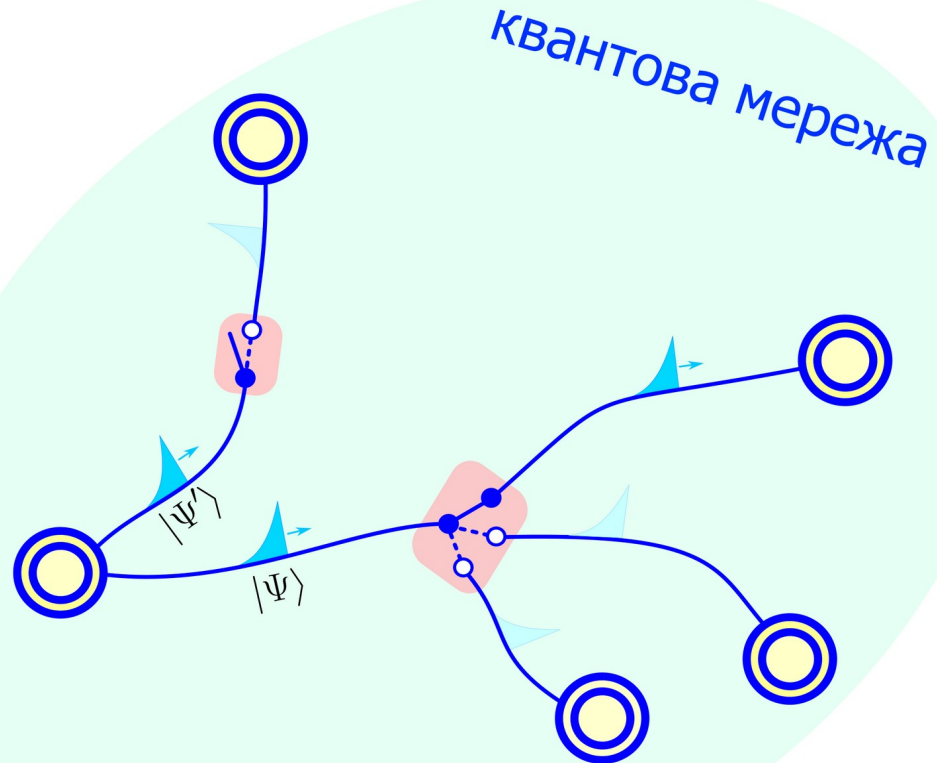


Однофотонний перемикач контрольований штучним атомом вбудованим у модифіковане електромагнітне оточення

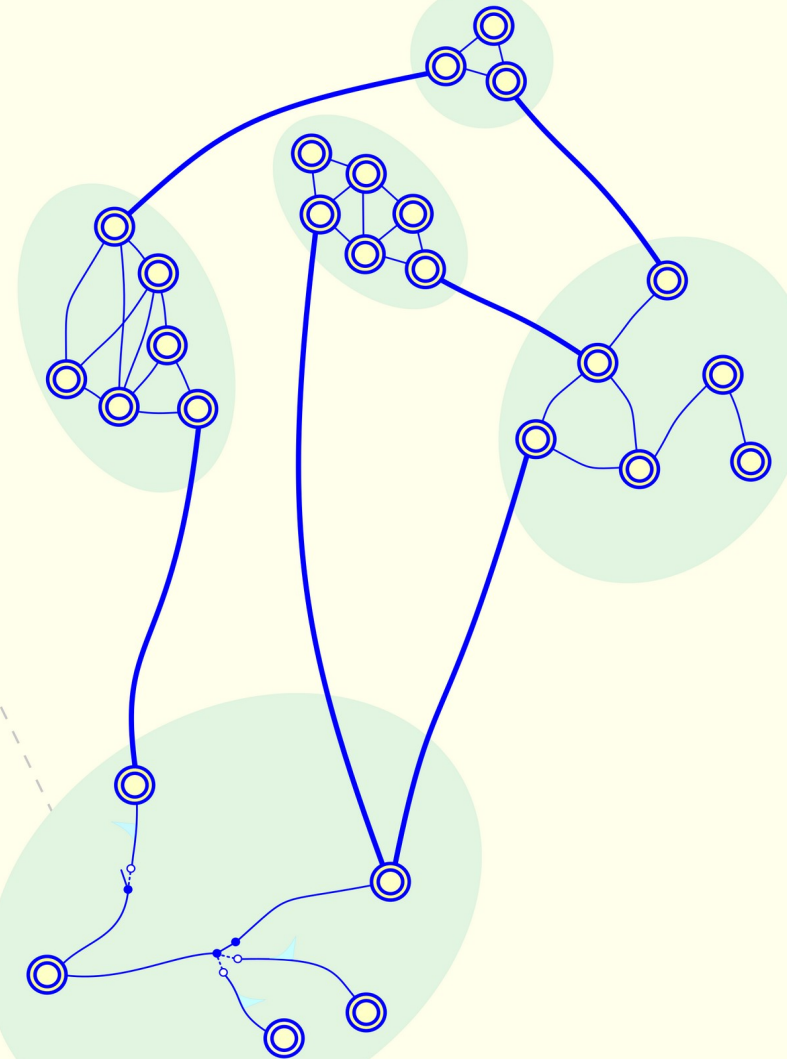
Євген Столяров, відділ теоретичної фізики



Актуальність: квантові мережі^{1,2}, квантовий інтернет²



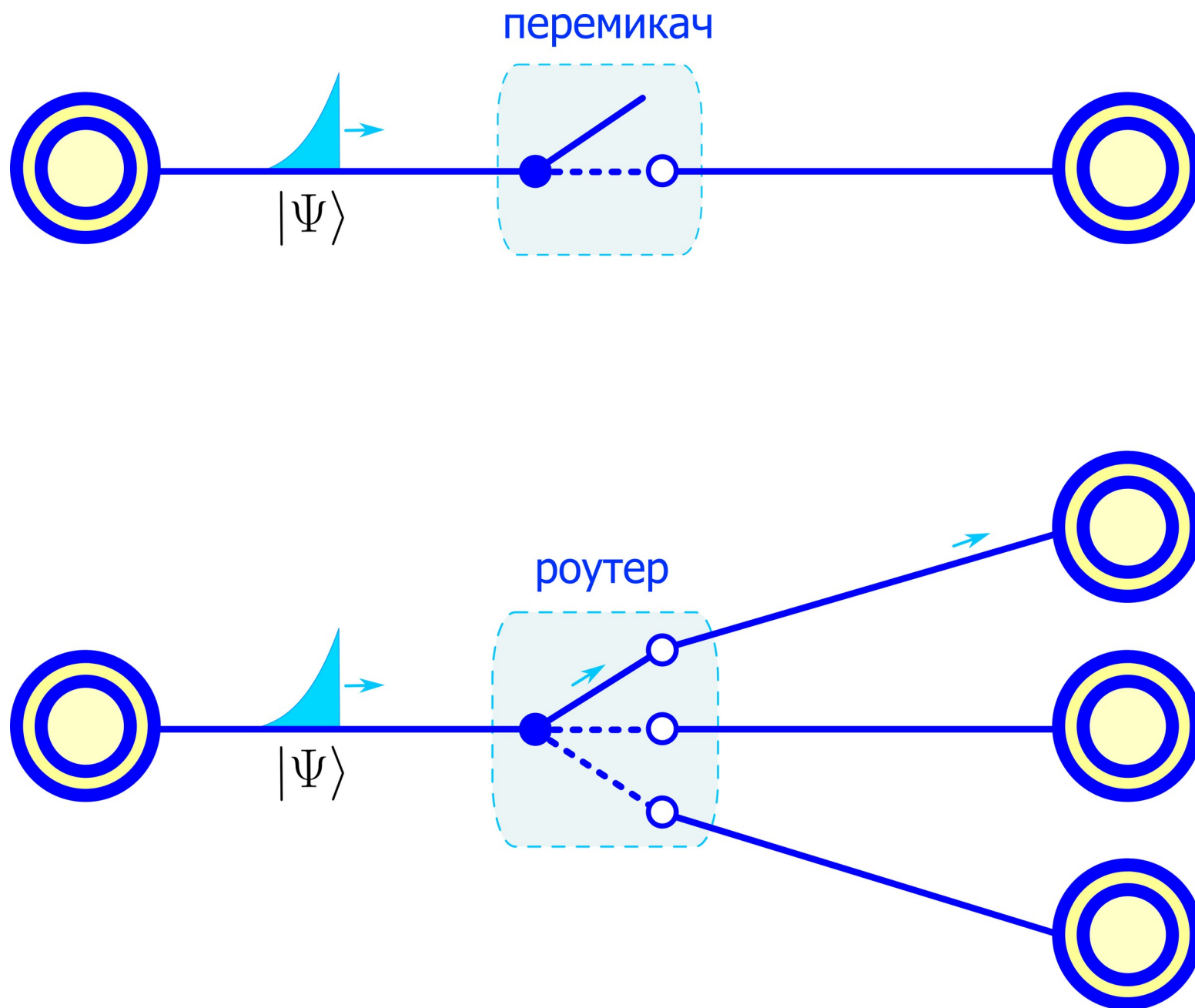
квантовий інтернет



¹A. Reiserer and G. Rempe, Rev. Mod. Phys. **87**, 1379 (2015).

²H. J. Kimble, Nature (London) **453**, 1023 (2008).

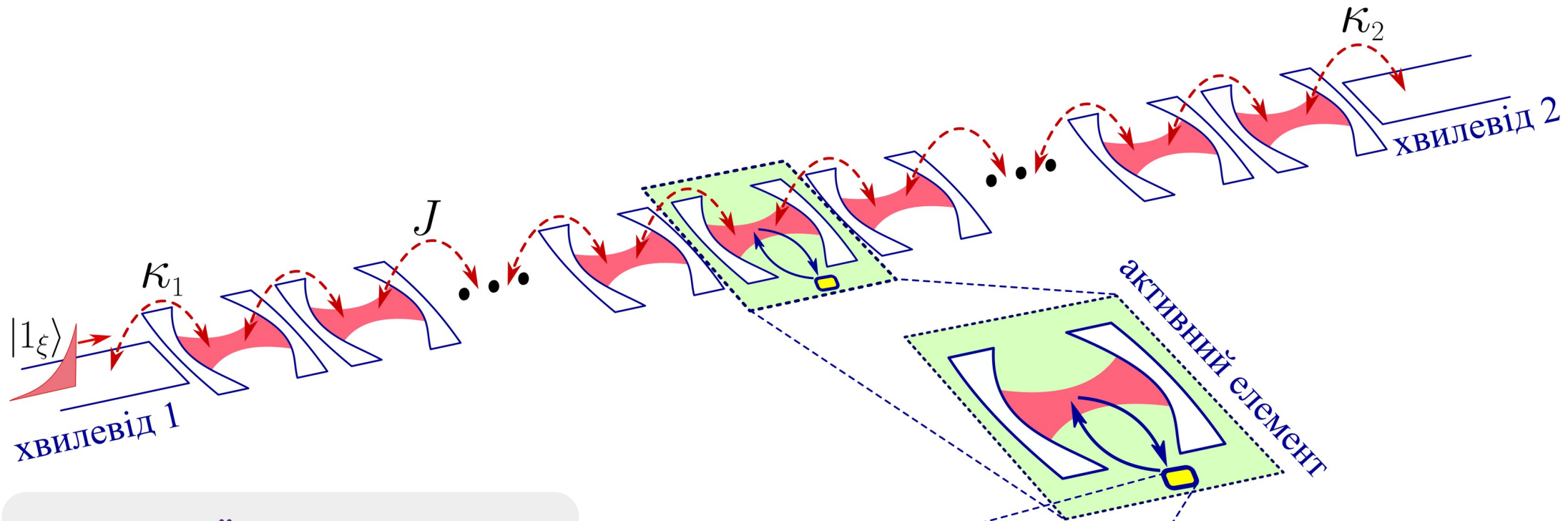
Актуальність: контроль фотонів (фотонні перемикачі та роутери^{3,4})



³L. Zhou, Z. R. Gong, Y.-x. Liu, C. P. Sun, and F. Nori, Phys. Rev. Lett. **101**, 100501 (2008).

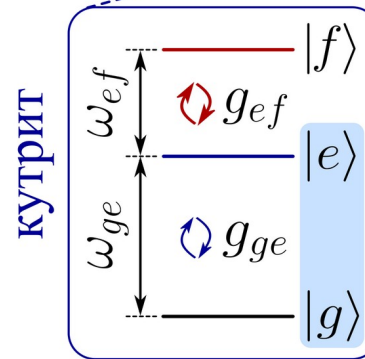
⁴L. Zhou, L.-P. Yang, Y. Li, and C. P. Sun, Phys. Rev. Lett. **111**, 103604 (2013).

Схема однофотонного перемикача



ПРИНЦИП ДІЇ ПРИСТРОЮ:

- **ДИПОЛЬНО-ІНДУКОВАНЕ ВІДБИТТЯ**^{5,6}
- **ПРИГНІЧЕННЯ СПОНТАННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У ФОТОННІЙ ЗАБОРОНЕНІЙ ЗОНІ**^{7,8,9}



⁵ E. Waks and J. Vuckovic, Phys. Rev. Lett. **96**, 153601 (2006).

⁶ A. Auffèves-Garnier, C. Simon, J.-M. Gérard, and J.-P. Poizat, Phys. Rev. A **75**, 053823 (2007).

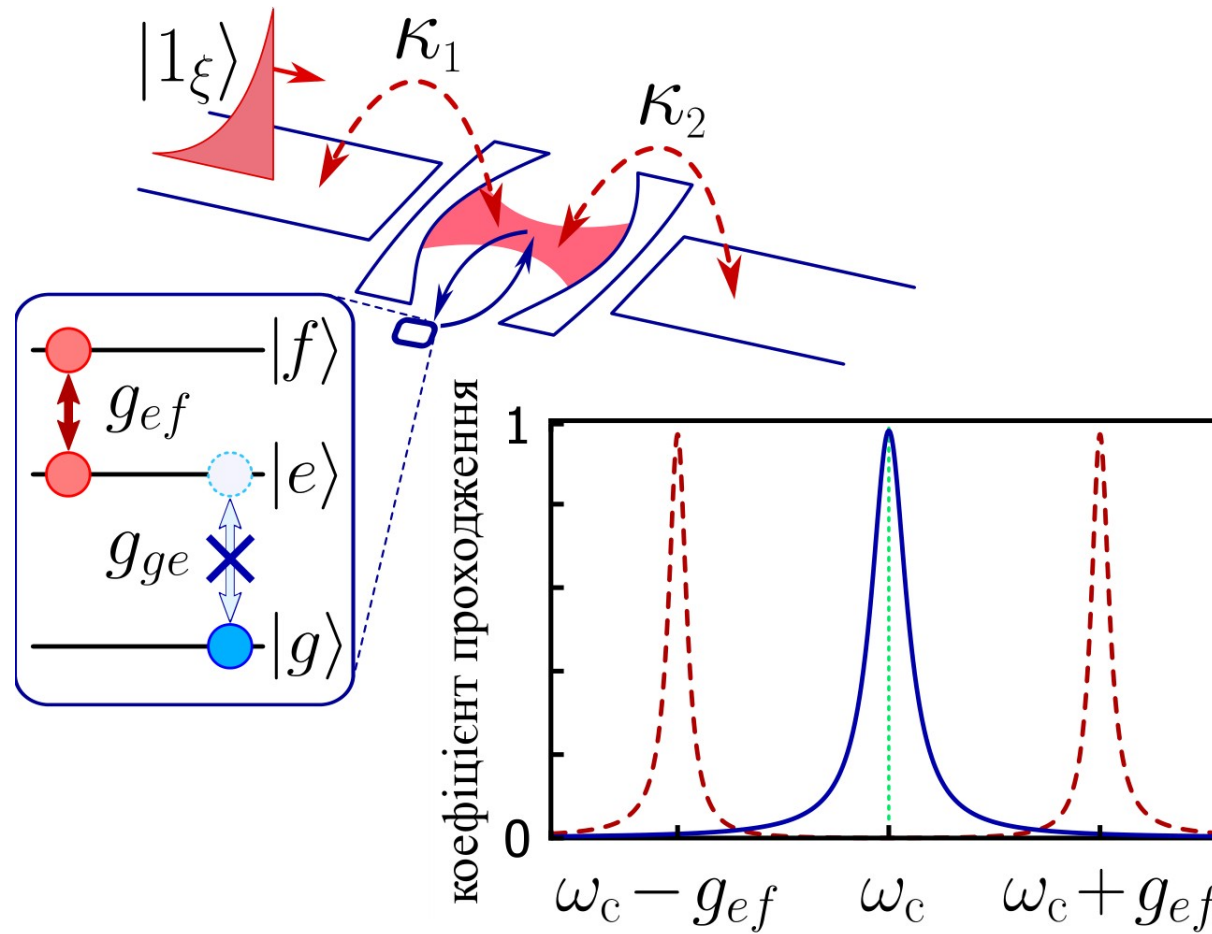
⁷ A.V. P. Bykov, Sov. J. Quantum Electron. **4**, 861 (1975).

⁸ E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987).

⁹ S. John and J. Wang, Phys. Rev. Lett **64**, 2418 (1990).

Дипольно-індуковане відбиття (*dipole-induced reflection*)^{3,4}

СПРОЩЕНА СХЕМА ПЕРЕМИКАЧА



ПЕРЕХІД $|e\rangle \leftrightarrow |f\rangle$ В РЕЗОНАНСІ: $\omega_r \approx \omega_{ef}$

частота фотона

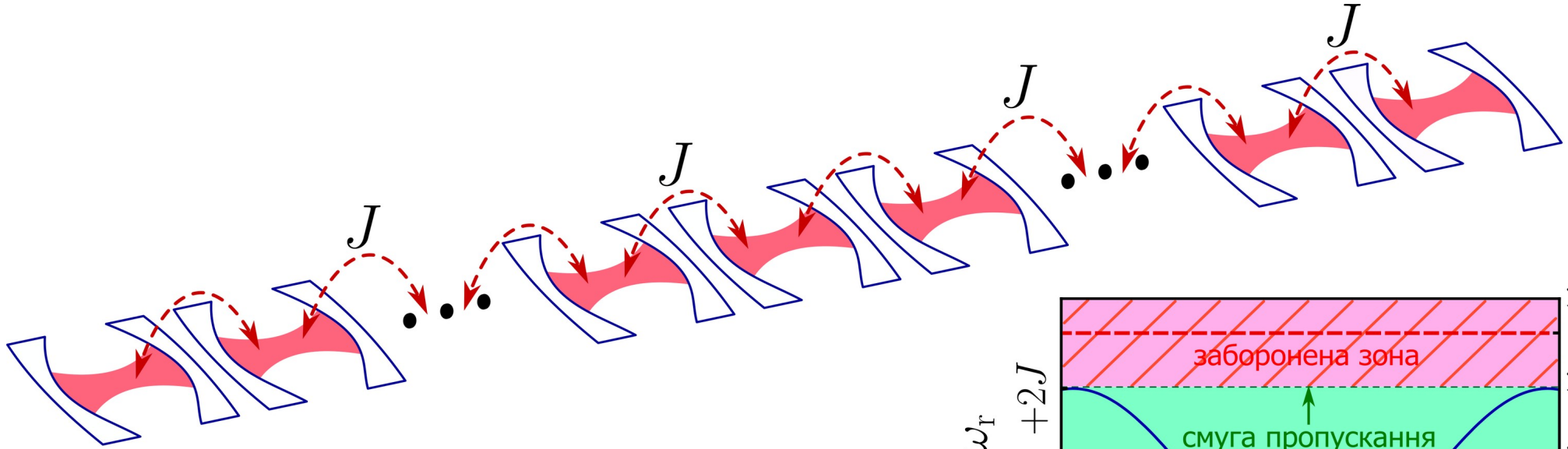
ВЗАЄМОДІЯ $|g\rangle \leftrightarrow |e\rangle$ З РЕЗОНАТОРОМ – ДИСПЕРСНА (*dispersive*)⁹: $g_{ge}/|\omega_{ef} - \omega_r| \ll 1$

ОБМЕЖЕННЯ СПРОЩЕНОЇ СХЕМИ – ПАРСЕЛІВСЬКИЙ РОЗПАД^{9,10} СТАНУ $|e\rangle$

⁹ A. Blais, R.-S. Huang, A. Wallraff, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf, Phys. Rev. A **69**, 062320 (2004).

¹⁰ A. M. Sokolov and E. V. Stolyarov, Phys. Rev. A **101**, 042306 (2020).

Модифіковане (*engineered*) електромагнітне оточення (1D фотонний кристал)

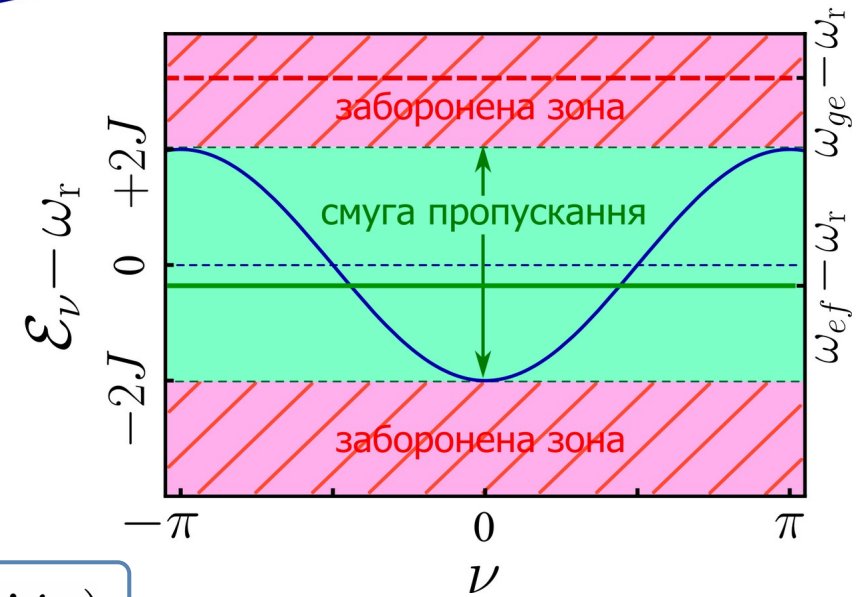


Гамільтоніан ланцюжка резонаторів^{11,12}:

$$\hat{\mathcal{H}} = \sum_{j=1}^N \omega_r a_j^\dagger a_j + J \sum_{j=1}^{N-1} (a_j^\dagger a_{j+1} + a_{j+1}^\dagger a_j)$$

$$A_\nu = \frac{1}{\sqrt{N_{\text{res}}}} \sum_j a_j \exp(-ij\nu)$$

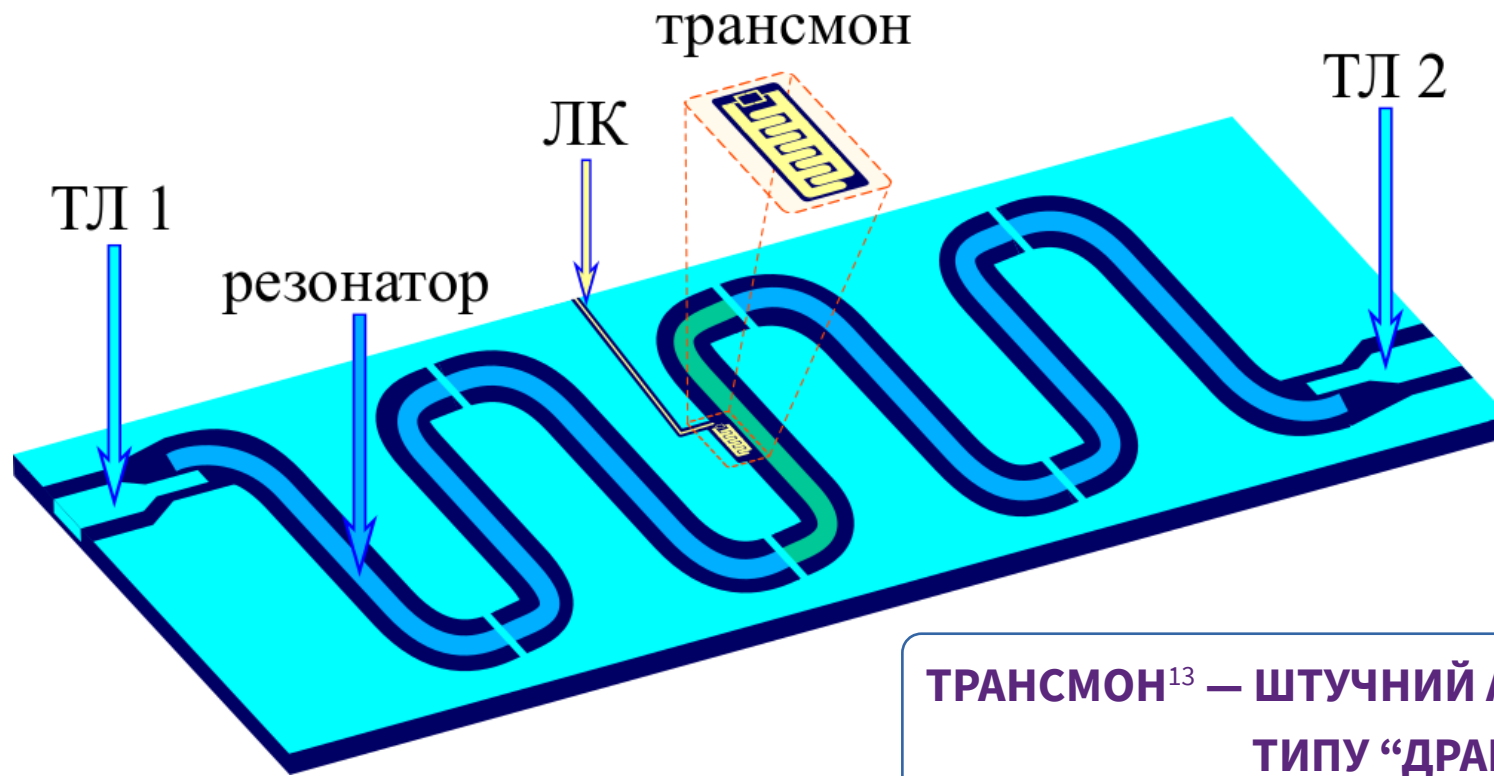
$$\hat{\mathcal{H}} = \sum_{\nu} \overbrace{(\omega_r - 2J \cos \nu)}^{\varepsilon_\nu} A_\nu^\dagger A_\nu$$



¹¹ L. Tan and L. Hai, J. Phys. B **45**, 035504 (2012).

¹² P. Longo, P. Schmitteckert, and K. Busch, Phys. Rev. A **83**, 063828 (2011).

Реалізація в надпровідній архітектурі (*superconducting circuit QED*)



ТРАНСМОН¹³ — ШТУЧНИЙ АТОМ ЗІ СТРУКТУРОЮ РІВНІВ
ТИПУ “ДРАБИНА” (*ladder-type system*)

ПЕРЕВАГИ: ВИСОКІ ЧАСИ КОГЕРЕНТНОСТІ (~ 0.1 ms)¹⁴
РЕГУЛЬОВАНІ ПАРАМЕТРИ¹⁵

РЕЗОНАТОР — КОПЛАНАРНИЙ ХВИЛЕВОДНИЙ РЕЗОНАТОР (*coplanar waveguide resonator*)¹⁶

ПЕРЕВАГИ: ВИСОКІ ДОБРОТНОСТІ ($Q \sim 10^5$ - 10^6)

МОЖЛИВІСТЬ З’ЄДНАННЯ У СКЛАДНІ СТРУКТУРИ (ланцюжки¹⁷, решітки¹⁸)

¹³ J. Koch, *et al.*, Phys. Rev. A **76**, 042319 (2007).

¹⁶ A. Megrant, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **100**, 113510 (2012).

¹⁴ G. Park, *et al.*, J. Korean Phys. Soc. **76**, 1029 (2020).

¹⁷ M. Fitzpatrick, *et al.*, Phys. Rev. X **7**, 011016(2017).

¹⁵ Y. Chen, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 220502 (2014).

¹⁸ D. L. Underwood, W. E. Shanks, J. Koch, and A. A. Houck, Phys. Rev. A **86**, 023837 (2012).

Ефективність пристрою: контраст перемикання

ХАРАКТЕРИСТИКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИСТРОЮ – КОНТРАСТ ПЕРЕМІКАННЯ

$$\mathcal{C} = \mathcal{T}_g - \mathcal{T}_e$$

$\mathcal{T}_q$ – ймовірність проходження фотона, якщо кубіт приготований у стані $|q\rangle$

$$\mathcal{T}_q(t) = \int_0^\infty d\omega \left| \langle \psi_{2,\omega}^q(t) | \Psi_{\text{in}}^q \rangle \right|^2, \quad q \in \{g, e\}$$

КІНЦЕВИЙ СТАН СИСТЕМИ: $|\psi_{2,\omega}^q(t)\rangle = b_{2,\omega}^\dagger(t) |\emptyset_q\rangle$, $|\emptyset_q\rangle = |q\rangle |\emptyset\rangle_{\text{w1}} |\emptyset\rangle_{\text{w2}} \bigotimes_{n=-N}^N |\emptyset\rangle_{nr}$

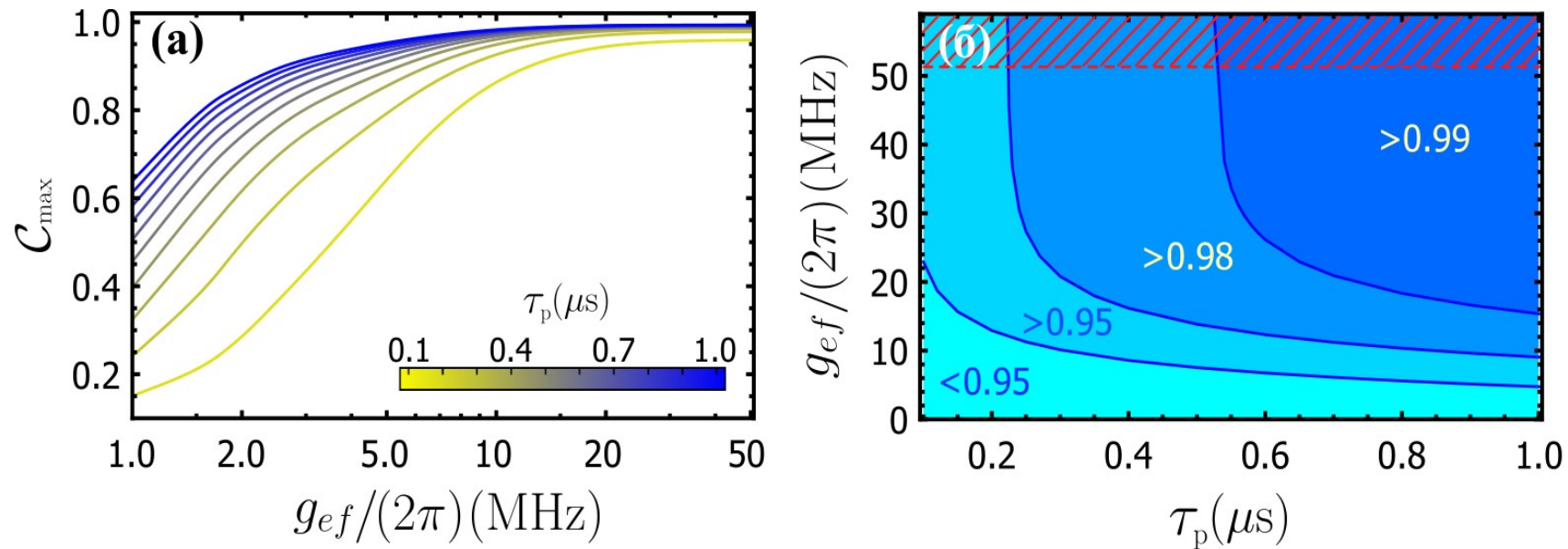
ПОЧАТКОВИЙ ($t=0$) СТАН СИСТЕМИ: $|\Psi_{\text{in}}^q\rangle = |q\rangle |1_\xi\rangle_{\text{w1}} |\emptyset\rangle_{\text{w2}} \bigotimes_{n=-N}^N |\emptyset\rangle_{nr}$

ВХІДНИЙ ХВИЛЬОВИЙ ПАКЕТ: $|1_\xi\rangle_{\text{w1}} \equiv \int_0^\infty d\omega \xi(\omega) b_{1,\omega}^\dagger(0) |\emptyset\rangle_{\text{w1}}$,

Спектральний розподіл: $\xi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau_p}} \left[(\omega - \omega_0) + \frac{i}{2\tau_p} \right]^{-1}$

ТЕПЛОВИМИ ЗБУДЖЕННЯМИ НЕХТУЄМО: $k_B T_s \ll \hbar\omega_s$, $T_s \sim 10 - 20 \mu\text{K}$, $\omega_s \sim (2\pi)5 - 10 \text{ GHz}$

Контраст перемикання: результати



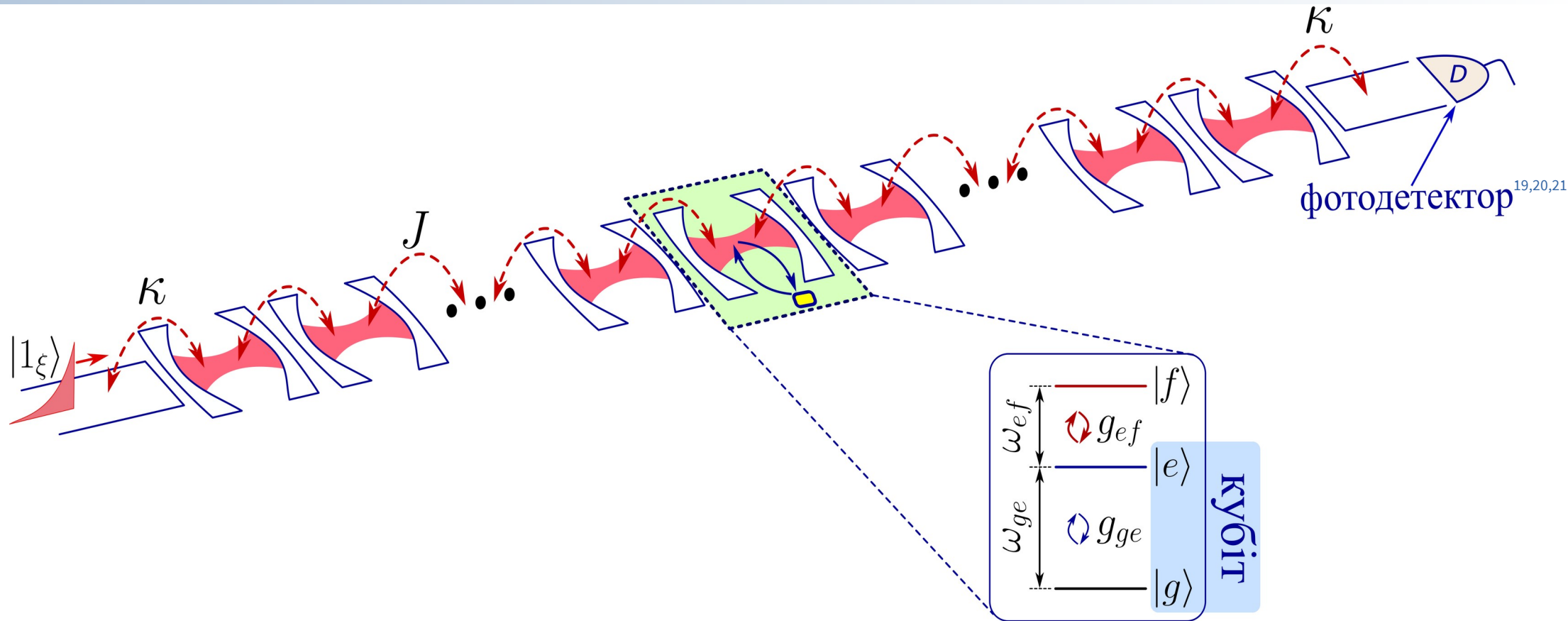
Залежність контрасту перемикання від параметрів системи

ОСНОВНИЙ ФАКТОР, ЩО ОБМЕЖУЄ КОНТРАСТ — ТРИВАЛІСТЬ ВХІДНОГО ІМПУЛЬСУ

РЕАЛІСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ПРИСТРОЮ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ВИСОКИЙ ($C>0.95$) КОНТРАСТ

$\omega_r/2\pi$ (GHz)	$\omega_c/2\pi$ (GHz)	$\omega_{ge}/2\pi$ (GHz)	$\omega_{ef}/2\pi$ (MHz)	$\alpha/2\pi$ (GHz)	$J/2\pi$ (MHz)	$\kappa/2\pi$ (MHz)	$g_{ef}/2\pi$ (MHz)	τ_p (μs)	C
7.000	7.004	7.360	7.011	-349.48	20.0	45.0	50.0	0.06	0.952
7.000	7.002	7.360	7.007	-353.29	12.0	28.0	40.0	0.30	0.985
7.000	7.001	7.360	7.004	-356.24	10.5	24.0	30.0	0.60	0.991

Неруйнівне вимірювання стану кубіта однофотонним імпульсом



КУБІТ ПРИГОТОВАНИЙ У СТАНІ

$|g\rangle \longrightarrow$ **ФОТОН ПРОХОДИТЬ** $\longrightarrow$ **ФОТОВІДЛІК**

$|e\rangle \longrightarrow$ **ФОТОН ВІДБИВАЄТЬСЯ** $\longrightarrow$ **ФОТОВІДЛІКУ НЕМАЄ**

¹⁹ S. Kono, K. Koshino, Y. Tabuchi, A. Noguchi, and Y. Nakamura, Nat. Phys. **14**, 546 (2018).

²⁰ R. Lescanne, *et al.*, Phys. Rev. X **10**, 021038 (2020).

²¹ R. Dassonneville, R. Assouly, T. Peronnin, P. Rouchon, and B. Huard, Phys. Rev. Appl. **14**, 044022 (2020).

- ◆ Теоретично продемонстровано нову схему однофотонного перемикача та детально досліджено її ефективність
- ◆ Продemonстровано реалістичний варіант експериментальної реалізації перемикача у надпровідних квантових електричних колах (*superconducting circuit QED architecture*)
- ◆ Запропоновано використання цього пристрою для неруйнівного вимірювання стану кубіта

Single-photon switch controlled by a qubit embedded in an engineered electromagnetic environmentE. V. Stolyarov **Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Nauky 46, 03028 Kyiv, Ukraine*

(Received 7 September 2020; revised 9 November 2020; accepted 30 November 2020; published 10 December 2020)

A single-photon switch is an important element for the building of scalable quantum networks. In this paper, we propose a feasible scheme for efficient single-photon switching. The proposed switch is controlled by a state of a qubit formed by the pair of the lowest levels of a three-level system (qutrit) coupled to a resonator. This resonator-qutrit system comprises a switching unit of the considered setup. For suppression of the Purcell relaxation of the control qubit, the switching unit is embedded into a coupled-resonator array serving as an engineered electromagnetic environment with a band gap on a qubit transition frequency. We discuss the possible implementation of the considered single-photon switch on the microwave circuit QED architecture. We demonstrate that high switching contrasts can be attained for the parameters achievable for the state-of-the-art superconducting circuit QED setups.

DOI: [10.1103/PhysRevA.102.063709](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.063709)

E. V. Stolyarov, *Single-photon switch controlled by a qubit embedded in an engineered electromagnetic environment*, Phys. Rev. A **102**, 063709 (2020)

Дякую за увагу!