МФТИ

Лаборатория искусственных квантовых систем

Royal Holloway University of London

Эффекты волнового смешения при рассеянии микроволн на сверхпроводниковом кубите

(по материалам кандидатской диссертации)

Алексей Дмитриев, м.н.с., МФТИ

Научный руководитель: Астафьев О.В., к.ф.-м. н., профессор

Семинар ЦКТ МГУ, 15.09.2021

План доклада

1. О докладчике
2. Сверхпроводниковые кубиты – искусственные атомы
3. Резонансное рассеяние волны на кубите
4. Нелинейное смешение двух резонансных гармоник (стационарный режим)
5. Смешение для синхронных и последовательных импульсов
6. Смешение на Δ-системе
7. Кубит в линии как сенсор фотонной статистики
8. Дальнейшие планы

О докладчике

О докладчике

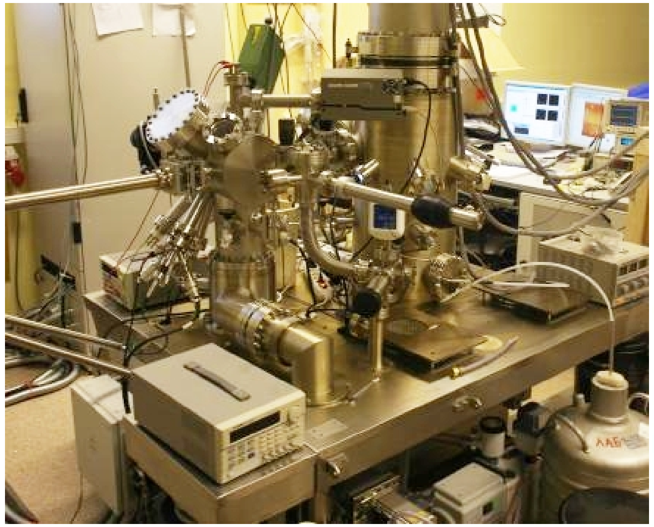
- 2008-2014 – студент МФТИ, факультет физической и квантовой электроники

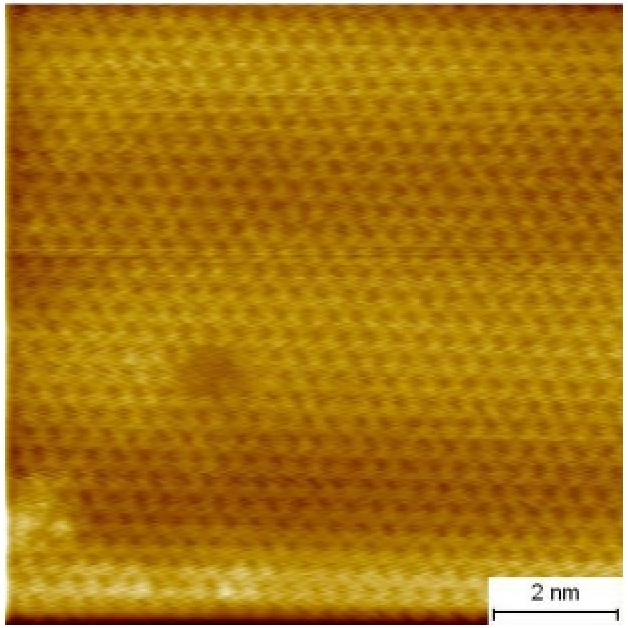
О докладчике

- 2008-2014 – студент МФТИ, факультет физической и квантовой электроники
- 2011-2014 – инженер ИРЭ РАН, лаборатория низкоразмерных структур атомного масштаба (рук. д.ф-м.н. Зайцев-Зотов С.В.)
  диплом – «Туннельная спектроскопия пов. состояний топ. изолятора Bi_2Se_3»

О докладчике

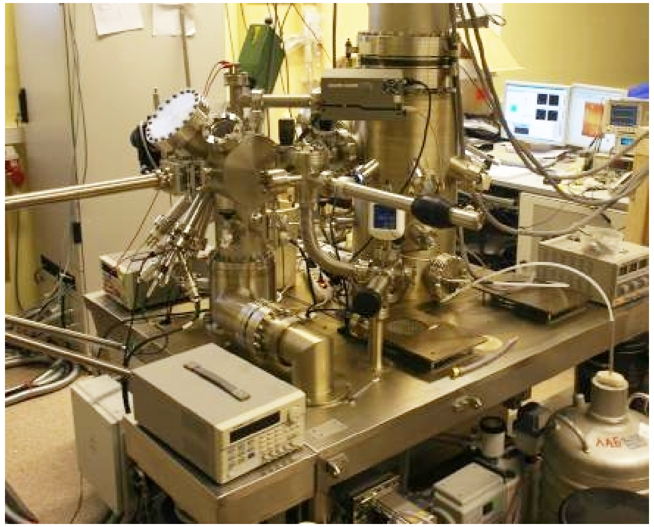
- 2008-2014 – студент МФТИ, факультет физической и квантовой электроники
- 2011-2014 – инженер ИРЭ РАН, лаборатория низкоразмерных структур атомного масштаба (рук. д.ф-м.н. Зайцев-Зотов С.В.)
  диплом – «Туннельная спектроскопия пов. состояний топ. изолятора Bi_2Se_3»

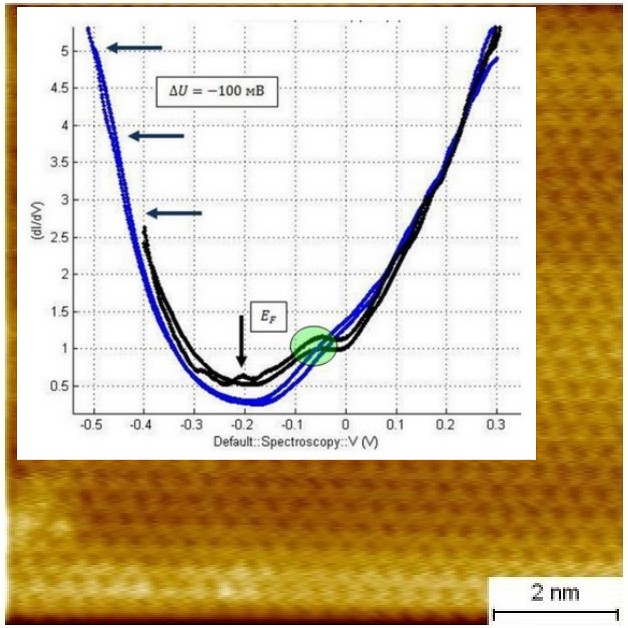




О докладчике

- 2008-2014 – студент МФТИ, факультет физической и квантовой электроники
- 2011-2014 – инженер ИРЭ РАН, лаборатория низкоразмерных структур атомного масштаба (рук. д.ф-м.н. Зайцев-Зотов С.В.)
  диплом – «Туннельная спектроскопия пов. состояний топ. изолятора Bi_2Se_3»

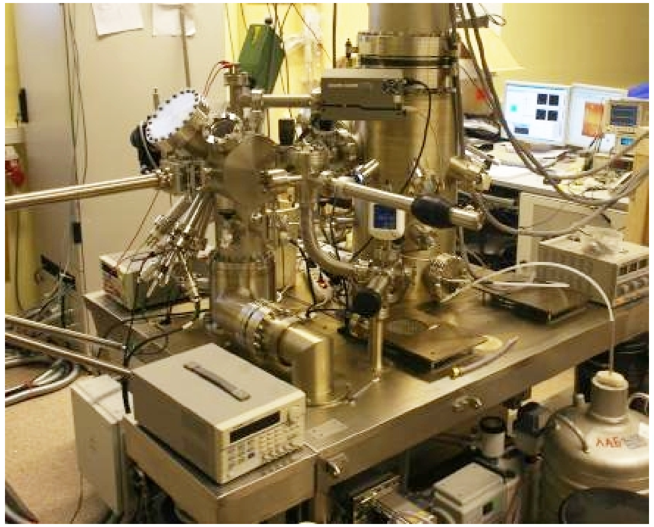


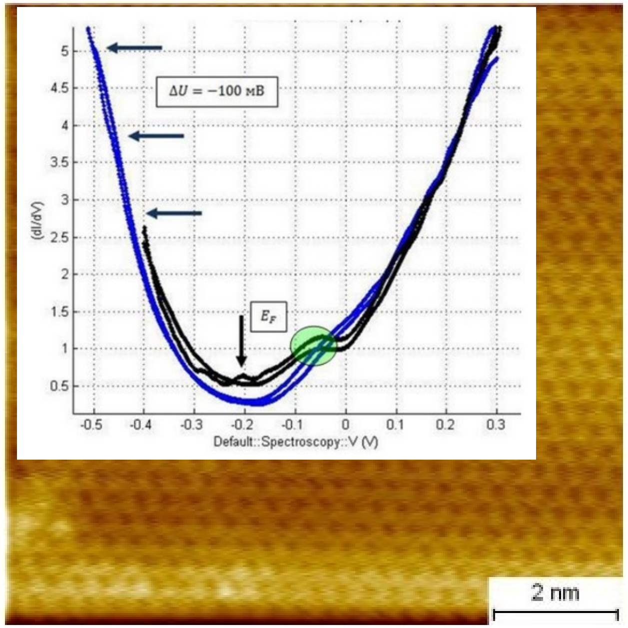


О докладчике

- 2008-2014 – студент МФТИ, факультет физической и квантовой электроники
- 2011-2014 – инженер ИРЭ РАН, лаборатория низкоразмерных структур атомного масштаба (рук. д.ф-м.н. Зайцев-Зотов С.В.)
  диплом – «Туннельная спектроскопия пов. состояний топ. изолятора Bi_2Se_3»
- 2014-2018 – асп. МФТИ
- 2014-2015 стажировка в RHUL и в ИФТТ
- лаборатория искусственных квантовых систем (2015-)
  - квантовая оптика
  - квантовая акустика
  - многокубитные системы

  На сверхпров. кубитах

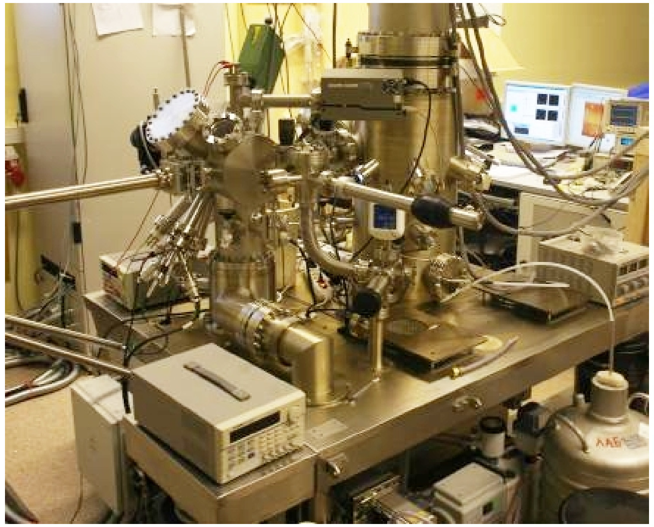


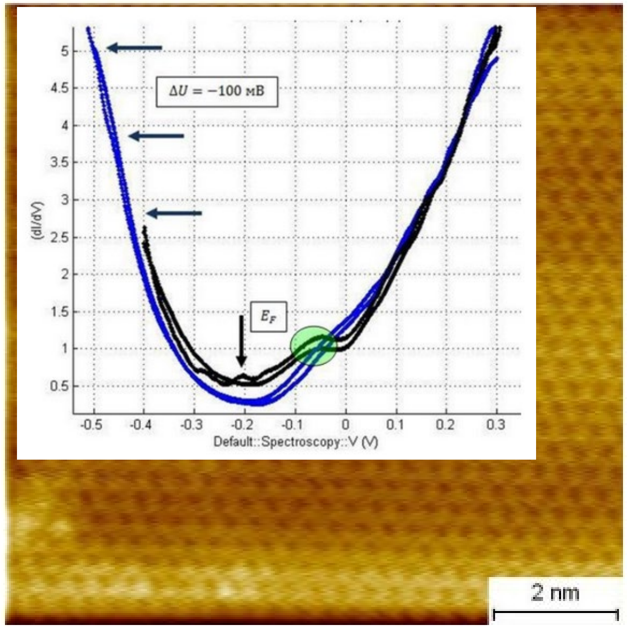


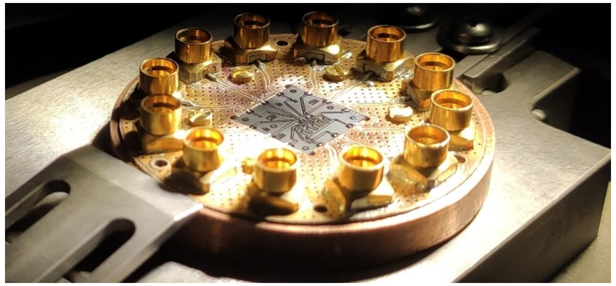
О докладчике

- 2008-2014 – студент МФТИ, факультет физической и квантовой электроники
- 2011-2014 – инженер ИРЭ РАН, лаборатория низкоразмерных структур атомного масштаба (рук. д.ф-м.н. Зайцев-Зотов С.В.)
  диплом – «Туннельная спектроскопия пов. состояний топ. изолятора Bi_2Se_3»
- 2014-2018 – асп. МФТИ
- 2014-2015 стажировка в RHUL и в ИФТТ
- лаборатория искусственных квантовых систем (2015-)
  - квантовая оптика
  - квантовая акустика
  - многокубитные системы

На сверхпров. кубитах







Сверхпроводимость

Сверхпроводимость

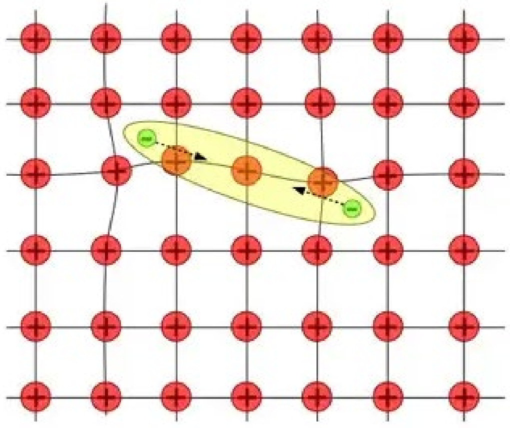
а) конденсат куперовских пар;

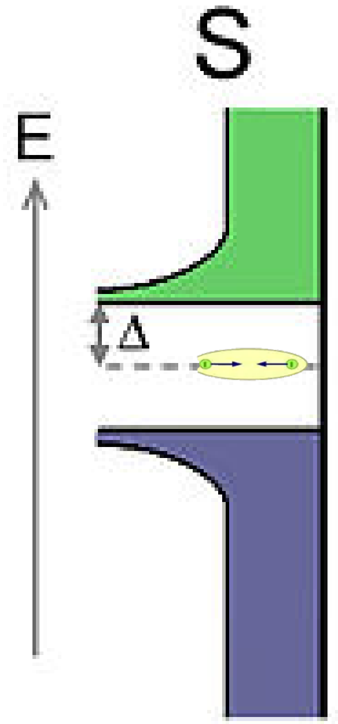
б) щель в спектре возбуждений

Сверхпроводимость

а) конденсат куперовских пар;

б) щель в спектре возбуждений

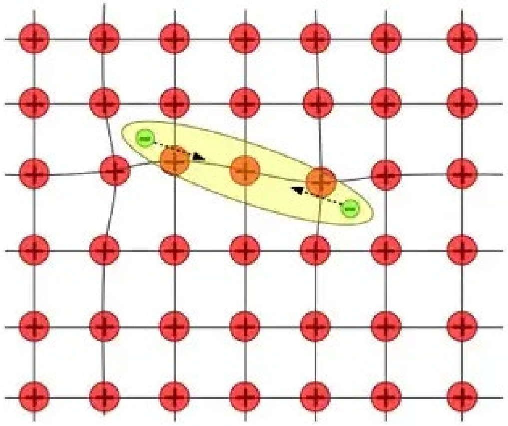


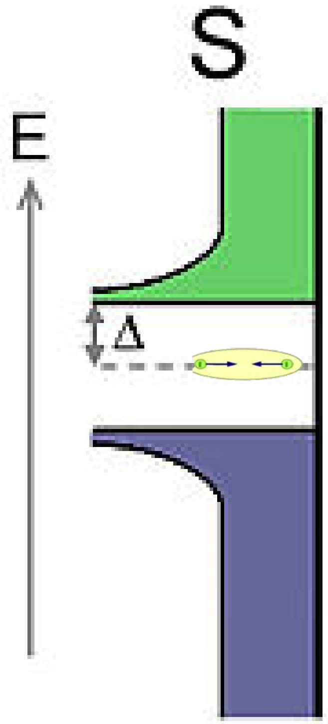


Сверхпроводимость

а) конденсат куперовских пар;

б) щель в спектре возбуждений





Алюминий: $2\Delta_{\mathrm{Al}}/h \approx 96$ ГГц

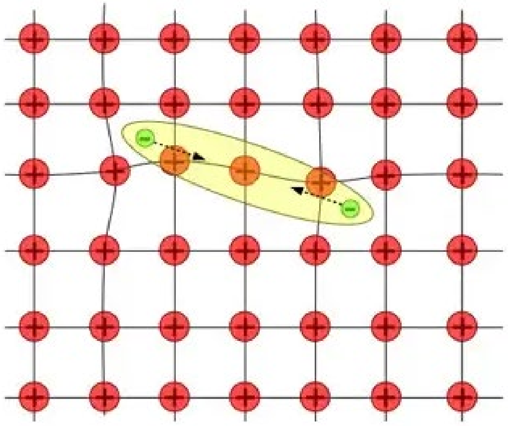
Фотоны меньшей частоты – не поглощаются

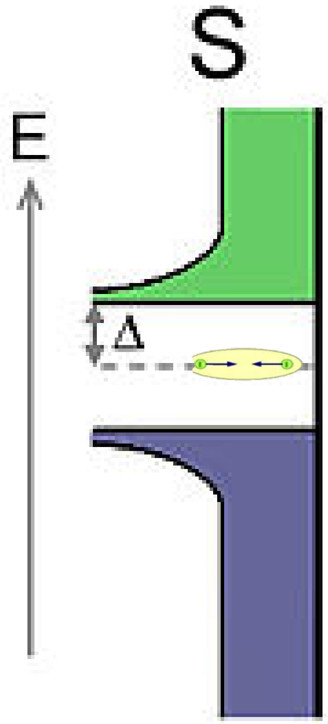
Если $kT \ll 2\Delta$ – квант плазменных колебаний в LC-контуре живет ~~неограниченно~~ долго

Сверхпроводимость

а) конденсат куперовских пар;

б) щель в спектре возбуждений

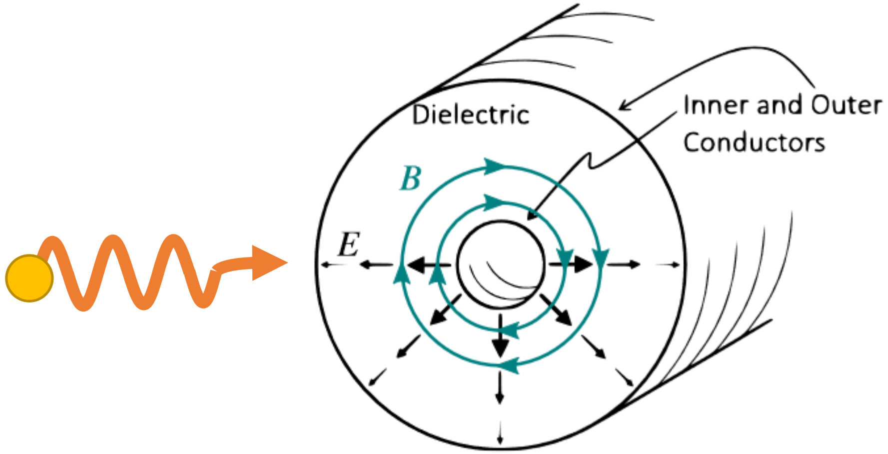


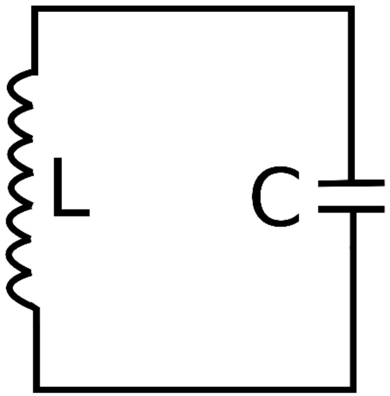


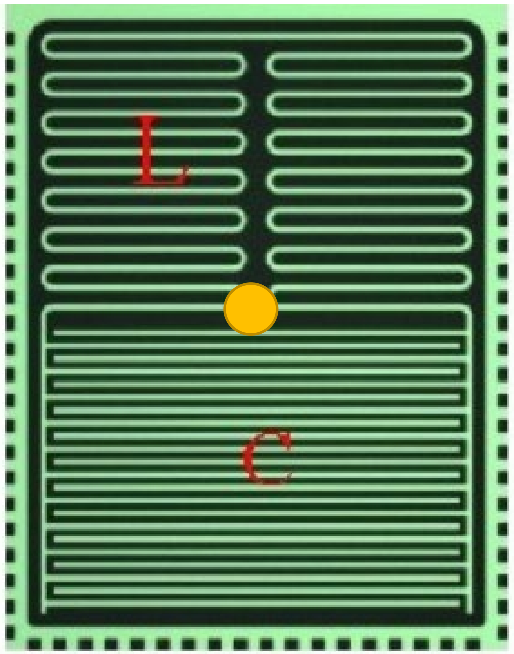
Алюминий: $2\Delta_{\mathrm{Al}}/h \approx 96$ ГГц

Фотоны меньшей частоты – не поглощаются

Если $kT \ll 2\Delta$ – квант плазменных колебаний в LC-контуре живет ~~неограниченно~~ долго

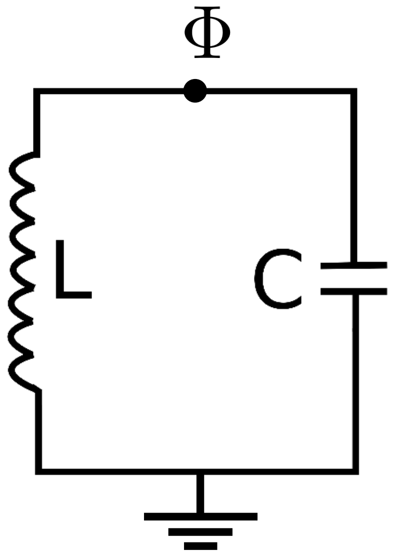






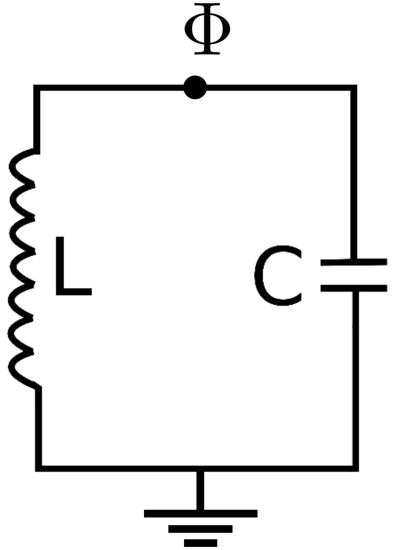
Квантовая LC-цепь

Квантовая LC-цепь



Квантовая LC-цепь

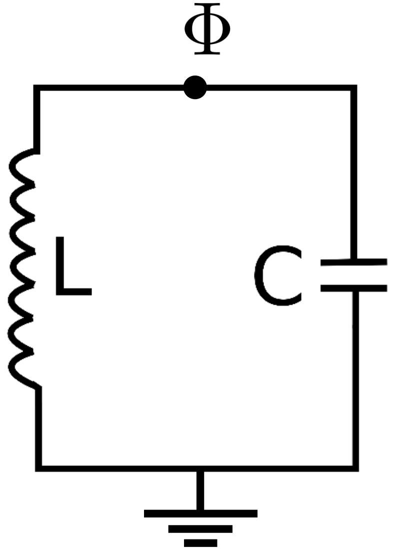
$\Phi(t) = \int_{-\infty}^{t} V(t)dt$ - узловой поток (координата)



Квантовая LC-цепь

$\Phi(t) = \int_{-\infty}^{t} V(t)dt$ - узловой поток (координата)

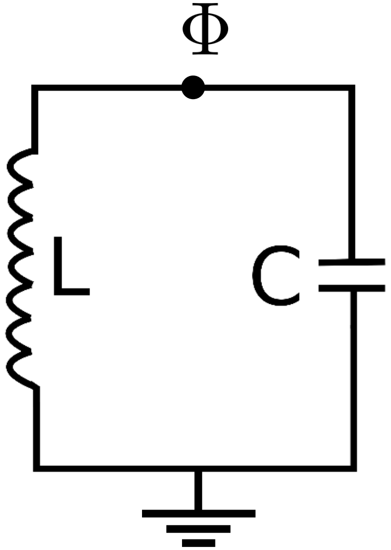
$$\mathcal{U}_L = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$$



Квантовая LC-цепь

$\Phi(t) = \int_{-\infty}^{t} V(t)dt$ - узловой поток (координата)

$$\mathcal{U}_L = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$$



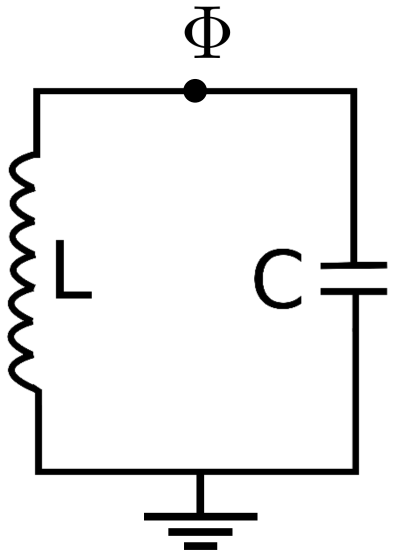
$$\mathcal{T}_C = \frac{C\dot{\Phi}^2}{2}$$

Квантовая LC-цепь

$\Phi(t) = \int_{-\infty}^{t} V(t)dt$ - узловой поток (координата)

$Q = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\Phi}} = C\dot{\Phi}.$ - канон. импульс

$$\mathcal{U}_L = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$$

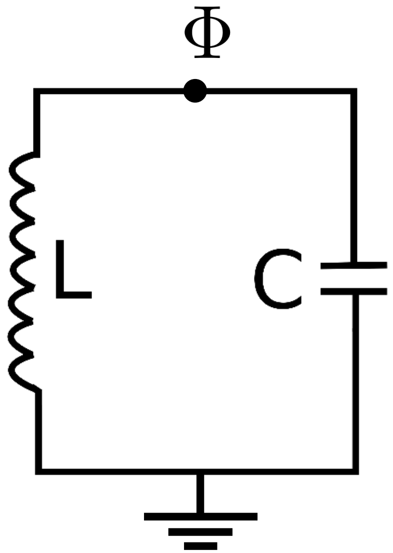


$$\mathcal{T}_C = \frac{C\dot{\Phi}^2}{2}$$

$$\mathcal{L} = \mathcal{T}_C - \mathcal{U}_L = \frac{1}{2}C\dot{\Phi}^2 - \frac{1}{2L}\Phi^2.$$

Квантовая LC-цепь

$\Phi(t) = \int_{-\infty}^{t} V(t)dt$ - узловой поток (координата)



$$\mathcal{U}_L = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$$

$$\mathcal{T}_C = \frac{C\dot{\Phi}^2}{2}$$

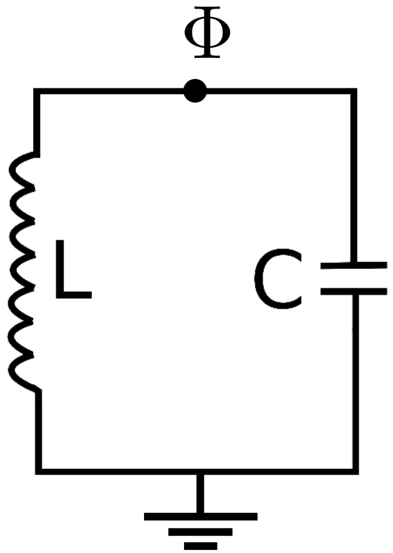
$$\mathcal{L} = \mathcal{T}_C - \mathcal{U}_L = \frac{1}{2}C\dot{\Phi}^2 - \frac{1}{2L}\Phi^2.$$

$Q = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\Phi}} = C\dot{\Phi}.$ - канон. импульс

$$H = Q\dot{\Phi} - \mathcal{L} = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Phi^2}{2L} \qquad m = C, \omega_r = 1/\sqrt{LC}$$

Квантовая LC-цепь

$$\Phi(t) = \int_{-\infty}^{t} V(t)dt$$ - узловой поток (координата)



$$\mathcal{U}_L = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$$

$$\mathcal{T}_C = \frac{C\dot{\Phi}^2}{2}$$

$$\mathcal{L} = \mathcal{T}_C - \mathcal{U}_L = \frac{1}{2}C\dot{\Phi}^2 - \frac{1}{2L}\Phi^2.$$

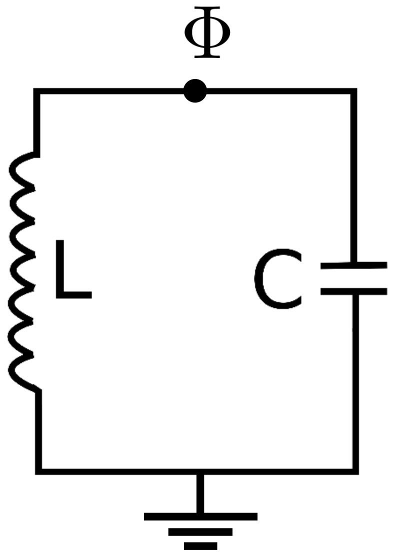
$$Q = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\Phi}} = C\dot{\Phi}.$$ - канон. импульс

$$H = Q\dot{\Phi} - \mathcal{L} = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Phi^2}{2L} \qquad m = C, \omega_r = 1/\sqrt{LC}$$

Квантование:

Квантовая LC-цепь

$\Phi(t) = \int_{-\infty}^{t} V(t)dt$ - узловой поток (координата)



$$\mathcal{U}_L = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$$

$$\mathcal{T}_C = \frac{C\dot{\Phi}^2}{2}$$

$$\mathcal{L} = \mathcal{T}_C - \mathcal{U}_L = \frac{1}{2}C\dot{\Phi}^2 - \frac{1}{2L}\Phi^2.$$

$Q = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\Phi}} = C\dot{\Phi}.$ - канон. импульс

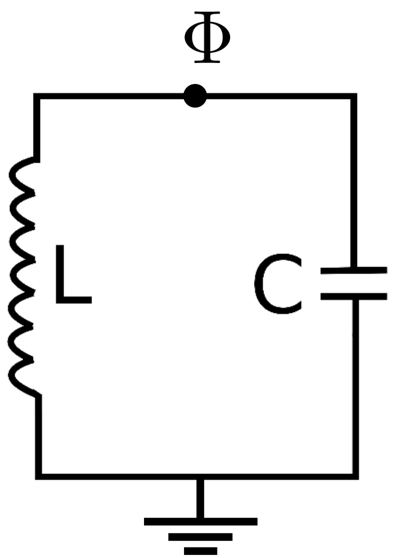
$$H = Q\dot{\Phi} - \mathcal{L} = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Phi^2}{2L} \qquad m = C, \omega_r = 1/\sqrt{LC}$$

Квантование: $[\hat{\Phi}, \hat{Q}] = i\hbar$

$$\boxed{H = \hbar\omega_r(a^\dagger a + \tfrac{1}{2})}$$

Квантовая LC-цепь

$\Phi(t) = \int_{-\infty}^{t} V(t)dt$ - узловой поток (координата)



$\mathcal{U}_L = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$

$\mathcal{T}_C = \frac{C\dot{\Phi}^2}{2}$

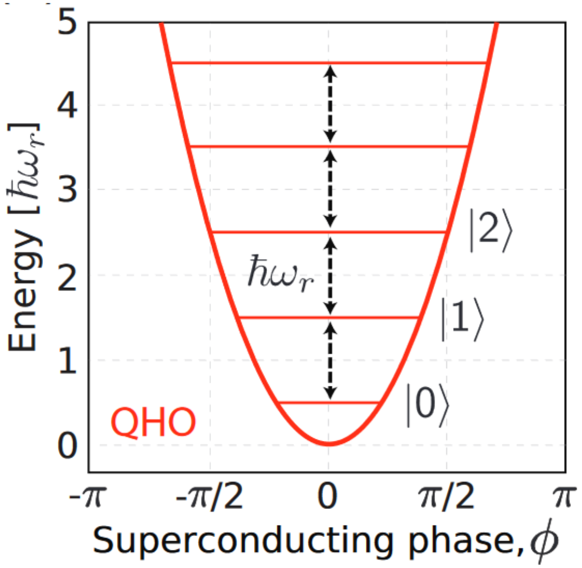
$$\mathcal{L} = \mathcal{T}_C - \mathcal{U}_L = \frac{1}{2}C\dot{\Phi}^2 - \frac{1}{2L}\Phi^2.$$

$Q = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\Phi}} = C\dot{\Phi}.$ - канон. импульс

$H = Q\dot{\Phi} - \mathcal{L} = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Phi^2}{2L}$ $\quad m = C, \omega_r = 1/\sqrt{LC}$

Квантование: $[\hat{\Phi}, \hat{Q}] = i\hbar$

$$\boxed{H = \hbar\omega_r(a^\dagger a + \tfrac{1}{2})}$$



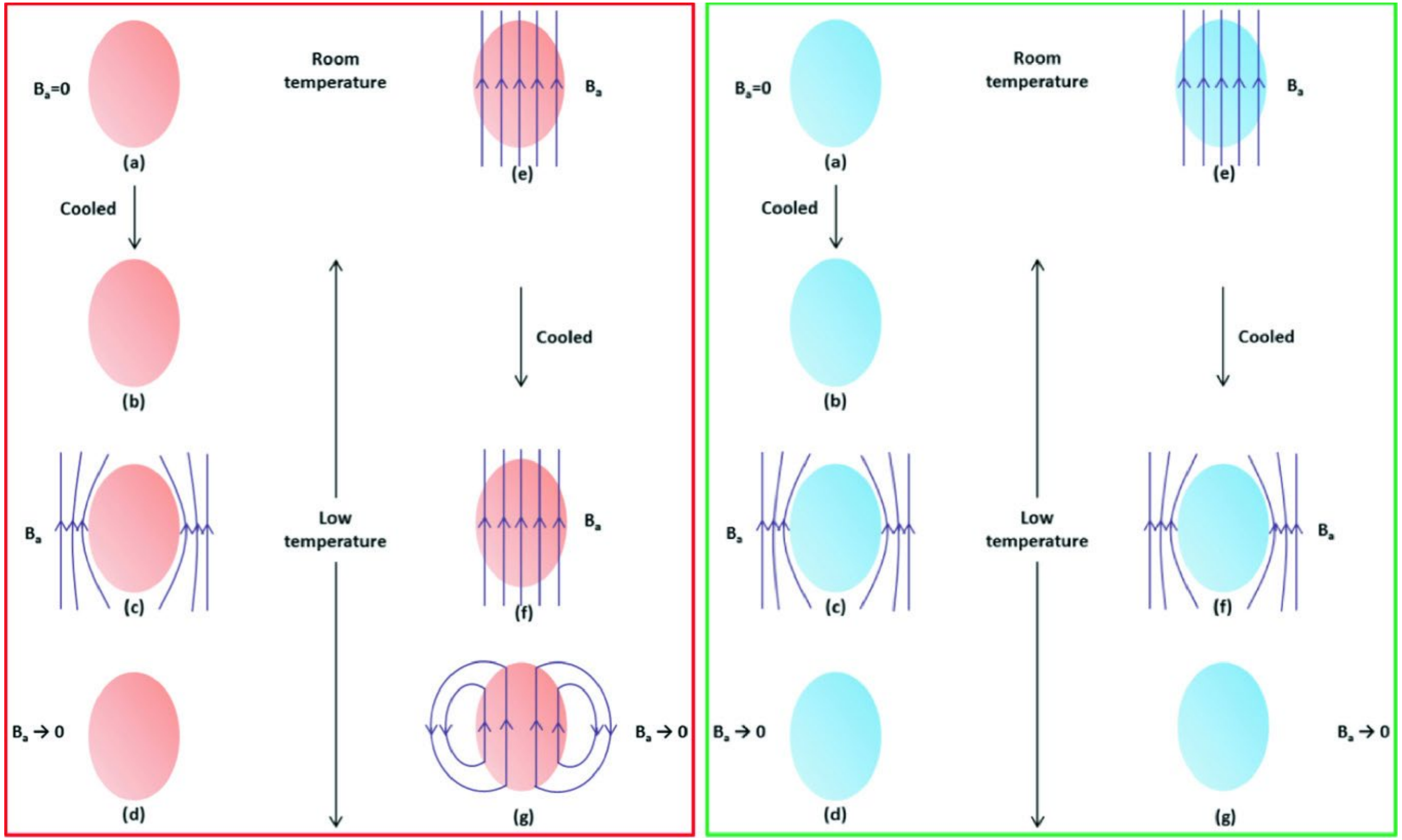
$\phi \equiv 2\pi\Phi/\Phi_0$ $\quad \Phi_0 = h/(2e)$

Krantz et al. Applied Physics Reviews **6**, 021318 (2019)

Квантование магнитного потока

Квантование магнитного потока

Эффект Мейсснера



Boyang Shen, Study of Second Generation High Temperature Superconductors: Electromagnetic Characteristics and AC Loss Analysis, Springer (2020)

Квантование магнитного потока

Квантование магнитного потока

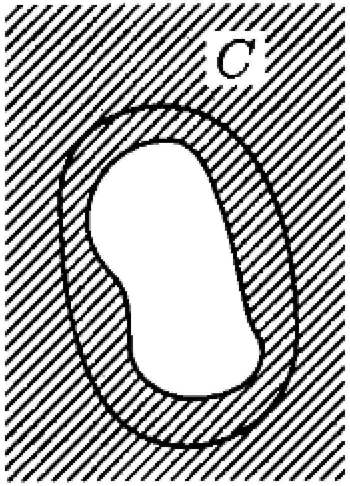
Волновая функция электронов $\Psi_s = \sqrt{n_s}(\vec{r})e^{-i\varphi(\vec{r})}$

Плотность потока частиц $j = \frac{e}{m}n_s\left[\hbar\nabla\varphi - e\vec{A}\right]$

Квантование магнитного потока

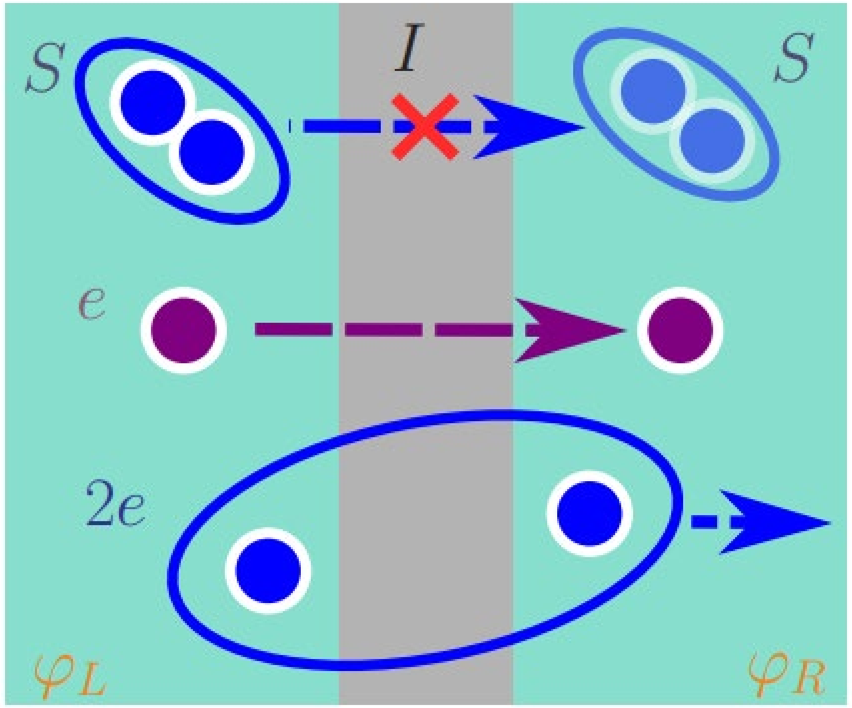
Волновая функция электронов $\Psi_s = \sqrt{n_s}(\vec{r})e^{-i\varphi(\vec{r})}$

Плотность потока частиц $j = \frac{e}{m} n_s \left[\hbar\nabla\varphi - e\vec{A}\right]$

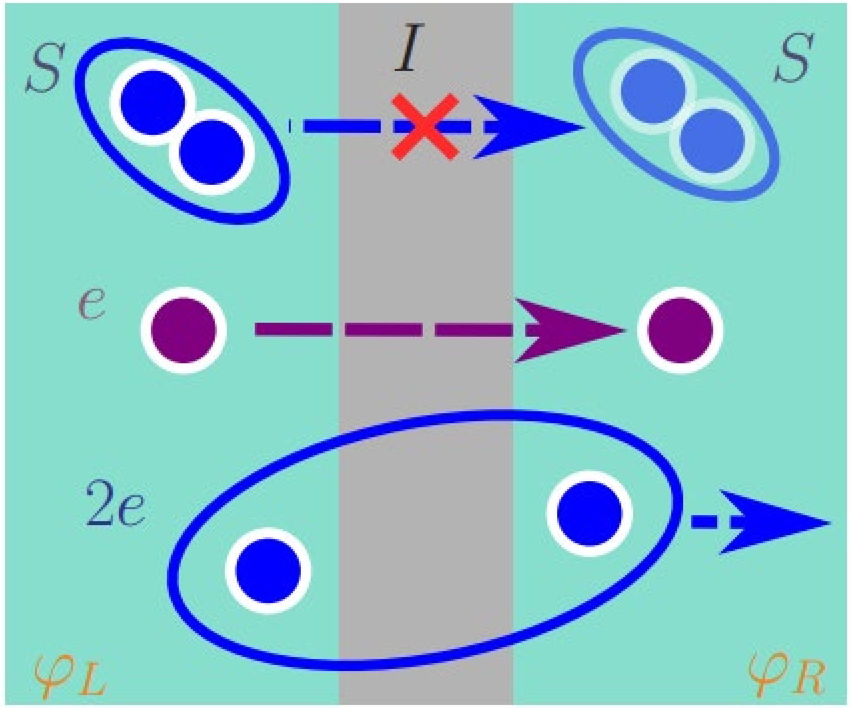


В толще ток отсутствует → $\Phi = n\frac{h}{2e} = n\Phi_0$

Эффект Джозефсона

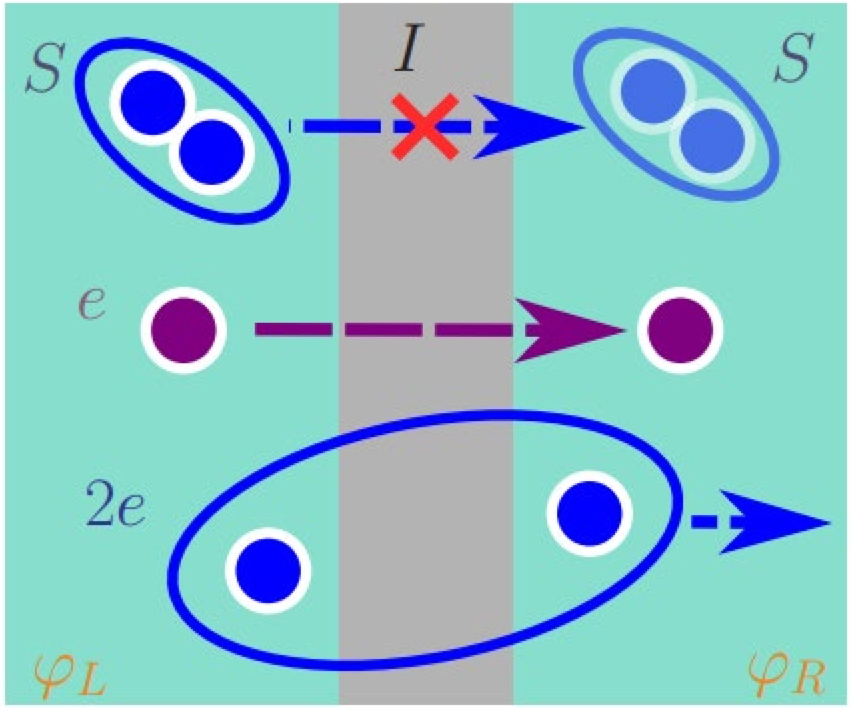


Эффект Джозефсона



Конденсаты «чувствуют» друг друга

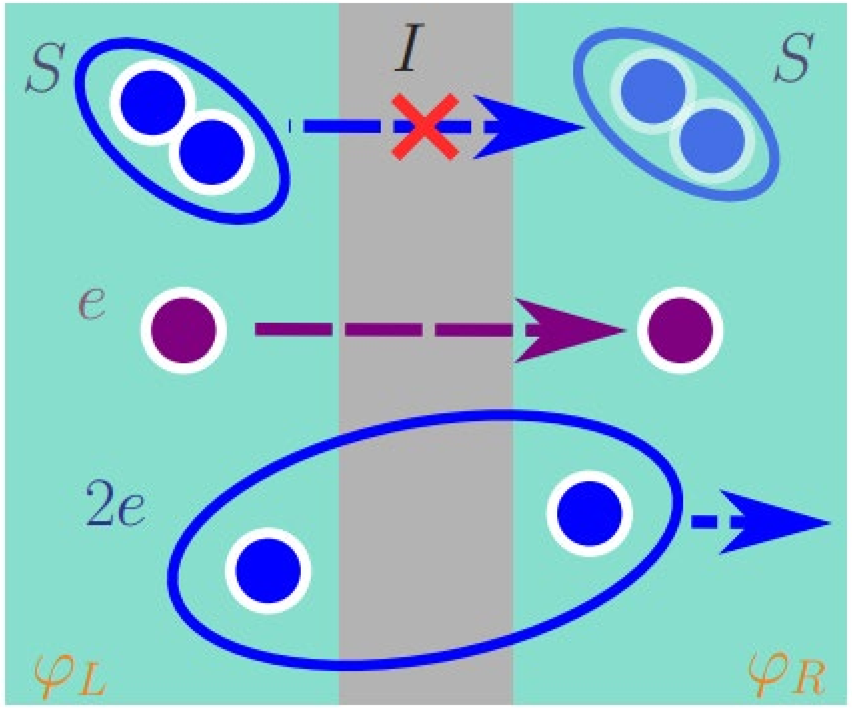
Эффект Джозефсона



Конденсаты «чувствуют» друг друга

$$I = I_c \sin\varphi, \quad \varphi = \varphi_L - \varphi_R$$

Эффект Джозефсона

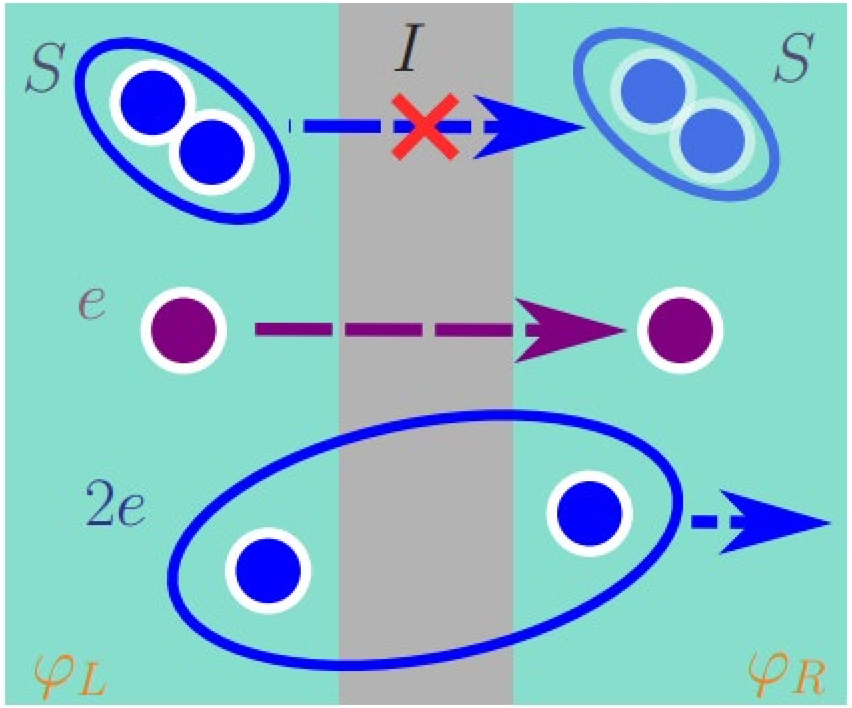


Конденсаты «чувствуют» друг друга

$$I = I_c \sin\varphi, \quad \varphi = \varphi_L - \varphi_R$$

$$E(\varphi) = \int_0^t I_s V\,dt = \int_0^\varphi I_c \sin\varphi' \frac{\hbar}{2e} d\varphi' = E_J(1 - \cos\varphi).$$

Эффект Джозефсона



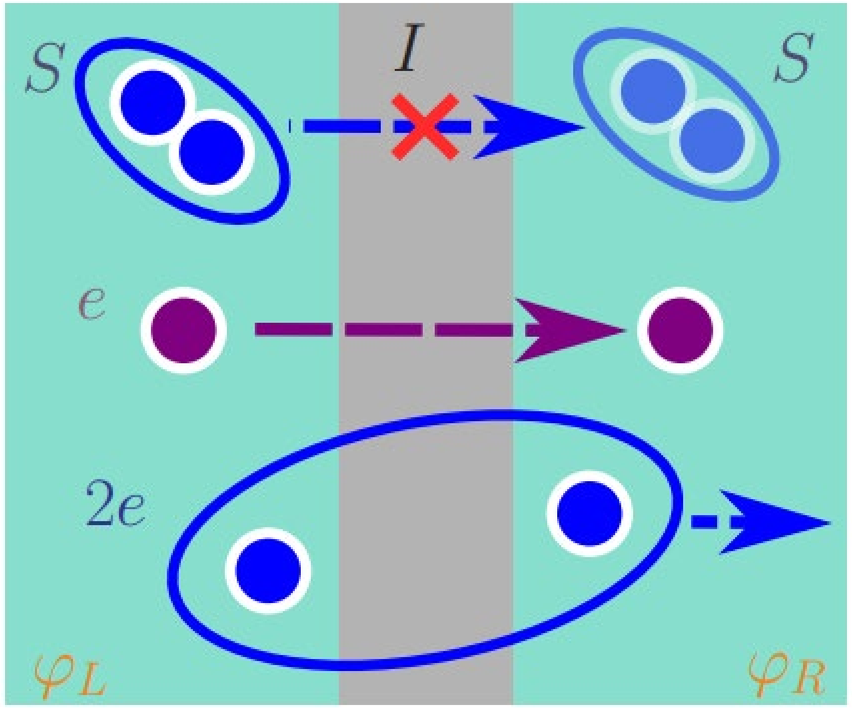
Конденсаты «чувствуют» друг друга

$$I = I_c \sin\varphi, \quad \varphi = \varphi_L - \varphi_R$$

$$E(\varphi) = \int_0^t I_s V\, dt = \int_0^\varphi I_c \sin\varphi' \frac{\hbar}{2e} d\varphi' = E_J(1 - \cos\varphi).$$

схемотехническое обозначение джозефсоновского перехода

Эффект Джозефсона



Конденсаты «чувствуют» друг друга

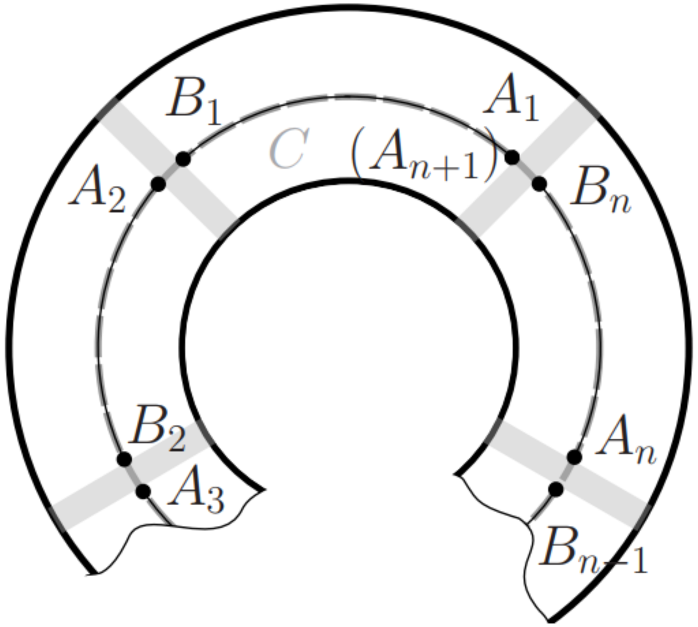
$$I = I_c \sin\varphi, \qquad \varphi = \varphi_L - \varphi_R$$

$$E(\varphi) = \int_0^t I_s V\, dt = \int_0^{\varphi} I_c \sin\varphi' \frac{\hbar}{2e} d\varphi' = E_J(1 - \cos\varphi).$$

схемотехническое обозначение джозефсоновского перехода

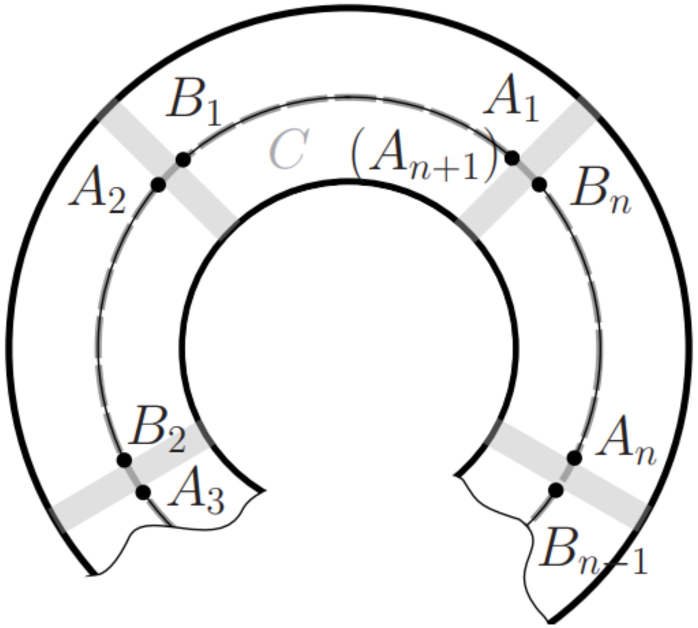
$L_J = \Phi_0/(2\pi I_c \cos\varphi)$ Нелинейная бездиссипативная индуктивность

Фазо-потоковое соотношение



$$\oint_C \mathbf{A} d\boldsymbol{\ell} = \frac{\Phi_0}{2\pi} \oint_C \nabla\varphi d\boldsymbol{\ell} \quad \Rightarrow \quad \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} = 2\pi k + \sum_{i=1}^{n} \delta\varphi_i .$$

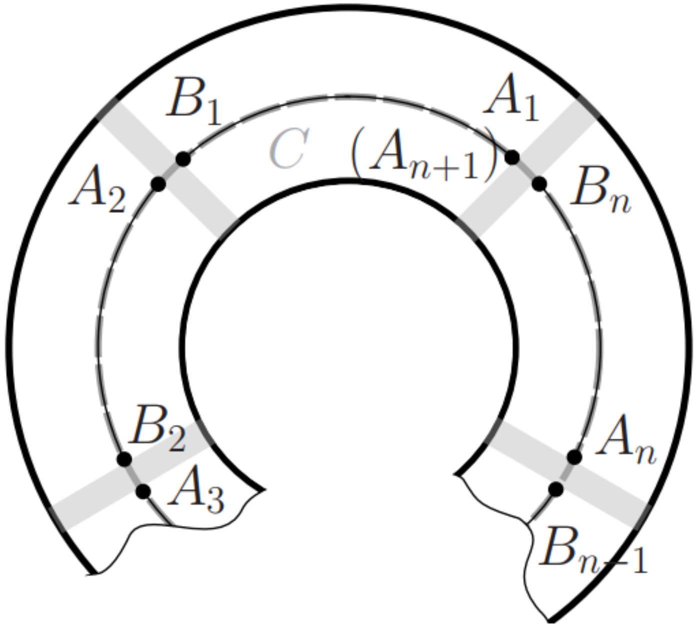
Фазо-потоковое соотношение



$$\oint_C \mathbf{A} d\boldsymbol{\ell} = \frac{\Phi_0}{2\pi} \oint_C \nabla\varphi d\boldsymbol{\ell} \quad \Rightarrow \quad \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} = 2\pi k + \sum_{i=1}^{n} \delta\varphi_i.$$

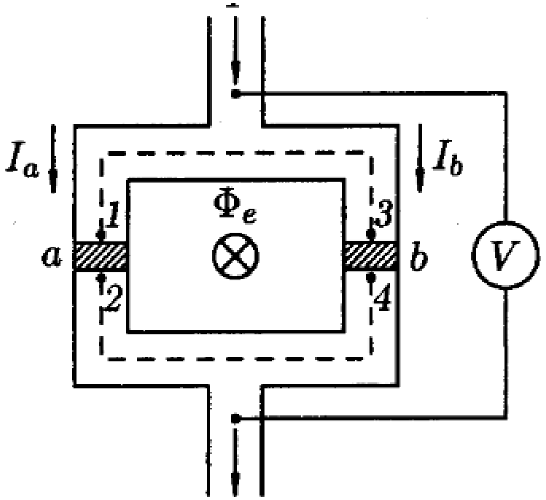
Поток в таком кольце не квантуется, но однозначно определяется разностями фаз на джозефсоновских переходах, так как набег фазы кратен 2π

Фазо-потоковое соотношение



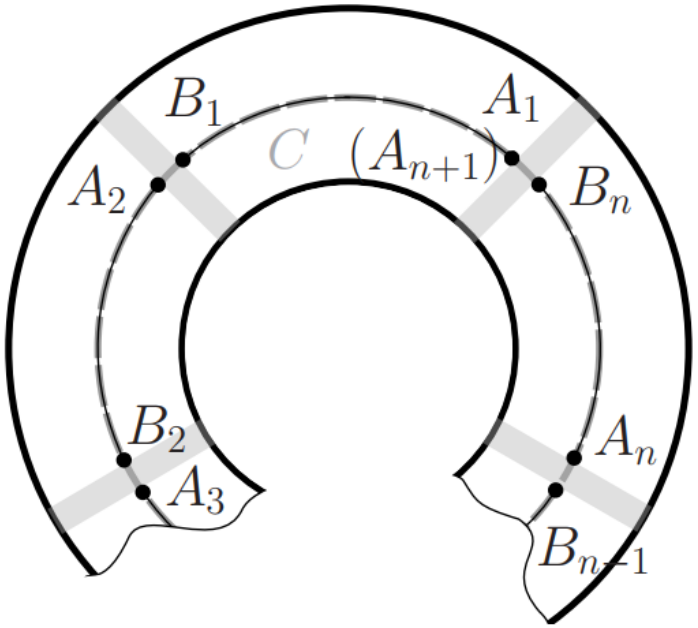
$$\oint_C \mathbf{A} d\boldsymbol{\ell} = \frac{\Phi_0}{2\pi} \oint_C \nabla\varphi d\boldsymbol{\ell} \quad \Rightarrow \quad \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} = 2\pi k + \sum_{i=1}^{n} \delta\varphi_i .$$

Поток в таком кольце не квантуется, но однозначно определяется разностями фаз на джозефсоновских переходах, так как набег фазы кратен 2π



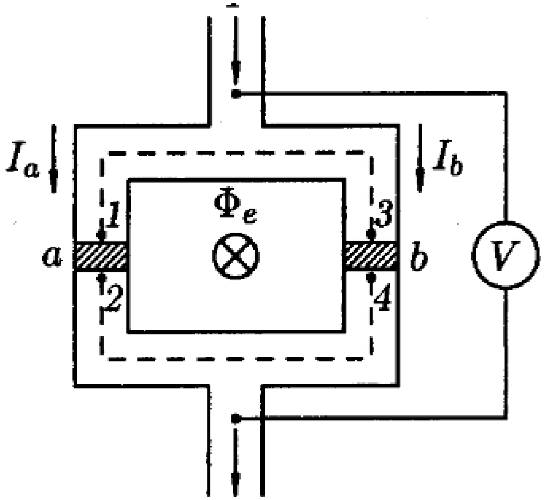
Пример: DC-SQUID

Фазо-потоковое соотношение



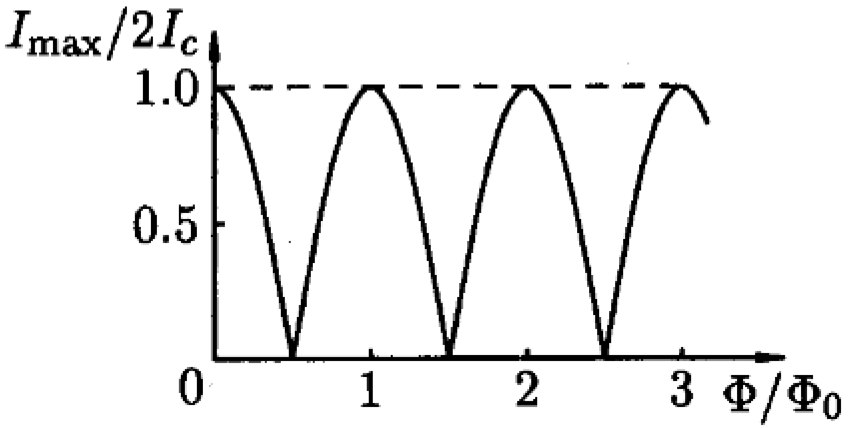
$$\oint_C \mathbf{A} d\boldsymbol{\ell} = \frac{\Phi_0}{2\pi} \oint_C \nabla\varphi d\boldsymbol{\ell} \quad \Rightarrow \quad \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} = 2\pi k + \sum_{i=1}^{n} \delta\varphi_i.$$

Поток в таком кольце не квантуется, но однозначно определяется разностями фаз на джозефсоновских переходах, так как набег фазы кратен 2π

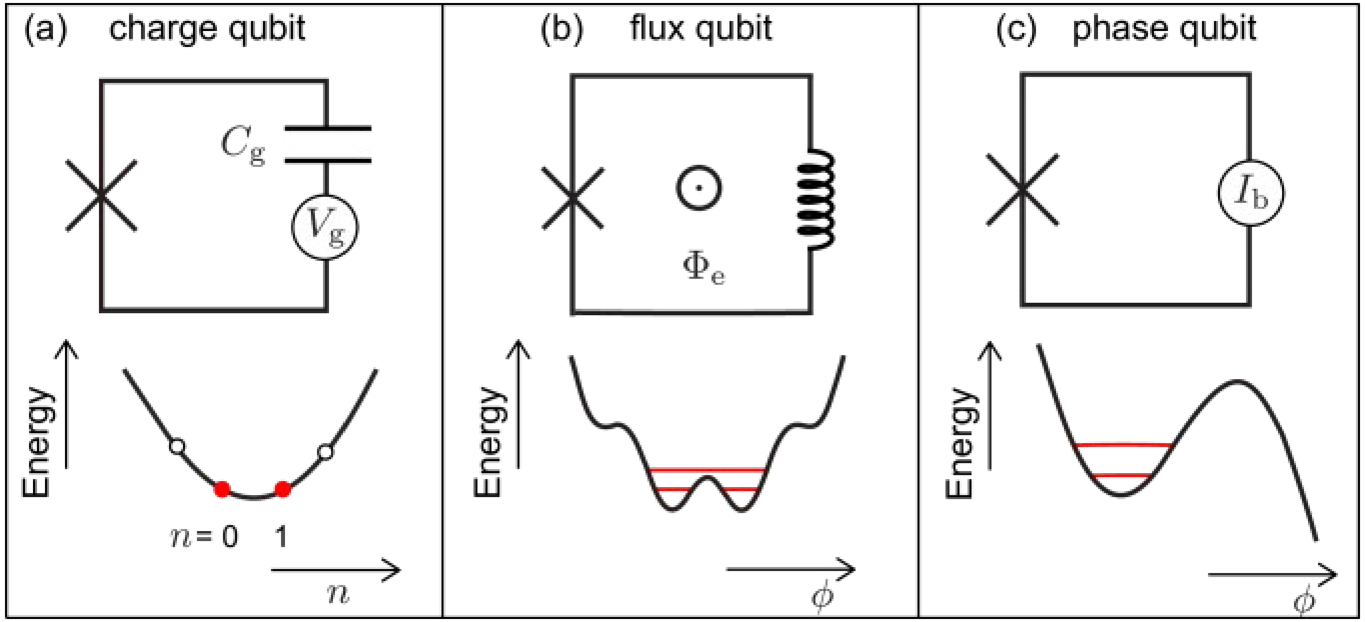


Пример: DC-SQUID

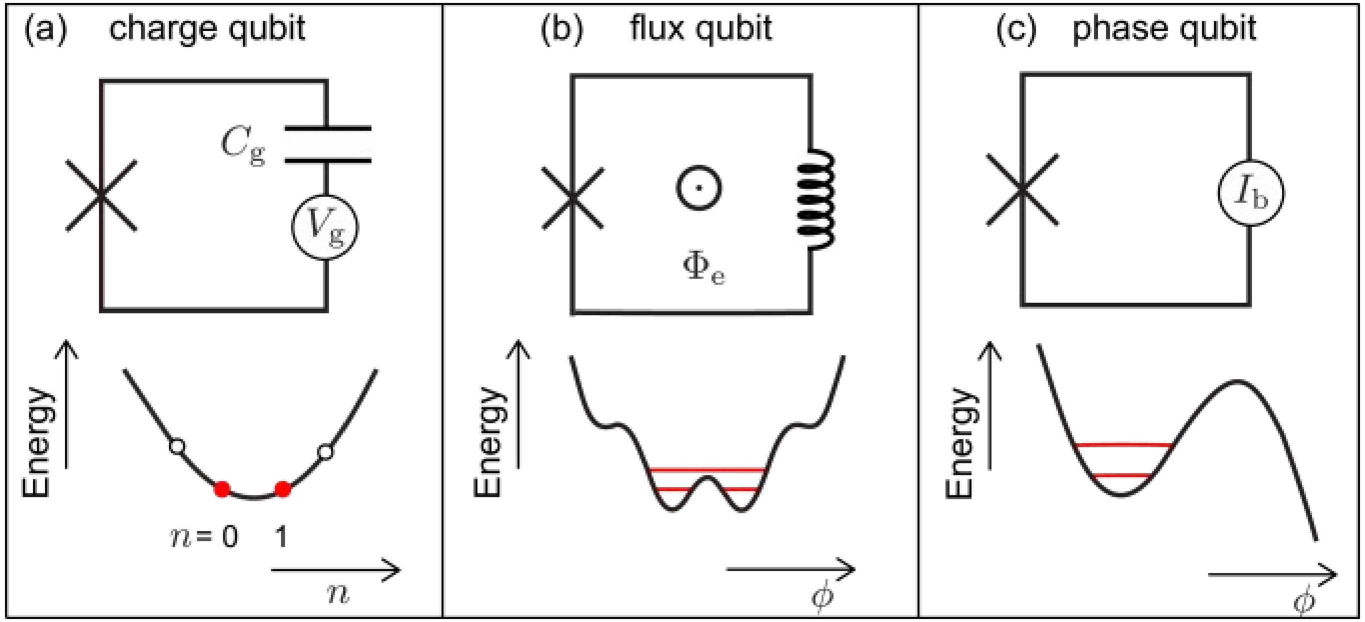
$$I = 2I_c \cos\frac{\pi\Phi}{\Phi_0} \sin\left(\varphi_b + \frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right).$$



Типы сверхпроводниковых квантовых цепей

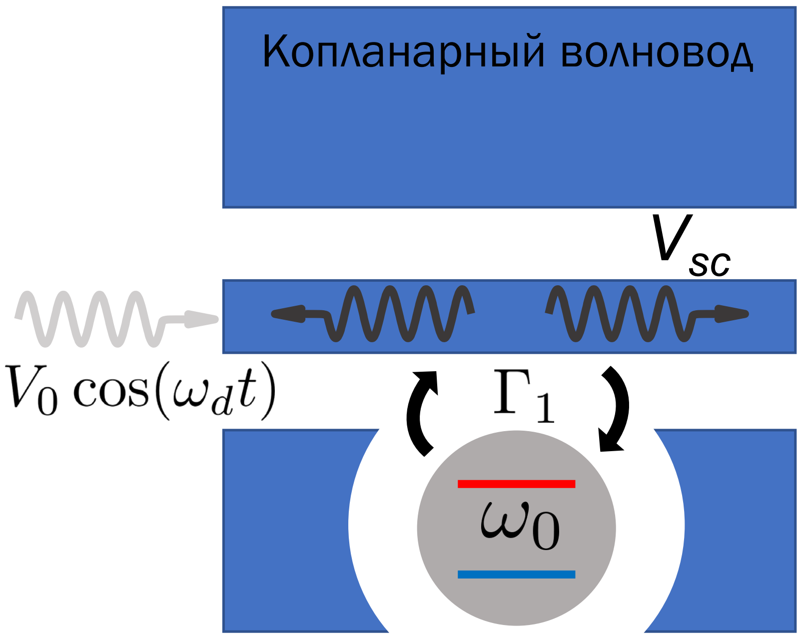


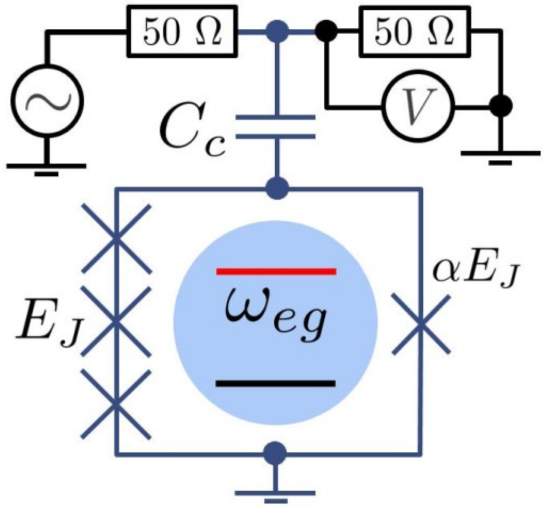
Типы сверхпроводниковых квантовых цепей

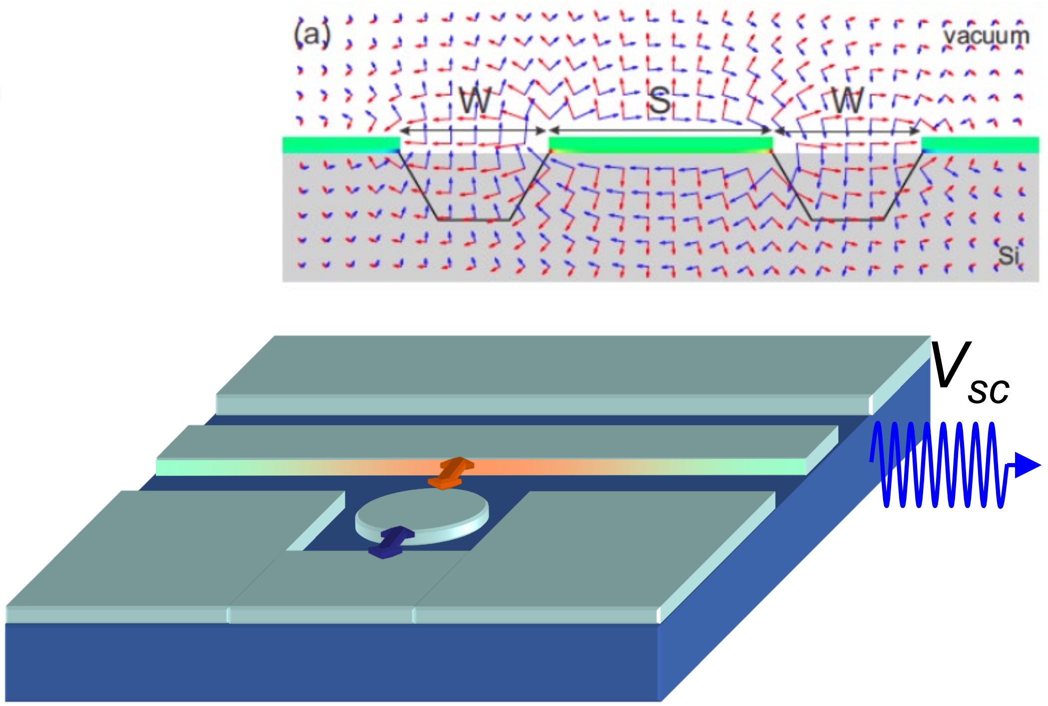


- Какая переменная хорошо определена: фаза или заряд
- Чувствительность к зарядовым флуктуациям или к магнитному шуму
- Способы управления и связи с другими цепями на чипе / друг с другом

Кубит как искусственный атом



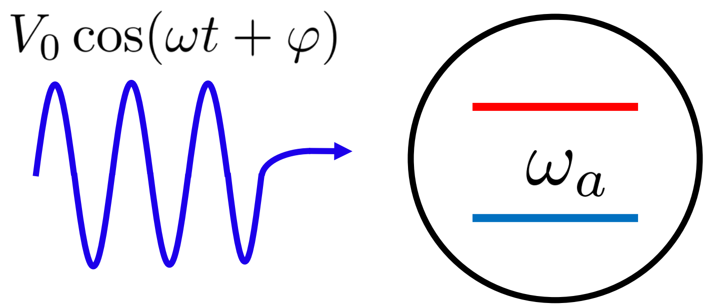




Сильная связь: $\Gamma_1 \gg$ безызлучательный распад или распад в другие моды

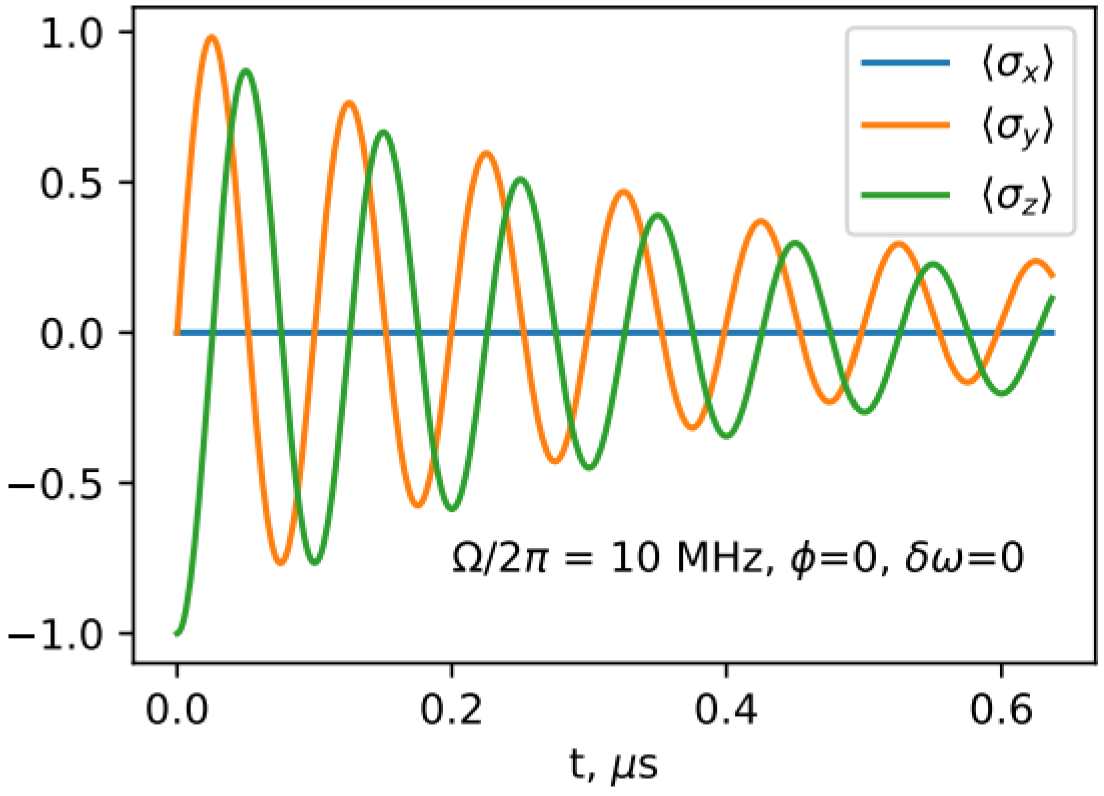
Кубит возбуждается налетающим полем → переизлучает (рассеивает) → интерференция. Как узнать что рассеялось?

Атом под действием монохроматического поля



$$H = \frac{\omega_q}{2}\sigma_z + \Omega\cos(\omega t + \varphi)\sigma_x \qquad \Omega = d_{eg}V_0 \text{– Rabi frequency}$$

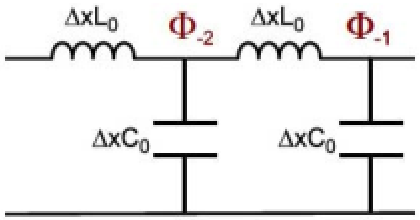
- Унитарная эволюция – динамика Раби
- Основное уравнение (master equation) – диссипация и дефазировка добавляются феноменологически



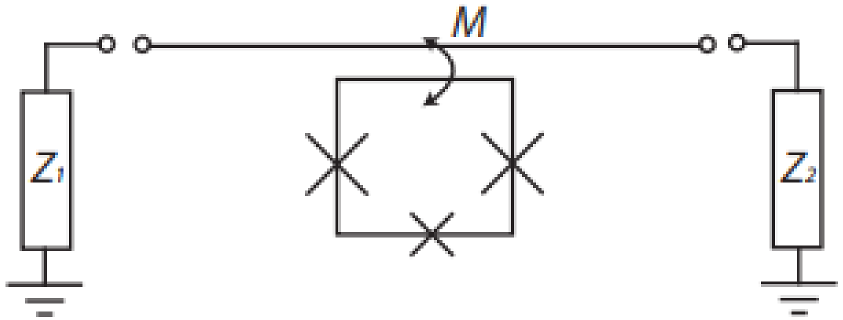
Schematics of atom in a waveguide

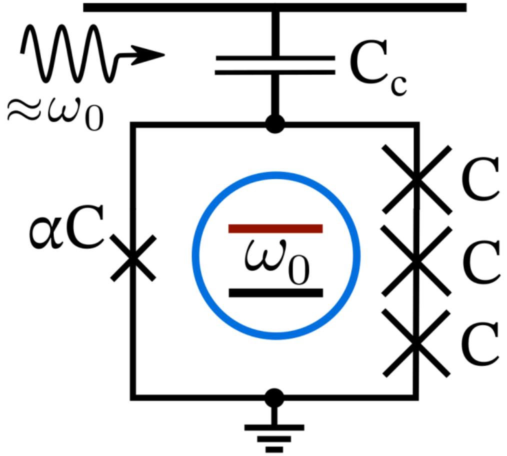
Voltage and current dynamics in waveguide:

e.g., flux qubit: coupled by two possible ways:



$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = -l_0 \frac{\partial I(x,t)}{\partial t},$$
$$\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = -c_0 \frac{\partial V(x,t)}{\partial t}.$$





- Qubit located at x=0 induces I or V:

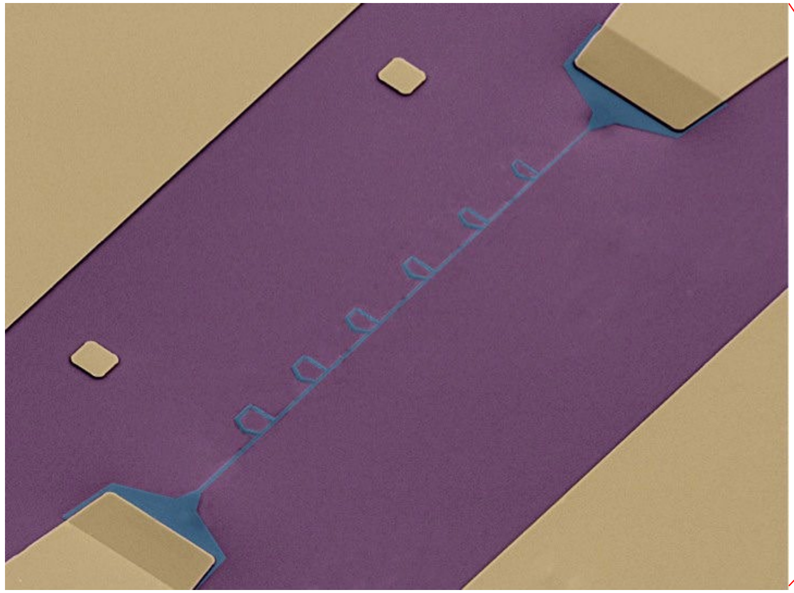
$$V(-0,t) = V(+0,t)$$
$$I(-0,t) = I(+0,t) + \frac{d\langle \Phi_q \rangle}{dt}$$

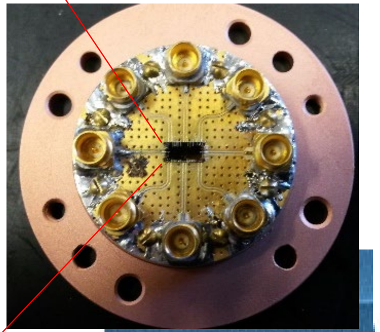
$$V(-0,t) = V(+0,t)$$
$$I(-0,t) = I(+0,t) + \frac{d\langle Q_q \rangle}{dt}$$

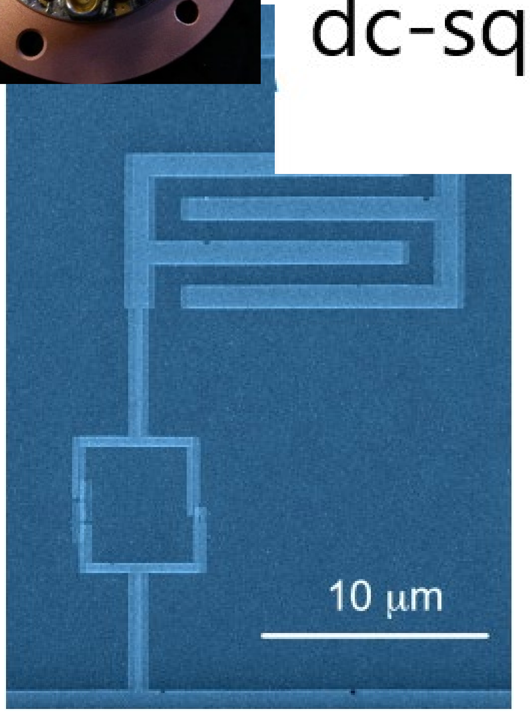
- As a result:

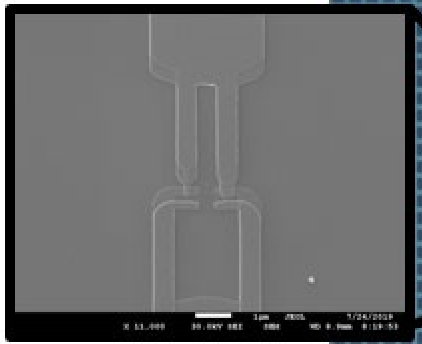
$$I_{sc}(t) = i\frac{\Gamma_1}{\mu_{eg}} \langle \sigma_-(t) \rangle$$

$$V_{sc}(t) = i\frac{\Gamma_1}{d_{eg}} \langle \sigma_-(t) \rangle$$

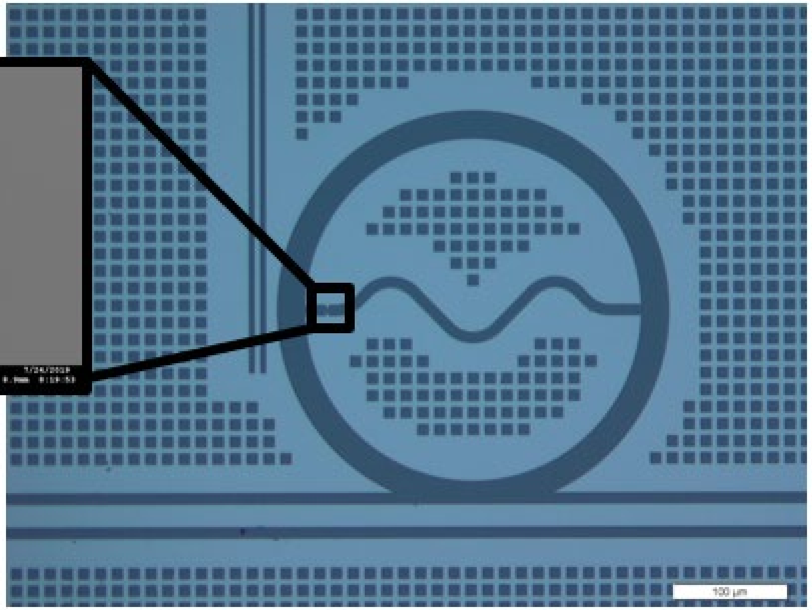


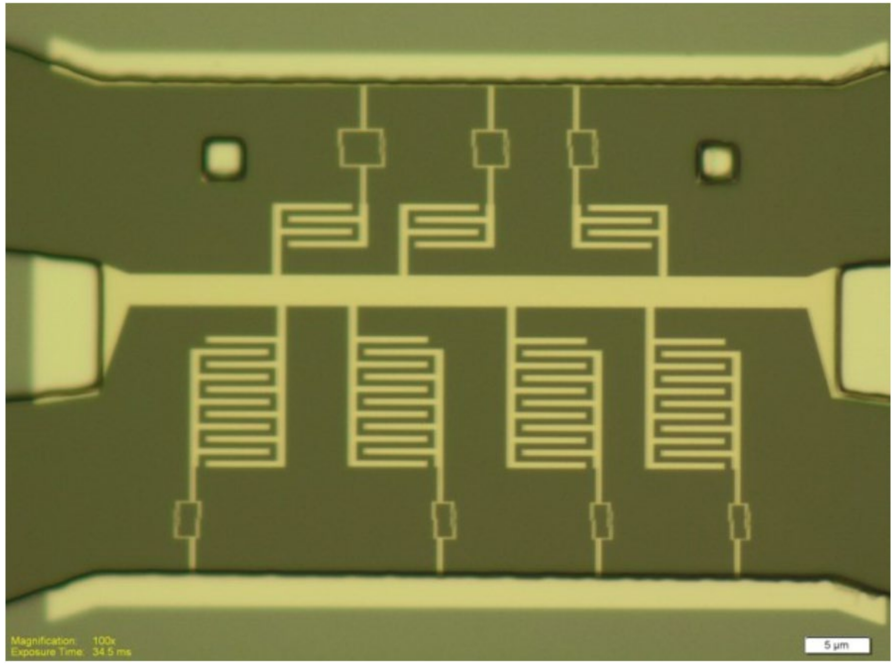






dc-squid





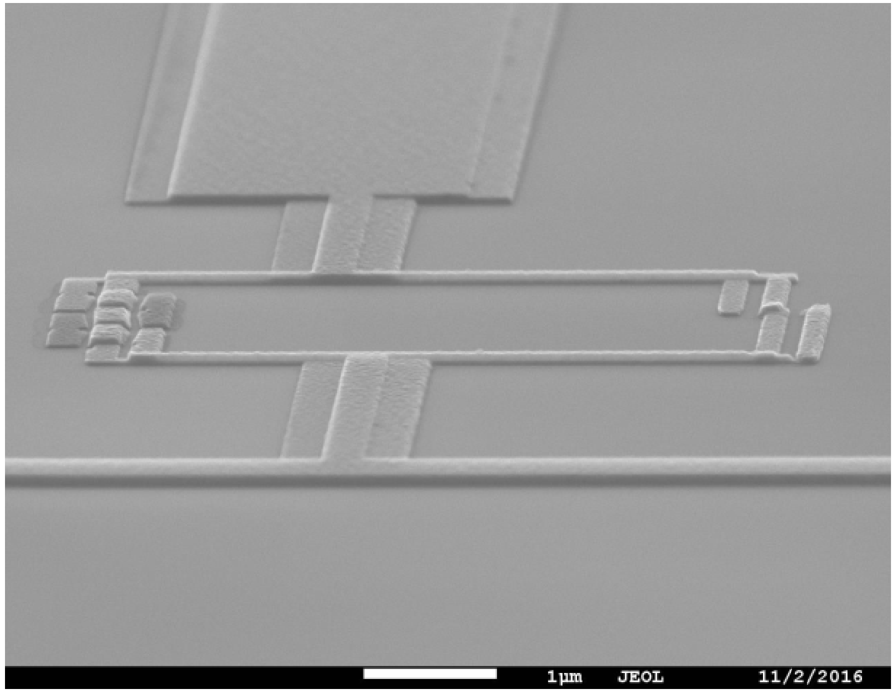
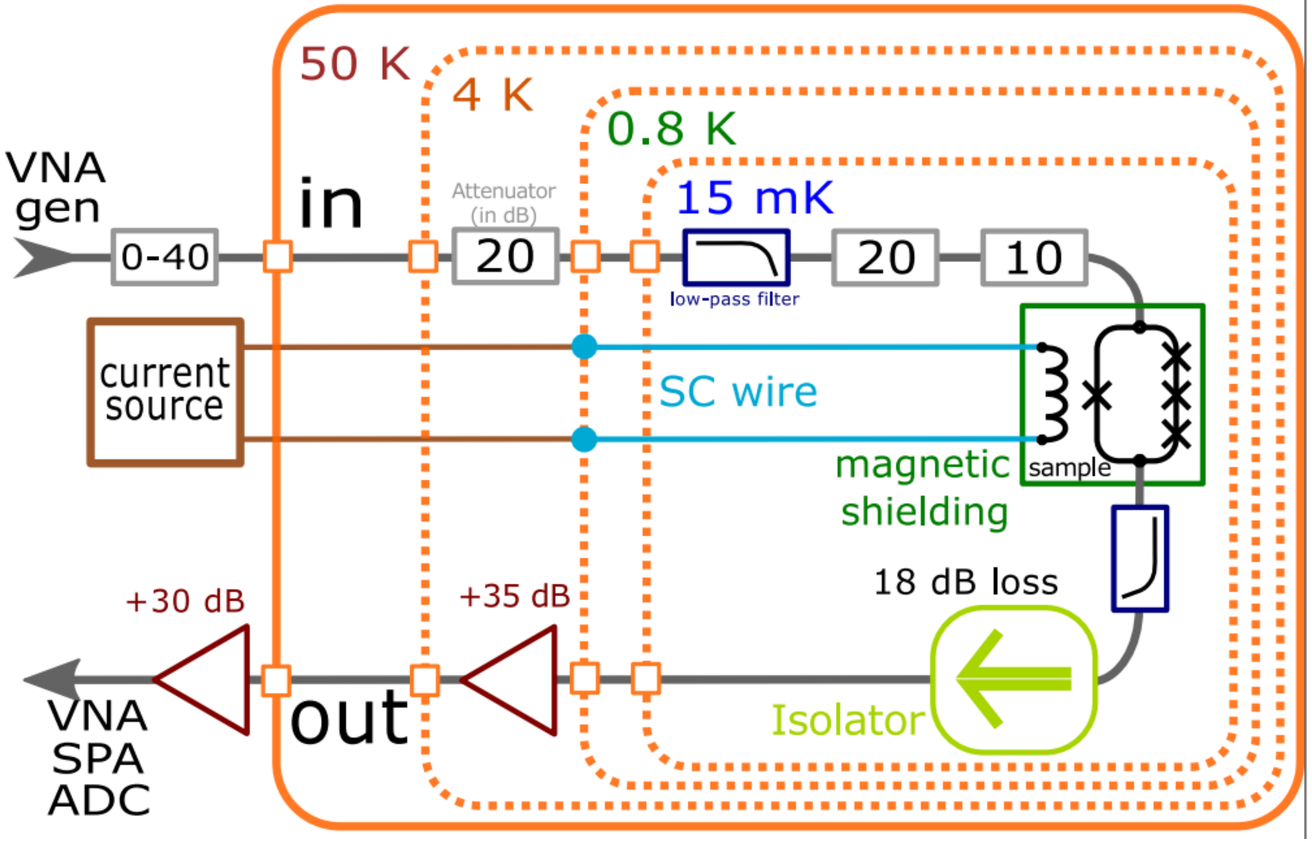


Схема измерений



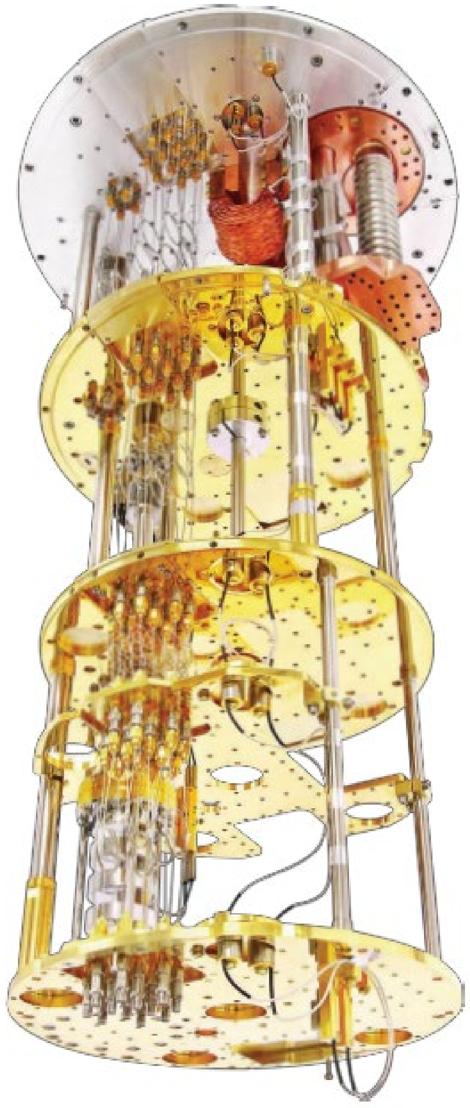
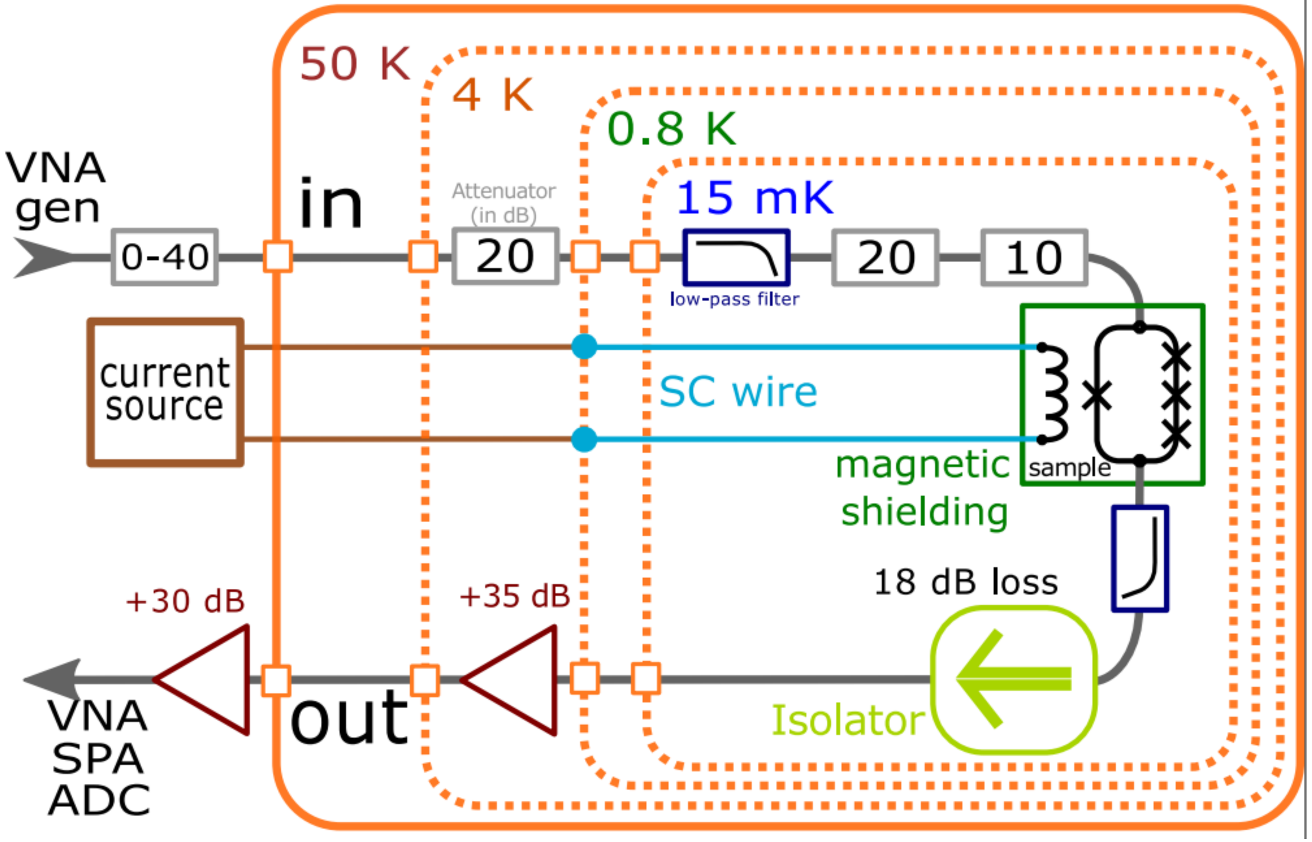
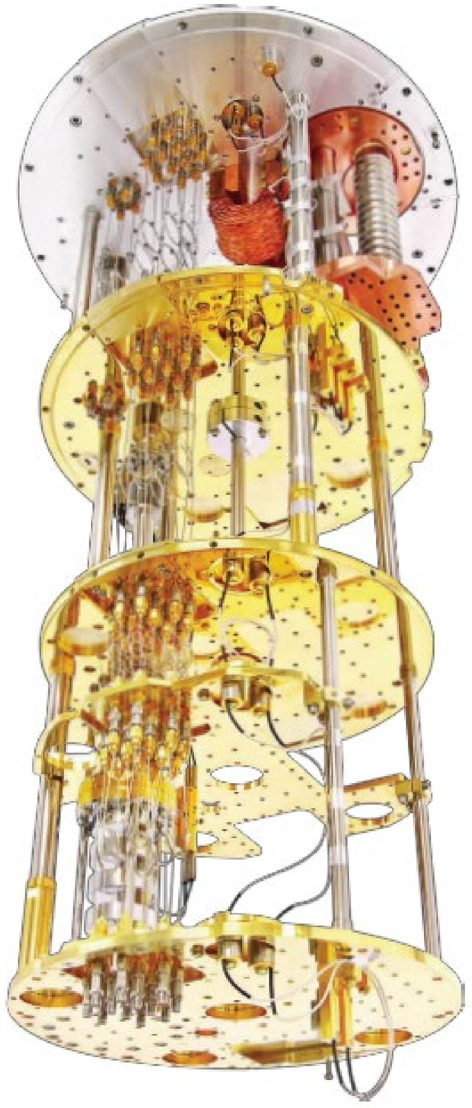
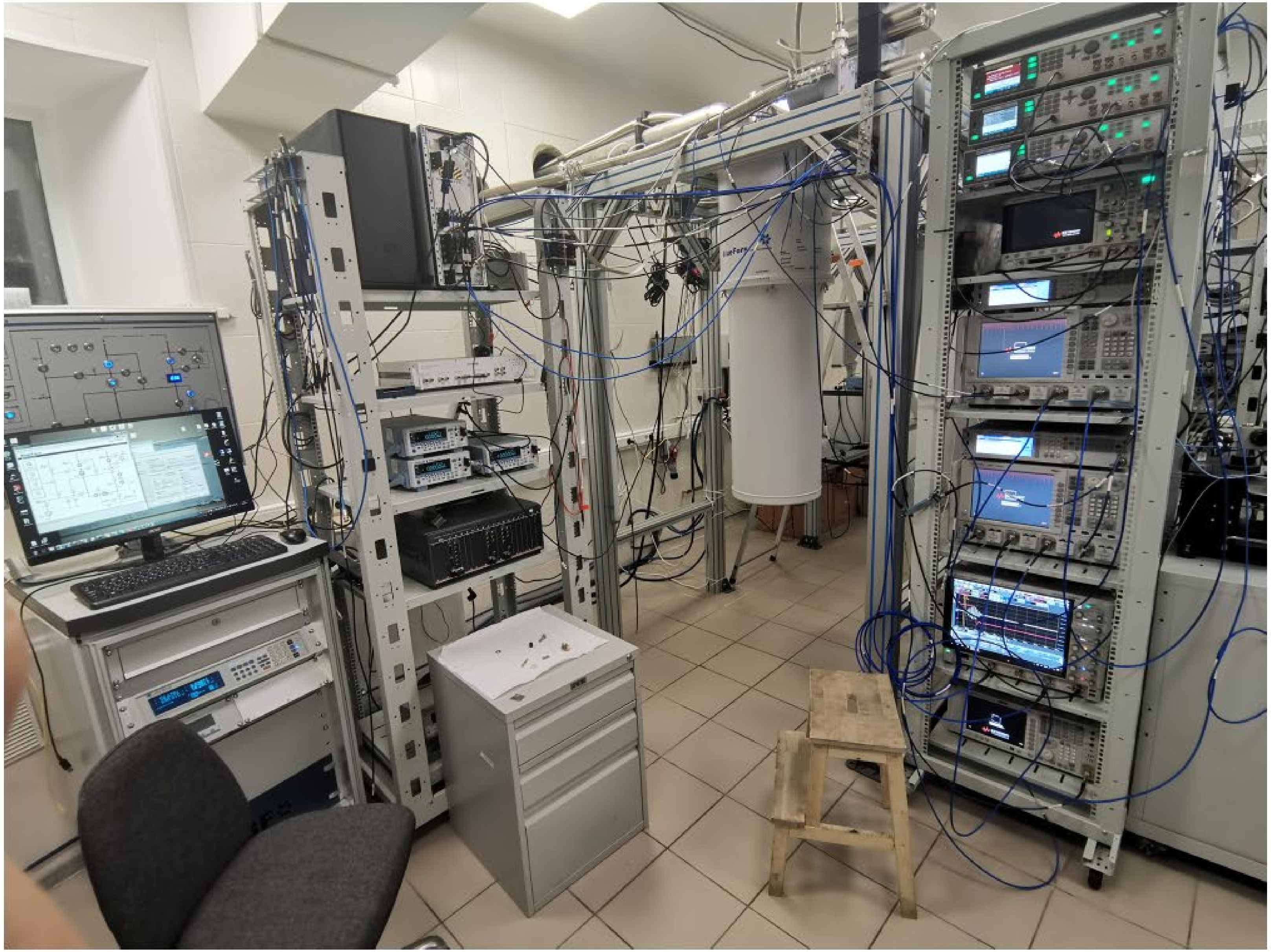


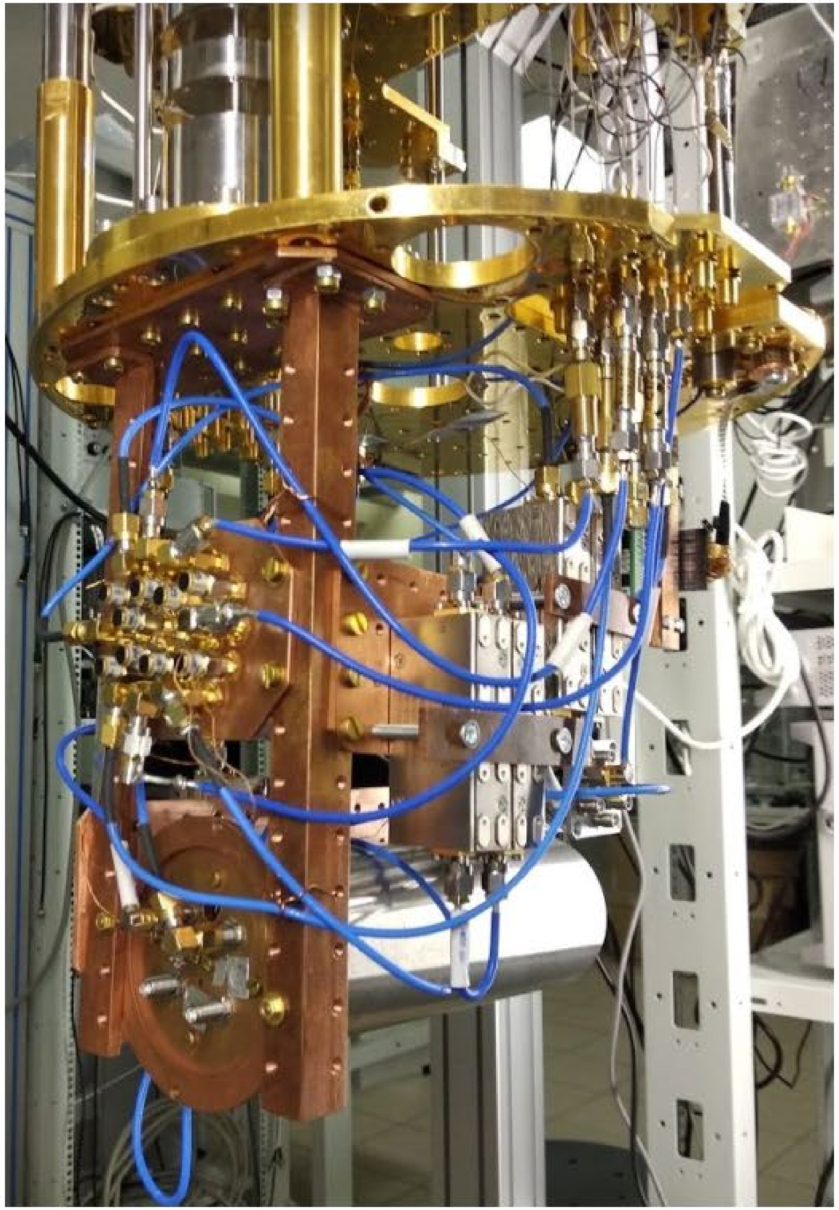
Схема измерений



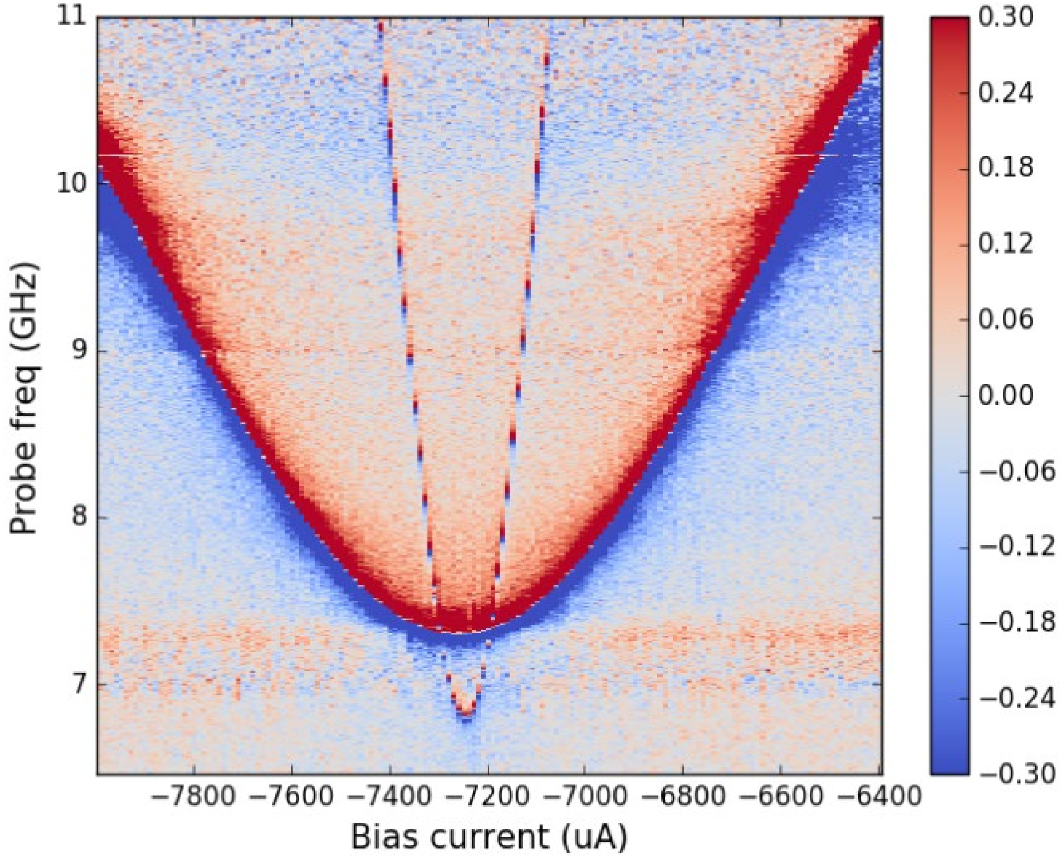


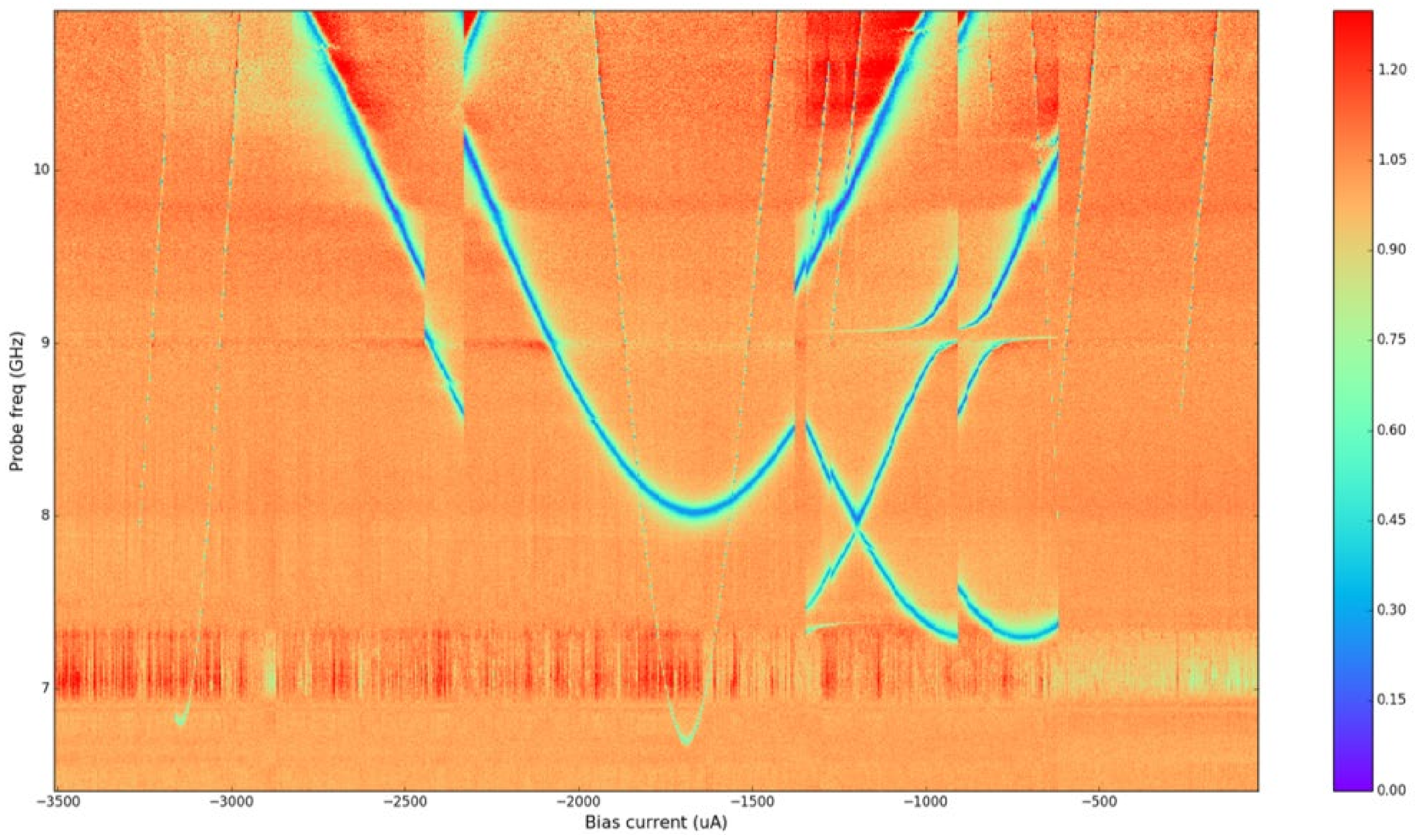
- Измеряем отношение комплексной амплитуды выходного поля к входному (Векторный анализатор цепей)
- Или спектральную мощность (плотность) (Спектральный анализатор)
- Или временную развертку поля (быстрый АЦП)





Спектроскопия от магнитного поля



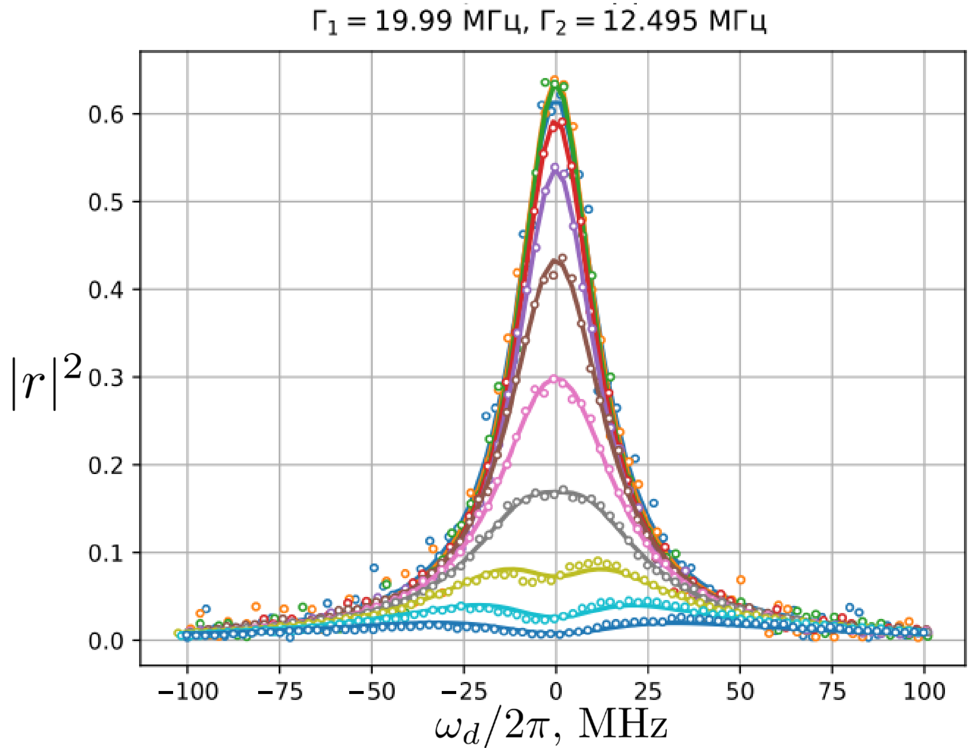


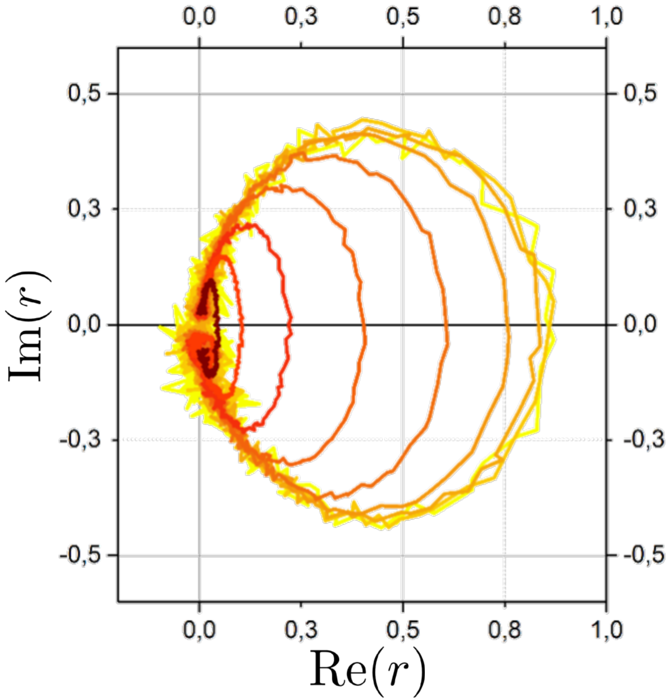
Scattered light properties

The stationary case from master equation: $\dot{\rho} = -i[H_{\mathrm{RWA}}, \rho] + \hat{\mathcal{L}}\rho$

$$H_{\mathrm{RWA}} = UHU^\dagger - i\dot{U}U^\dagger \approx \frac{1}{2}\begin{bmatrix} -\omega_d + \omega_q & \Omega e^{-i\varphi} \\ \Omega e^{i\varphi} & \omega_d - \omega_q \end{bmatrix}, \quad \mathcal{L} = \begin{bmatrix} -\Gamma_1(\rho_z + 1) & -\Gamma_1\left(\frac{\rho_x}{2} - \frac{i\rho_y}{2}\right) - \gamma_\phi(\rho_x - i\rho_y) \\ -\Gamma_1\left(\frac{\rho_x}{2} + \frac{i\rho_y}{2}\right) - \gamma_\phi(\rho_x + i\rho_y) & \Gamma_1(\rho_z + 1) \end{bmatrix}$$

$$\dot{\rho} = 0 \rightarrow r = \frac{V_{sc}}{V} = \frac{1 + i\lambda}{1 + \lambda^2 + \Omega^2/\Gamma_1\Gamma_2}, \lambda = \delta\omega/\Gamma_2$$

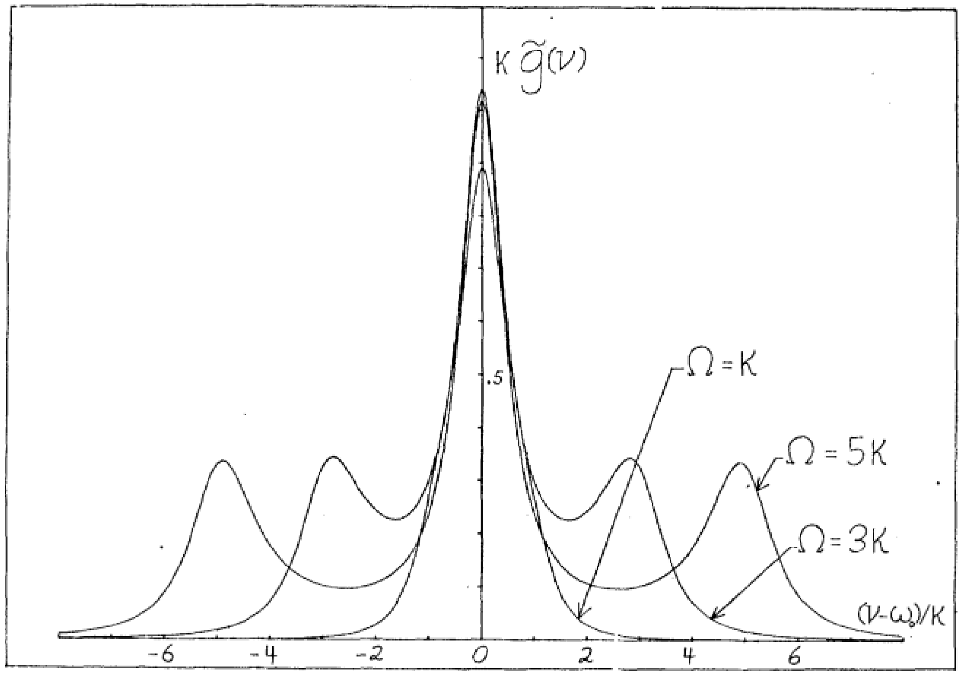




- Measured by VNA – well-defined phase
- But there is also incoherent part

Scattered light properties

Spectrum of scattered light



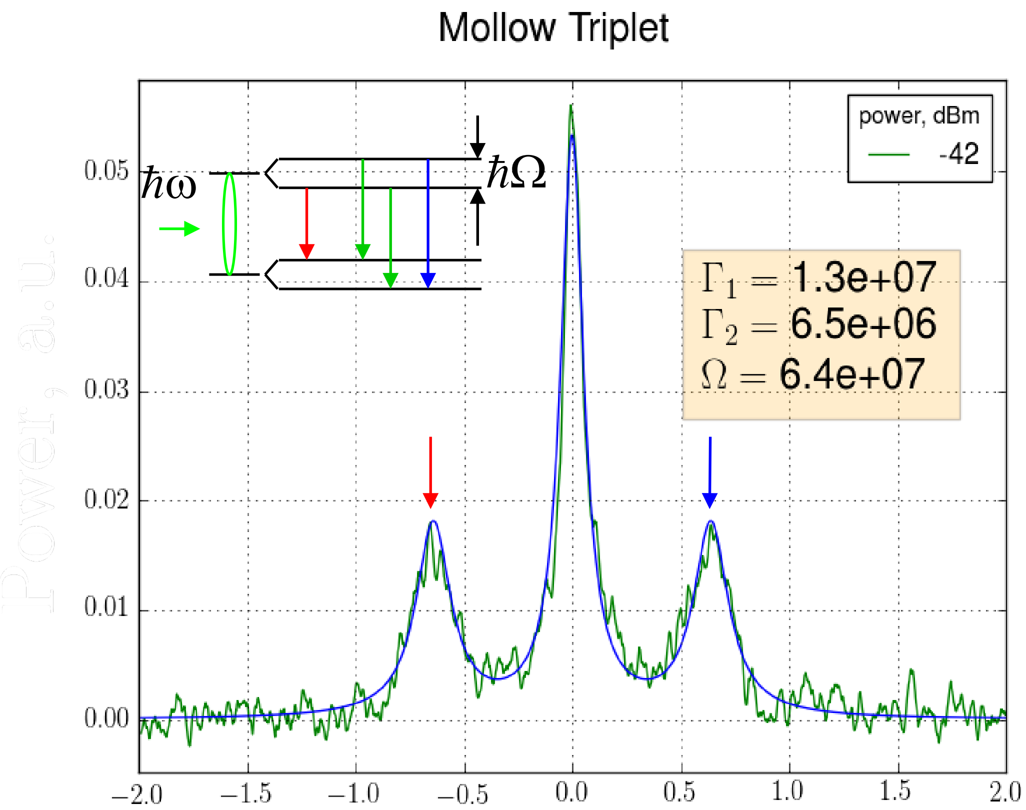
Mollow, *Phys. Rev.* 88(5), 1969

$$S_{in}(\omega) = \frac{\hbar\omega_q\Gamma_1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\langle\Delta\hat{\sigma}_+(0)\Delta\hat{\sigma}_-(\tau)\rangle_{ss}\, e^{i(\omega-\omega_d)\tau}\, d\tau.$$

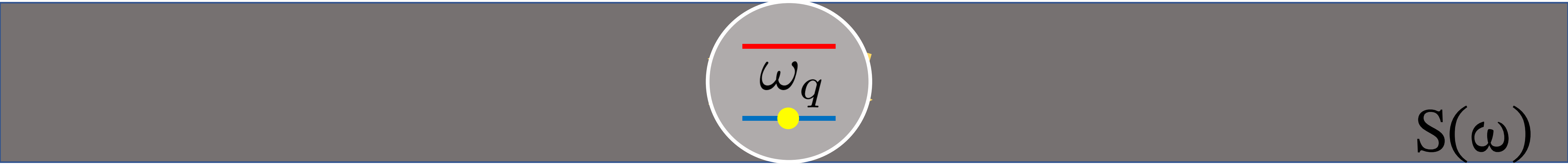
for $\Omega \gg \Gamma_1, \delta\omega$

$$\boxed{S_{in}(\delta\omega) = \frac{1}{2\pi}\frac{\hbar\omega_q\Gamma_1}{4}\left(\frac{\gamma_s}{(\delta\omega+\Omega)^2+\gamma_s^2} + \frac{2\gamma_c}{\delta\omega^2+\gamma_c^2} + \frac{\gamma_s}{(\delta\omega-\Omega)^2+\gamma_s^2}\right)}$$

$\gamma_c = \Gamma_1/2 + \gamma_\varphi = \Gamma_2$, $\gamma_s = 3\Gamma_1/4 + \gamma_\varphi/4 = (\Gamma_1+\Gamma_2)/2$

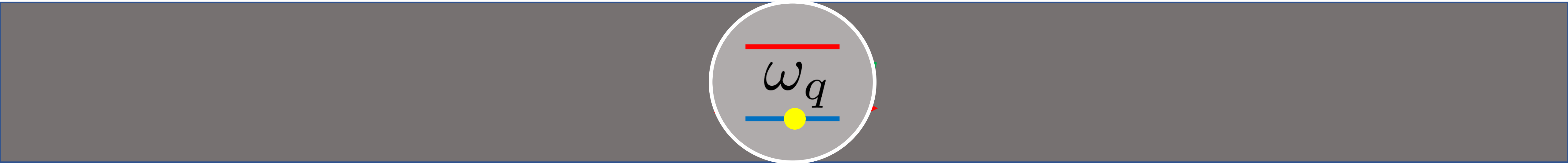


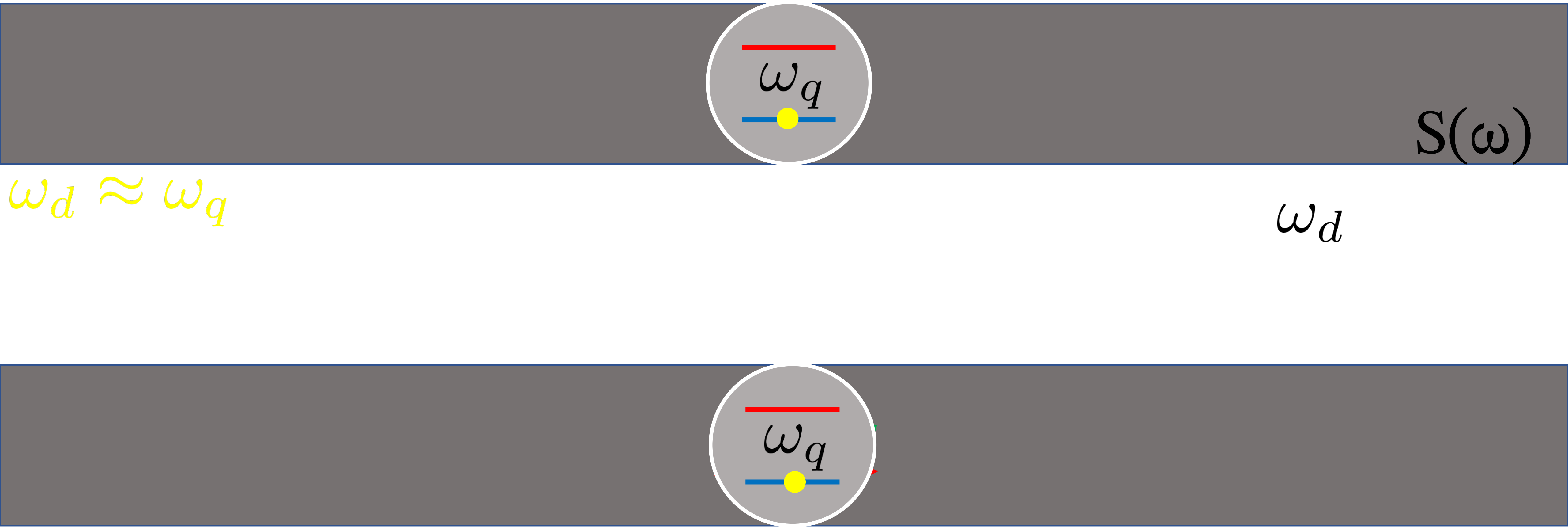
Astafiev et al., *Science*, 2010

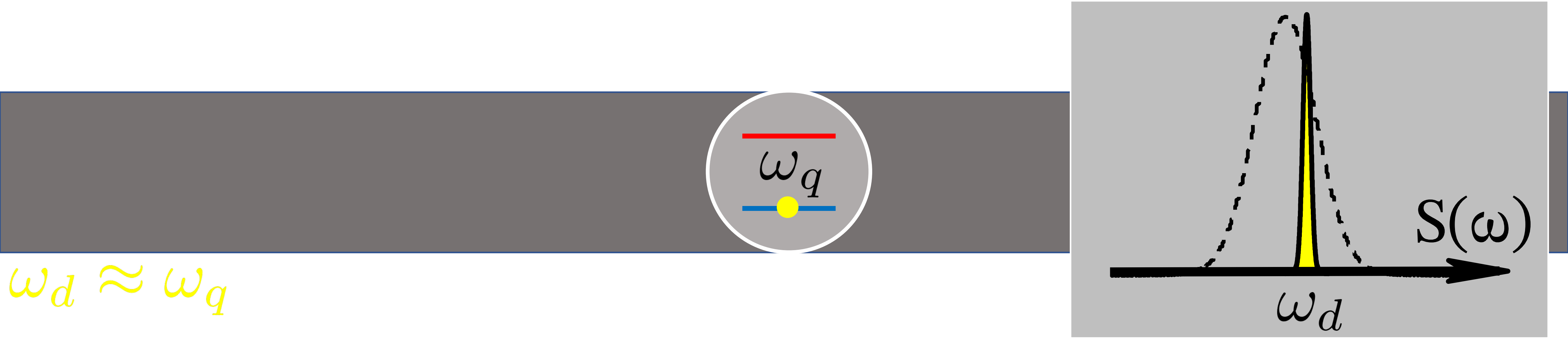


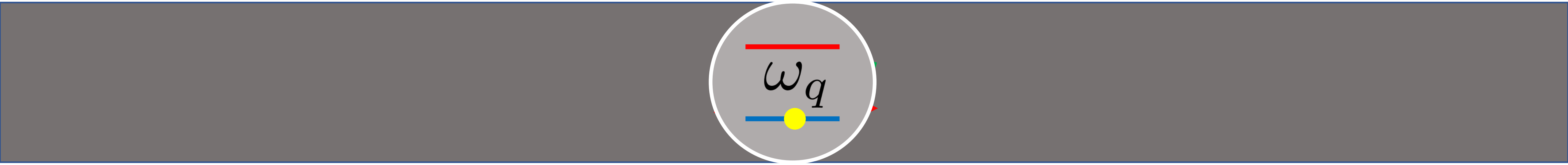
$\omega_d \approx \omega_q$

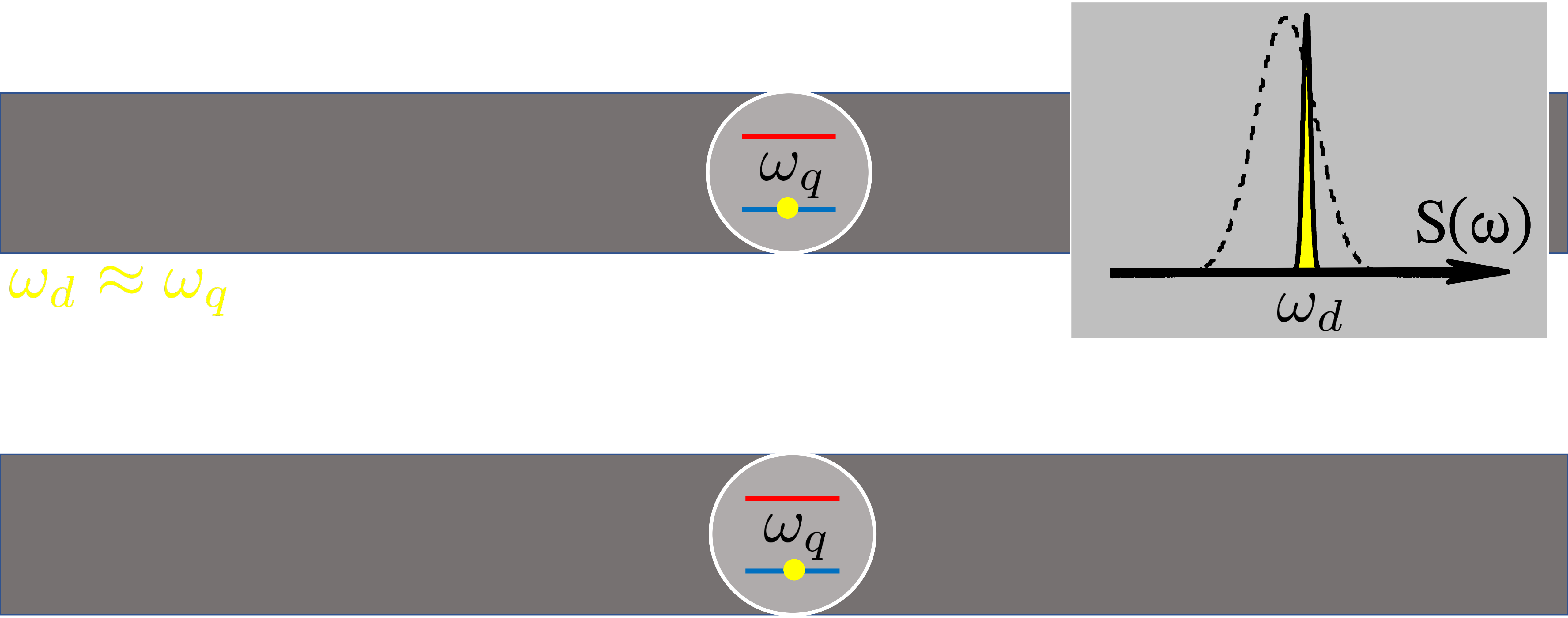
ω_d




ω_q
$S(\omega)$
$\omega_d \approx \omega_q$
ω_d
ω_q


ω_q
S(ω)
ω_d
$\omega_d \approx \omega_q$


ω_q


ω_q
$\omega_d \approx \omega_q$
$S(\omega)$
ω_d
ω_q


ω_q
$\omega_d \approx \omega_q$
$S(\omega)$
ω_d
ω_q
$S(\omega)$

Четырехволновое смешение

Четырехволновое смешение

- В нелинейной среде: $P^{(3)} \propto E^3$

Четырехволновое смешение

- В нелинейной среде: $P^{(3)} \propto E^3$
- Бихроматическая накачка: $E(t) = E_-(t) + E_+(t) = E_- \cos \omega_- t + E_+ \cos \omega_+ t$

Четырехволновое смешение

- В нелинейной среде: $P^{(3)} \propto E^3$
- Бихроматическая накачка: $E(t) = E_-(t) + E_+(t) = E_- \cos\omega_- t + E_+ \cos\omega_+ t$

$$P^{(3)} \propto ... + E_-^2 E_+ \cos(2\omega_- - \omega_+)t + E_+^2 E_- \cos(2\omega_+ - \omega_-)t + ...$$

Четырехволновое смешение

- В нелинейной среде: $P^{(3)} \propto E^3$
- Бихроматическая накачка: $E(t) = E_-(t) + E_+(t) = E_- \cos\omega_- t + E_+ \cos\omega_+ t$

$$P^{(3)} \propto \ldots + E_-^2 E_+ \cos(2\omega_- - \omega_+)t + E_+^2 E_- \cos(2\omega_+ - \omega_-)t + \ldots$$

Четырехволновое смешение

- В нелинейной среде: $P^{(3)} \propto E^3$
- Бихроматическая накачка: $E(t) = E_-(t) + E_+(t) = E_- \cos\omega_- t + E_+ \cos\omega_+ t$

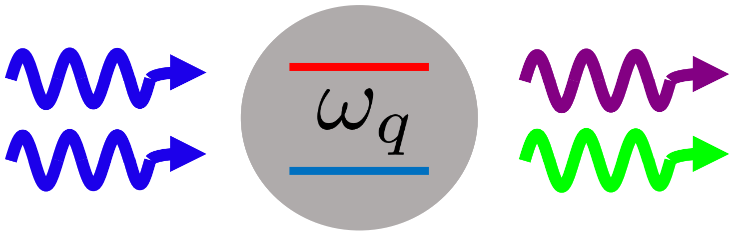
$$P^{(3)} \propto \ldots + E_-^2 E_+ \cos(2\omega_- - \omega_+)t + E_+^2 E_- \cos(2\omega_+ - \omega_-)t + \ldots$$

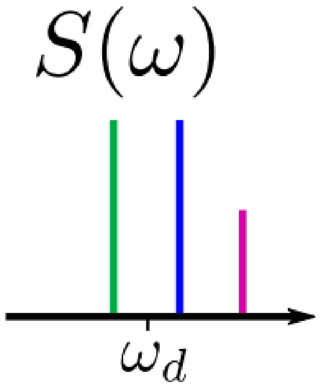
Четырехволновое смешение

- В нелинейной среде: $P^{(3)} \propto E^3$
- Бихроматическая накачка: $E(t) = E_-(t) + E_+(t) = E_- \cos\omega_- t + E_+ \cos\omega_+ t$

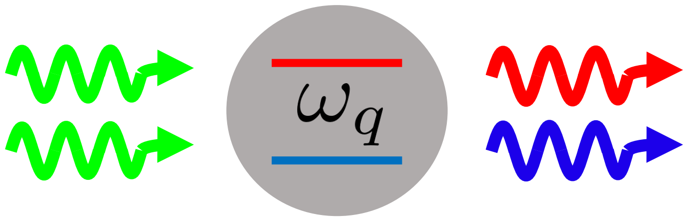
$$P^{(3)} \propto \ldots + E_-^2 E_+ \cos(2\omega_- - \omega_+)t + E_+^2 E_- \cos(2\omega_+ - \omega_-)t + \ldots$$

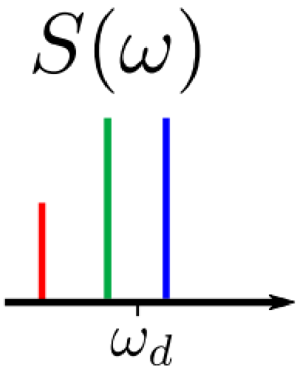
- Можно рассматривать кубит как нелинейную среду – происходит многофотонное рассеяние:





$2\omega_+ = \omega_- + 2\omega_+ - \omega_-$





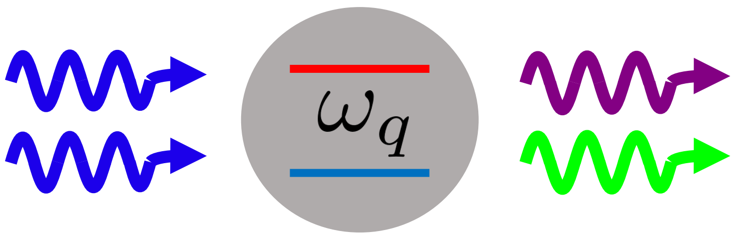
$2\omega_- = \omega_+ + 2\omega_- - \omega_+$

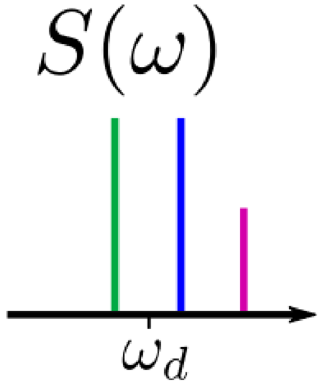
Четырехволновое смешение

- В нелинейной среде: $P^{(3)} \propto E^3$
- Бихроматическая накачка: $E(t) = E_-(t) + E_+(t) = E_- \cos\omega_- t + E_+ \cos\omega_+ t$

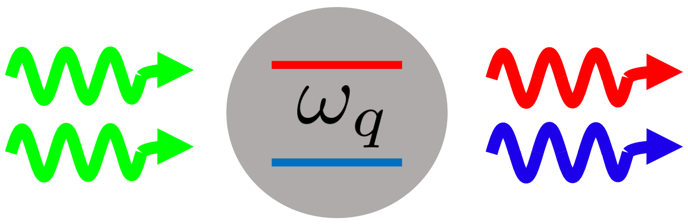
$$P^{(3)} \propto \ldots + E_-^2 E_+ \cos(2\omega_- - \omega_+)t + E_+^2 E_- \cos(2\omega_+ - \omega_-)t + \ldots$$

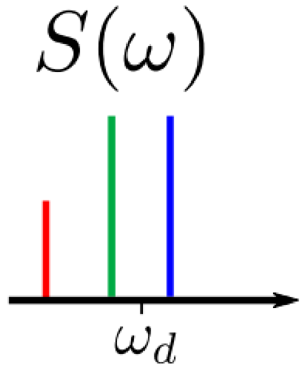
- Можно рассматривать кубит как нелинейную среду – происходит многофотонное рассеяние:





$2\omega_+ = \omega_- + 2\omega_+ - \omega_-$

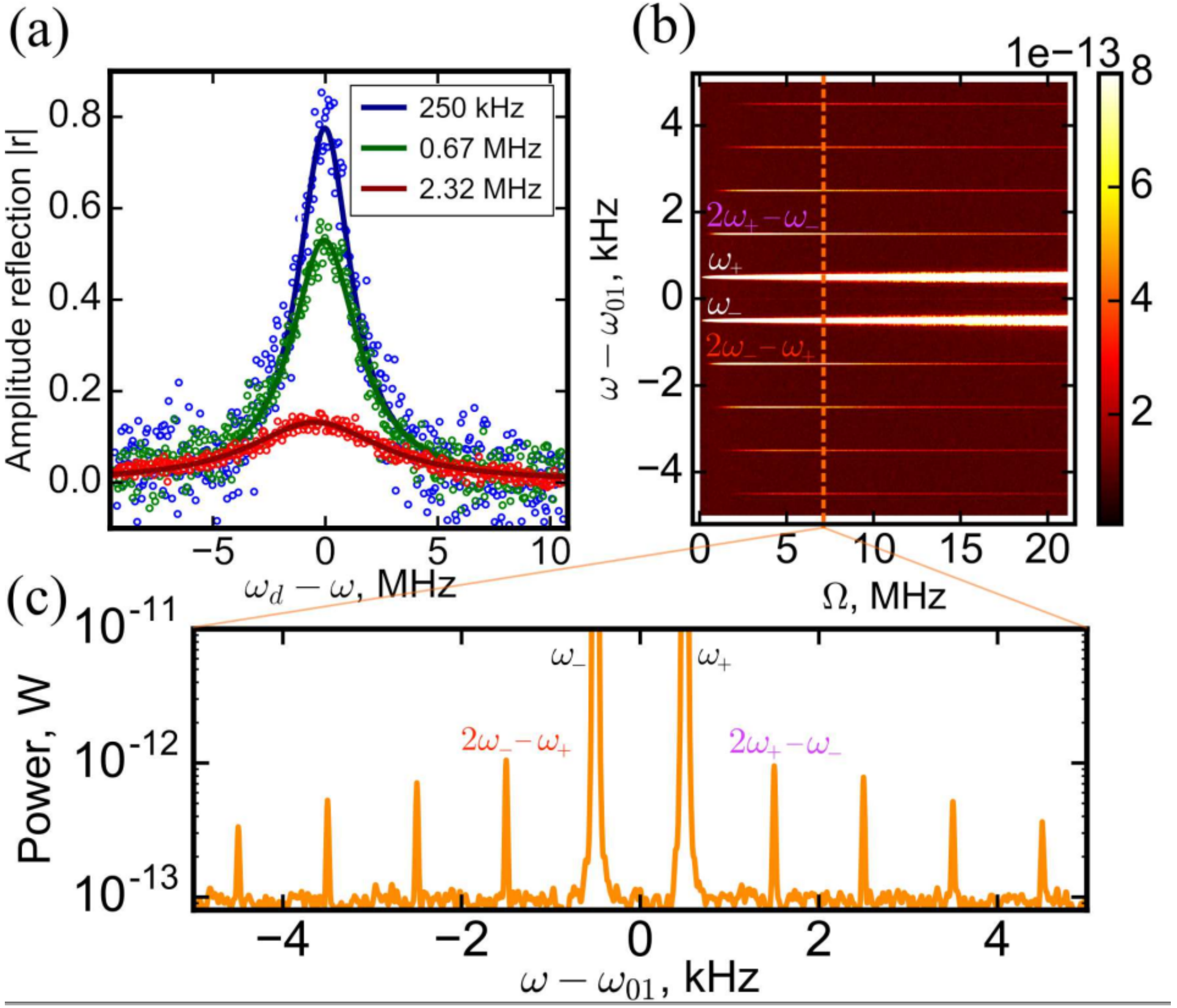




$2\omega_- = \omega_+ + 2\omega_- - \omega_+$

Y. Zhu, Phys Rev A (1989) – экспериментальная демонстрация неэластичной части (атомы Ba)
G. Agarwal, JOSA B (1991) – численный расчет полного спектра флуоресценции
W. Ruyten, JOSA B (1992) – аналитический расчет эластичной части спектра
H. Freedhoff, Phys Rev A (1990) – аналитический расчет неэластичной части спектра

Обнаружение волнового смешения



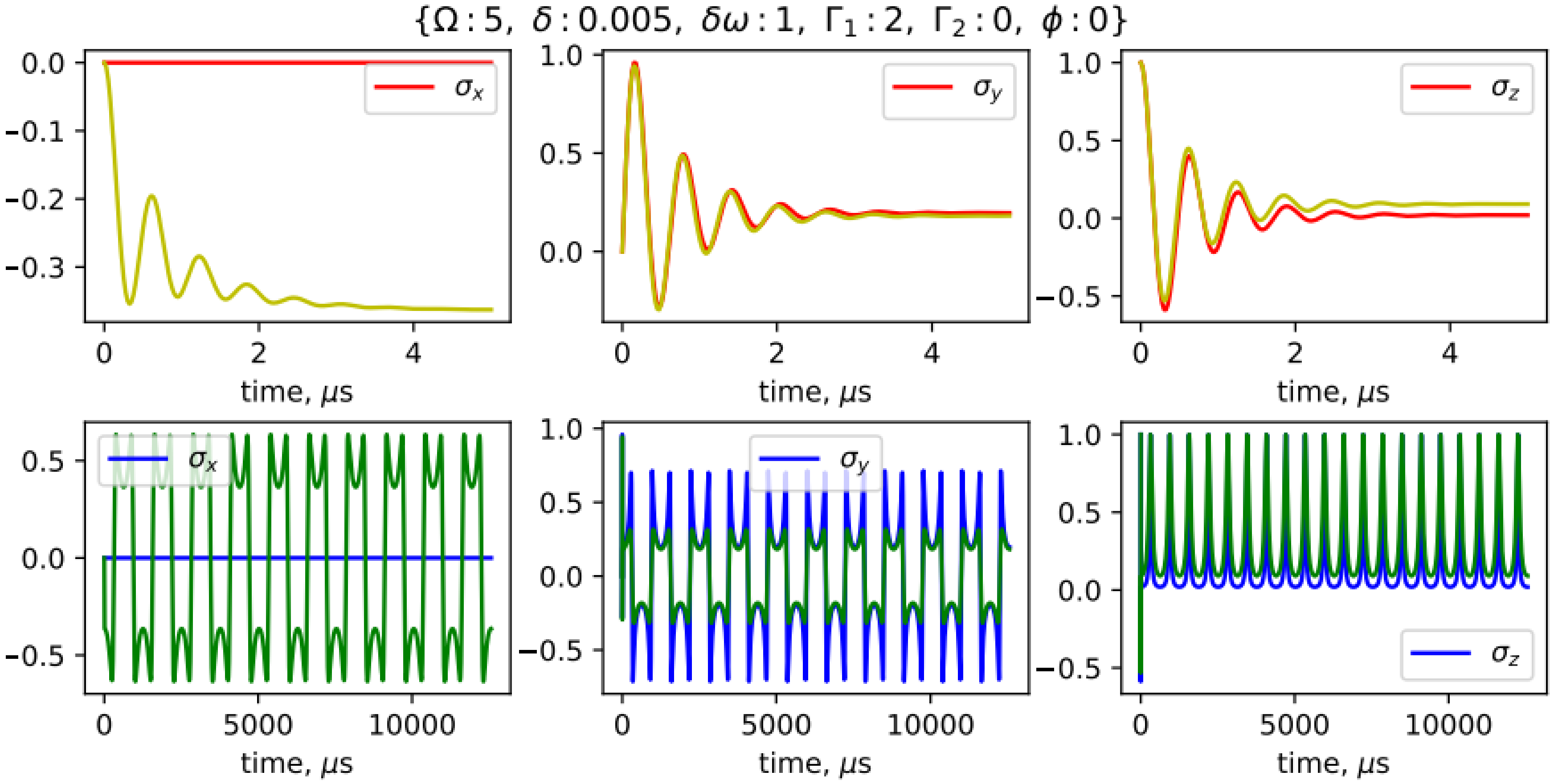
- Emission at frequencies:

$$\omega_{\pm(2p-1)} = (p+1)\omega_\pm - p\omega_\mp$$

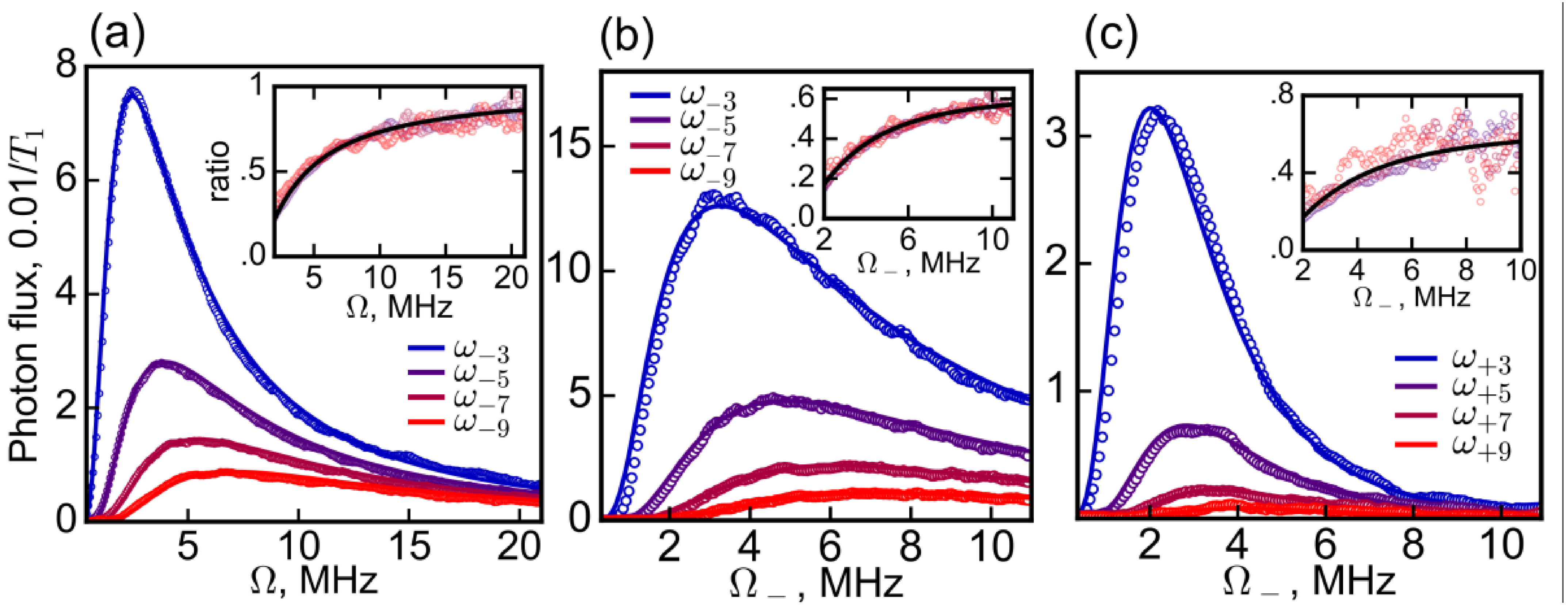
Dmitriev et al, PRA (2019)

Численный расчет динамики

$$H = -\frac{\hbar\omega_{01}}{2}\sigma_z - \hbar\Omega_-\sigma_x\cos(\omega_d t - \delta\omega t) - \hbar\Omega_+\sigma_x\cos(\omega_d t + \delta\omega t),$$



Интенсивности боковых компонент



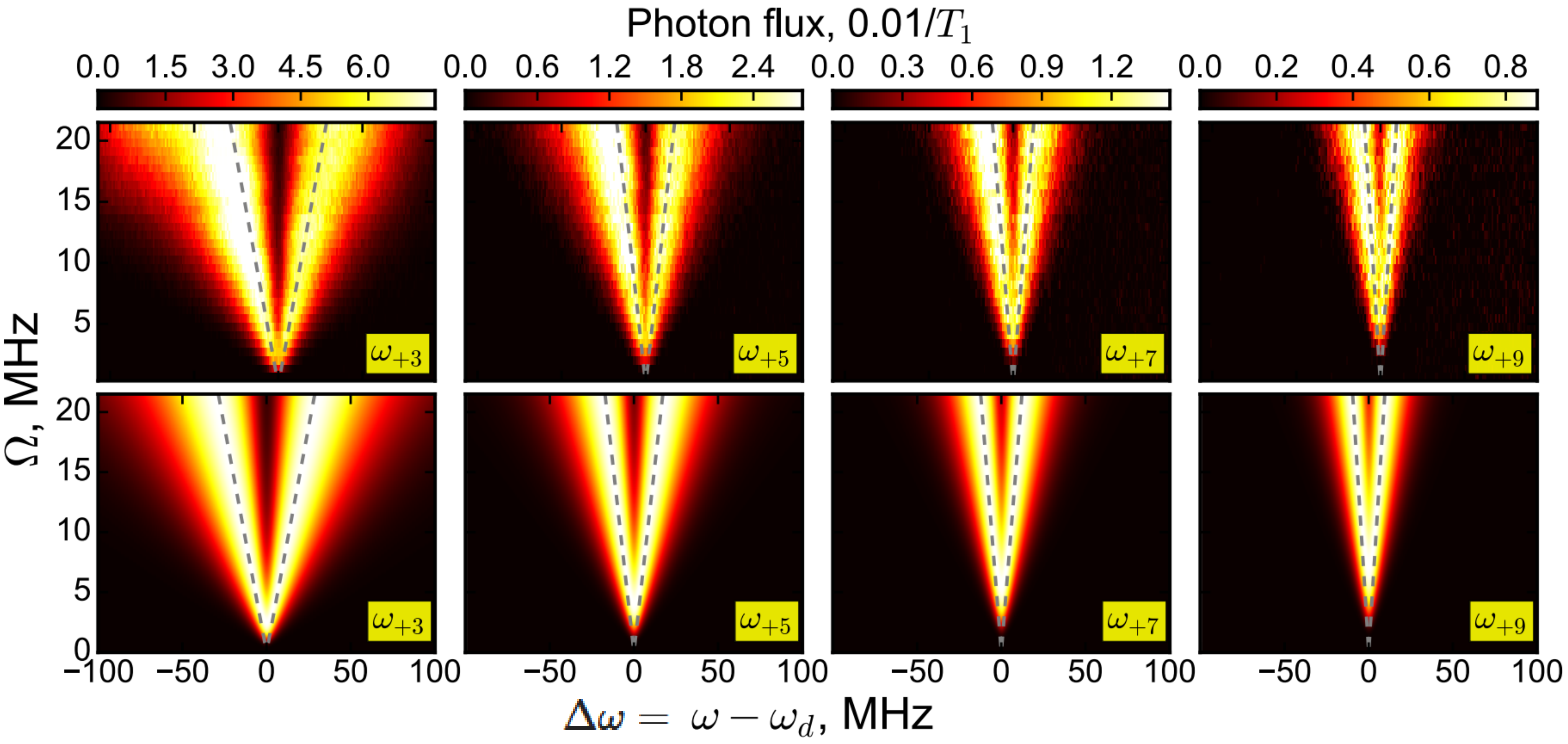
$$\langle\sigma^-\rangle = -\frac{\sin\theta}{\Lambda}\,\frac{\Omega_- e^{-i\delta\omega t}+\Omega_+ e^{i\delta\omega t}}{1+\sin\theta\cos 2\delta\omega t}.$$

$$\boxed{V^{sc}_{\pm(2p+1)} = \frac{(-1)^p\Gamma_1\tan\theta\tan^p\frac{\theta}{2}}{\Lambda}\left(V_\mp\tan\frac{\theta}{2}-V_\pm\right),}$$

$$\theta=\theta(\Omega_+,\Omega_-,\Gamma_1,\Gamma_2,\lambda)\qquad \Lambda=\Lambda(\Omega_+,\Omega_-,\Gamma_1,\Gamma_2,\lambda)$$

Dmitriev et al, PRA (2019)

Расщепление боковых компонент



Пунктирные линии соответствуют $\Delta\omega = 4\Omega/(2p+1)$

Dmitriev et al, PRA (2019)

Гомодинная схема измерений

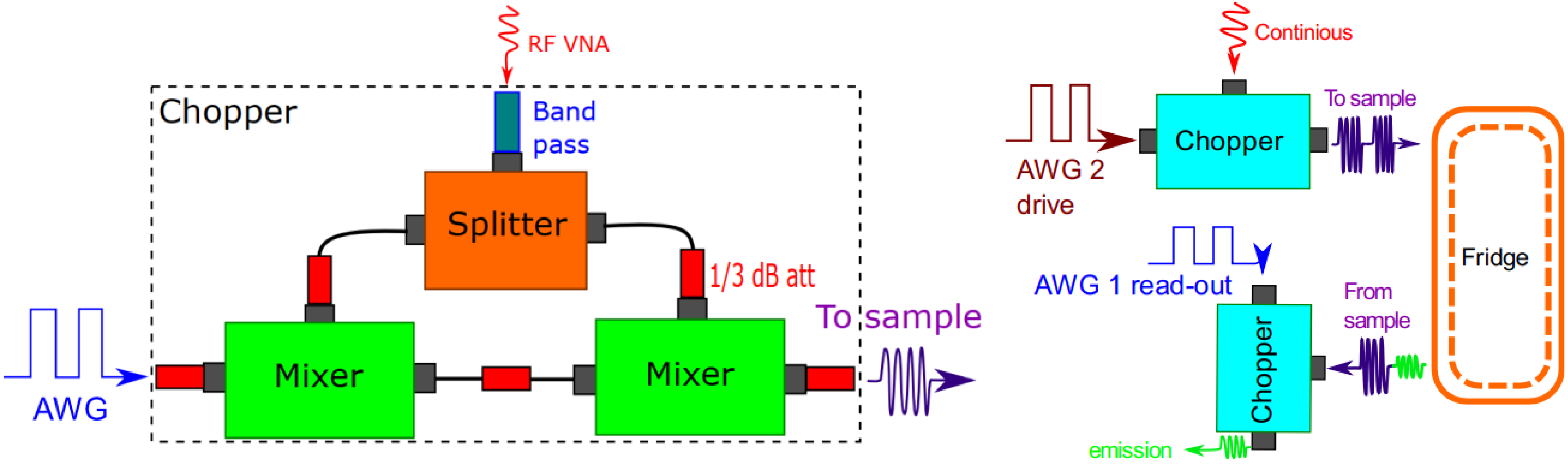
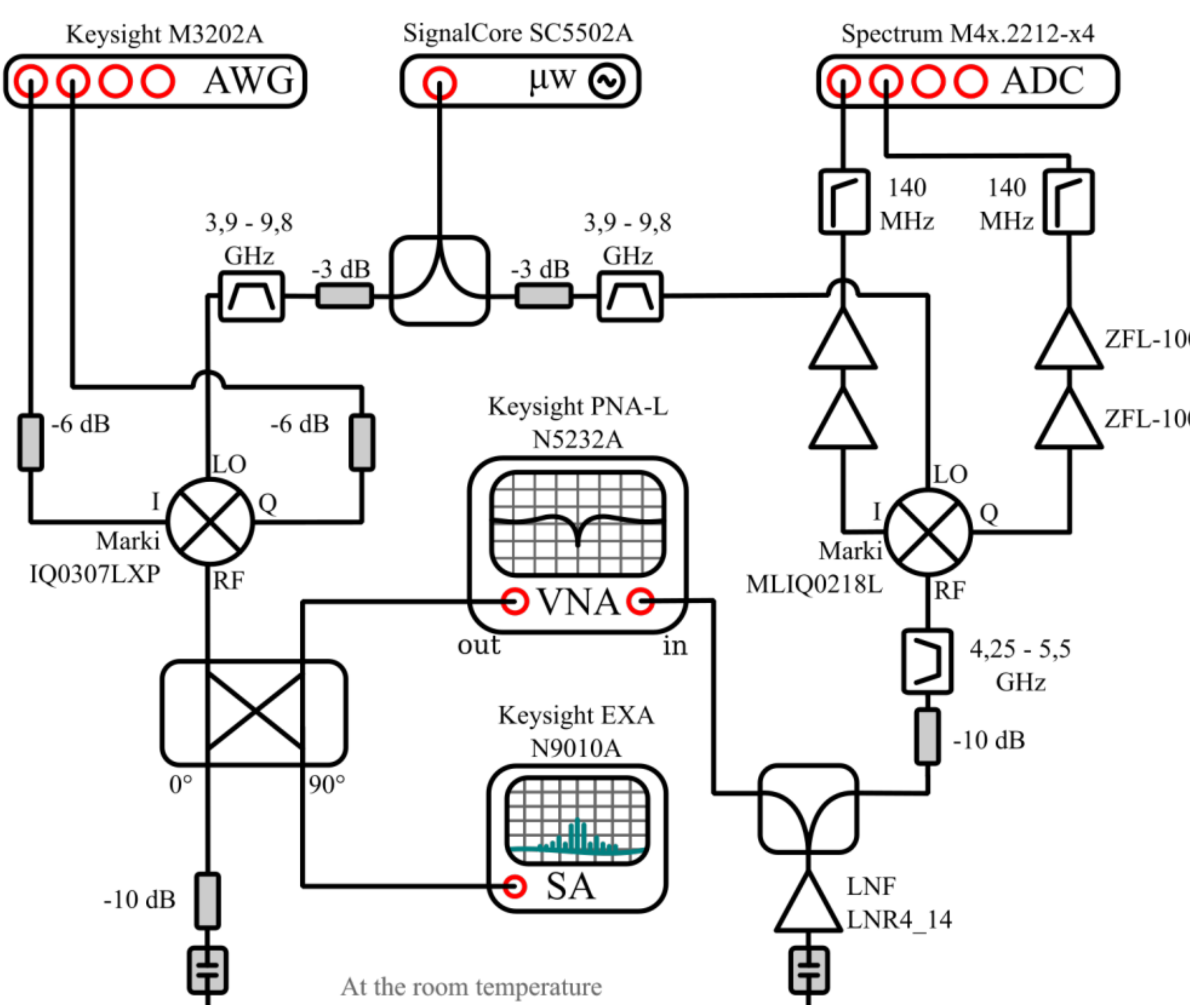
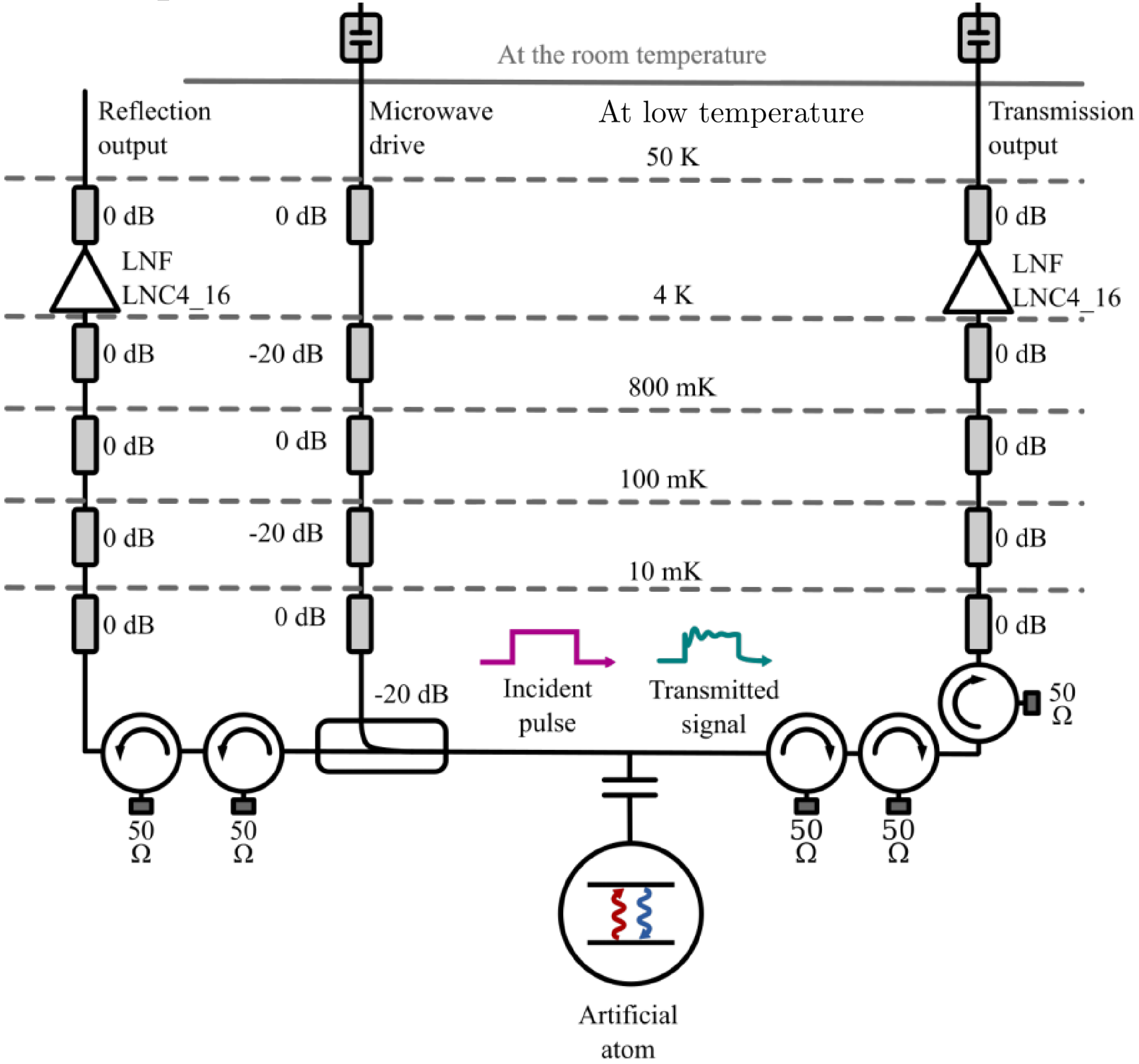


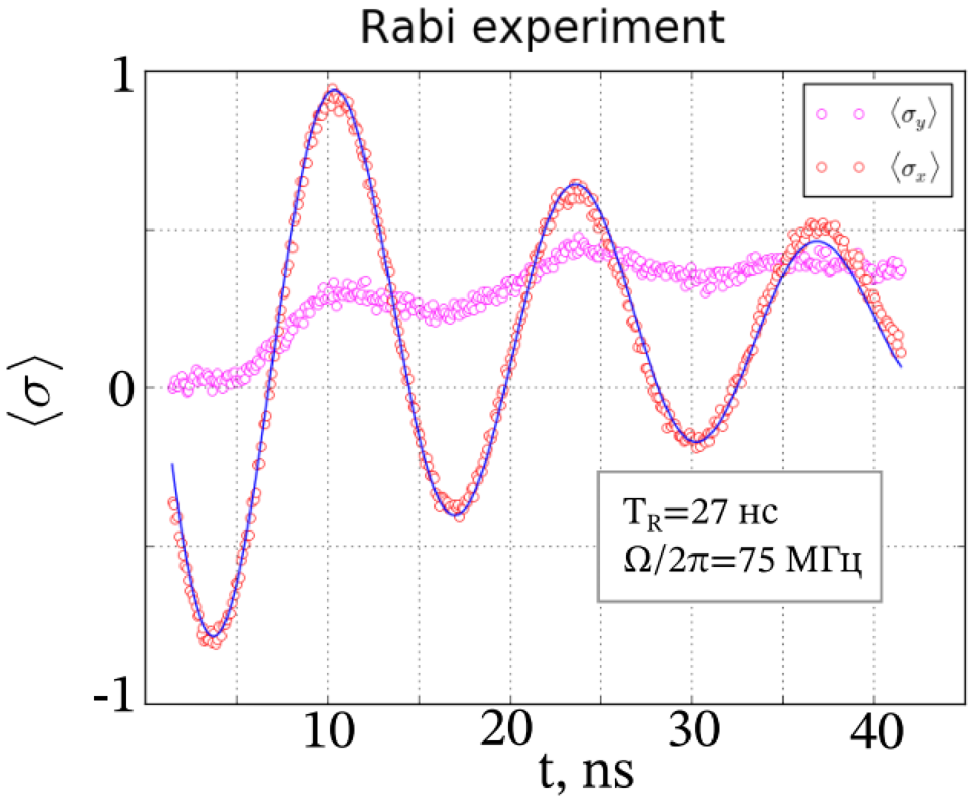
Рисунок 2.22 — Гомодинная схема для импульсных измерений осцилляций Раби. Слева: сборка «чоппера» на основе двух двойных сбалансированных смесителей. Справа: схема измерения Раби осцилляций.

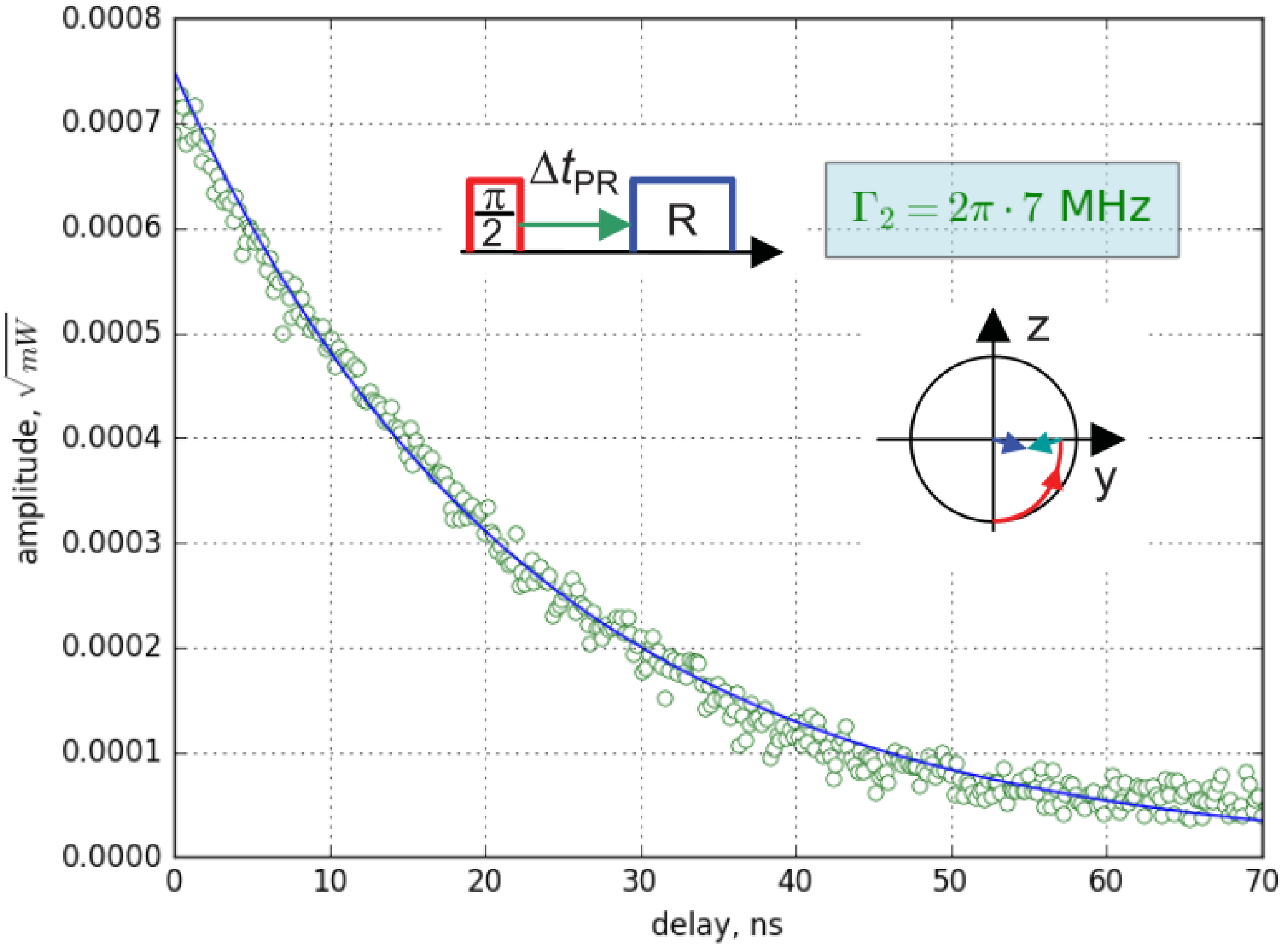
Гетеродинная схема измерений



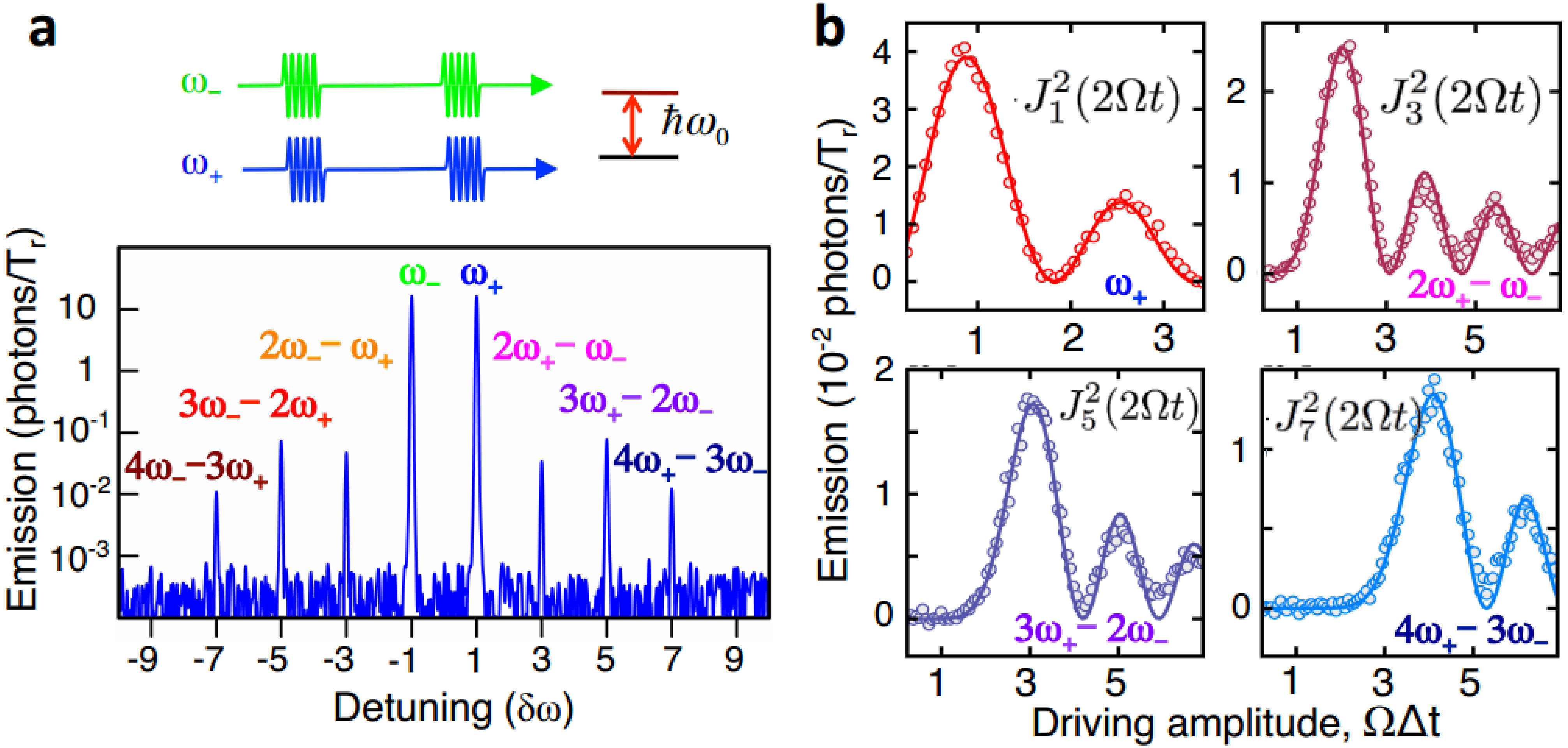


Импульсная динамика: Раби осцилляции и распад из состояния на экваторе

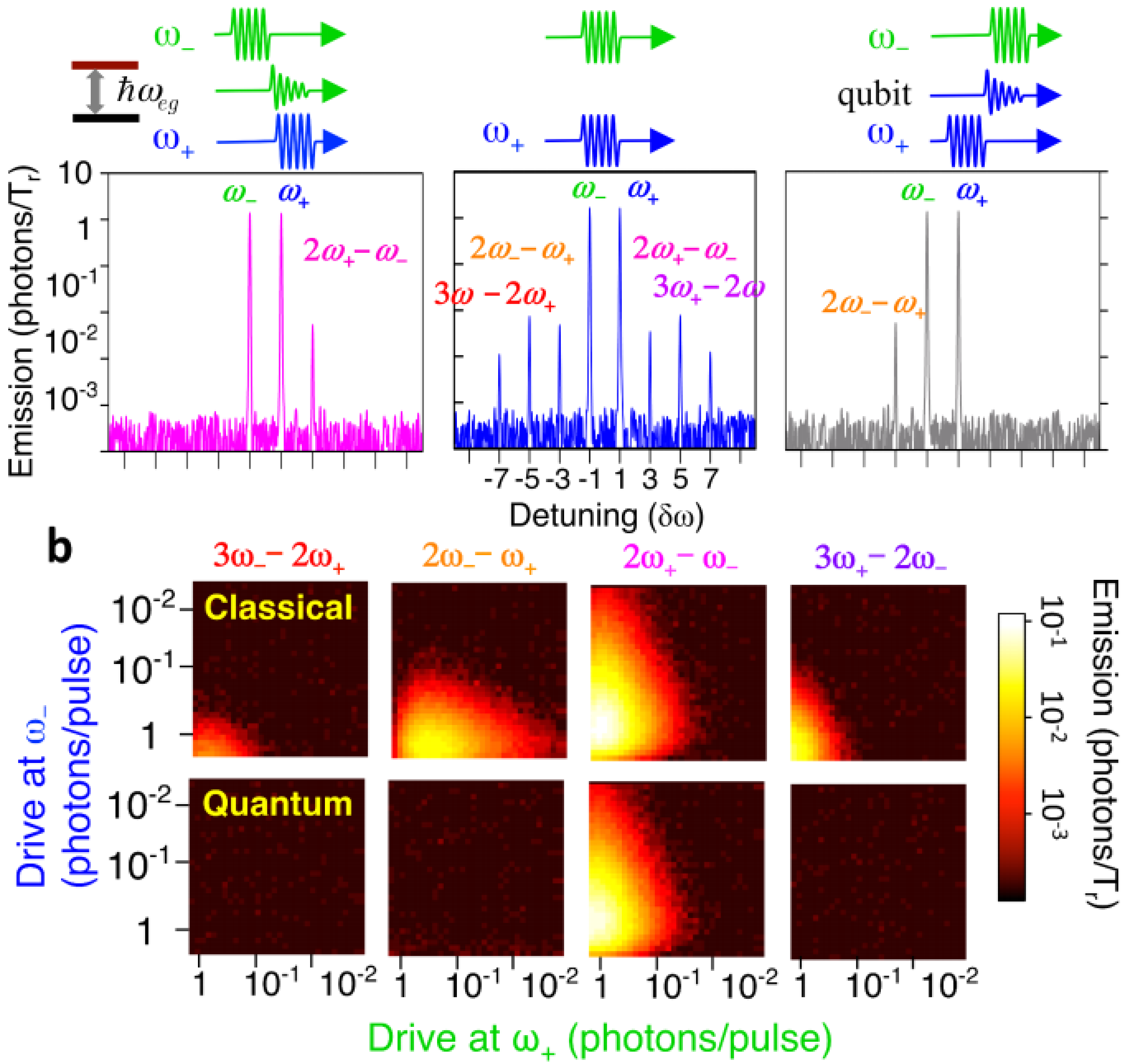




Бесселевская динамика компонент



Wave mixing of pulsed light

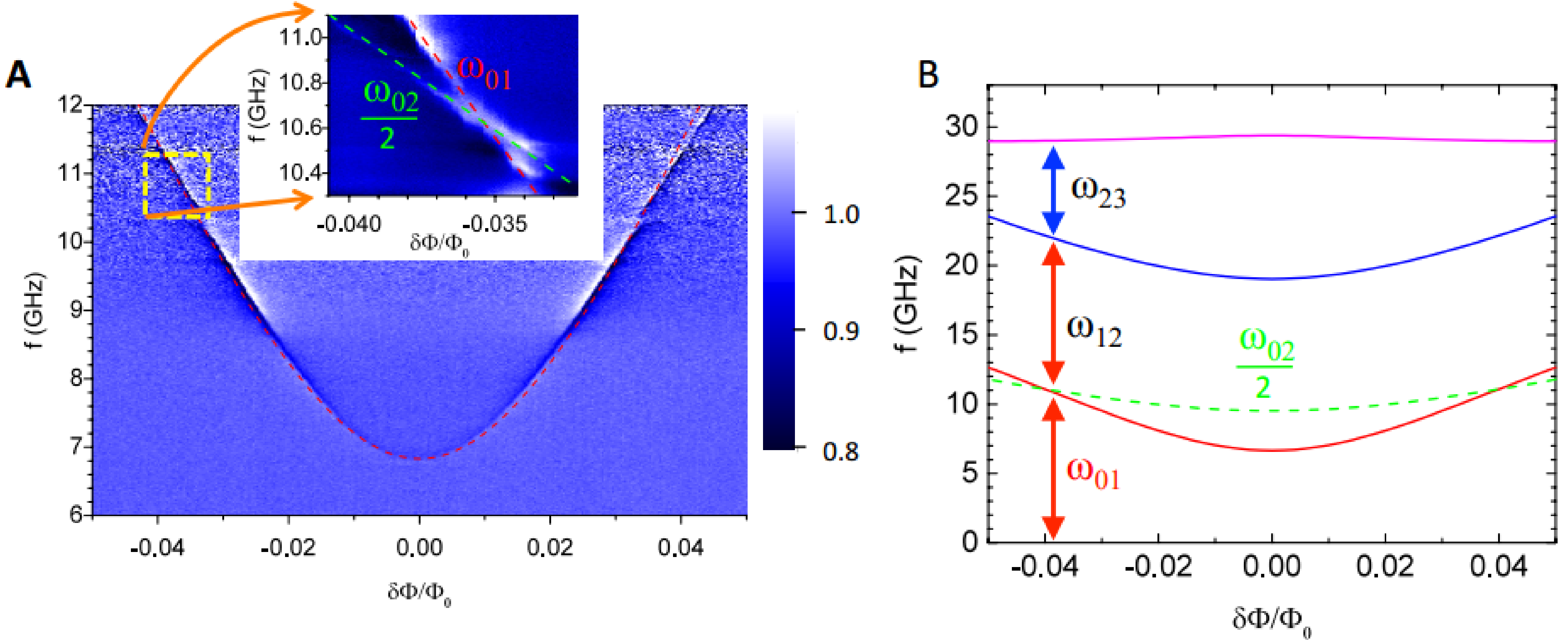


$$\langle b_p^- \rangle = B_-^2 B_+^2 \langle 0,\alpha_-,\alpha_+ | \Big(-\underbrace{b_p^- \hat\beta_+^+}_{e^{i\delta t}} - \underbrace{b_p^- \hat\beta_-^+}_{e^{-i\delta t}} + \underbrace{\hat\beta_-^- \hat\beta_+^+ b_p^- \hat\beta_-^+}_{e^{i\delta t}} + \underbrace{\hat\beta_+^+ \hat\beta_-^- b_p^- \hat\beta_+^+}_{e^{3i\delta t}} \Big) |0,\alpha_-,\alpha_+\rangle$$

- Только три пика, одна боковая компонента, независимо от амплитуды
- Если импульсы перекрываются - опять много компонент

Dmitriev A. et al, *Nat. Comm.* (2017)

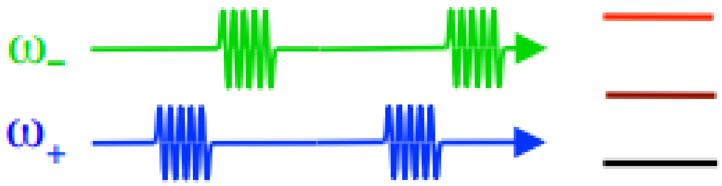
Трехуровневая эквидистантная система

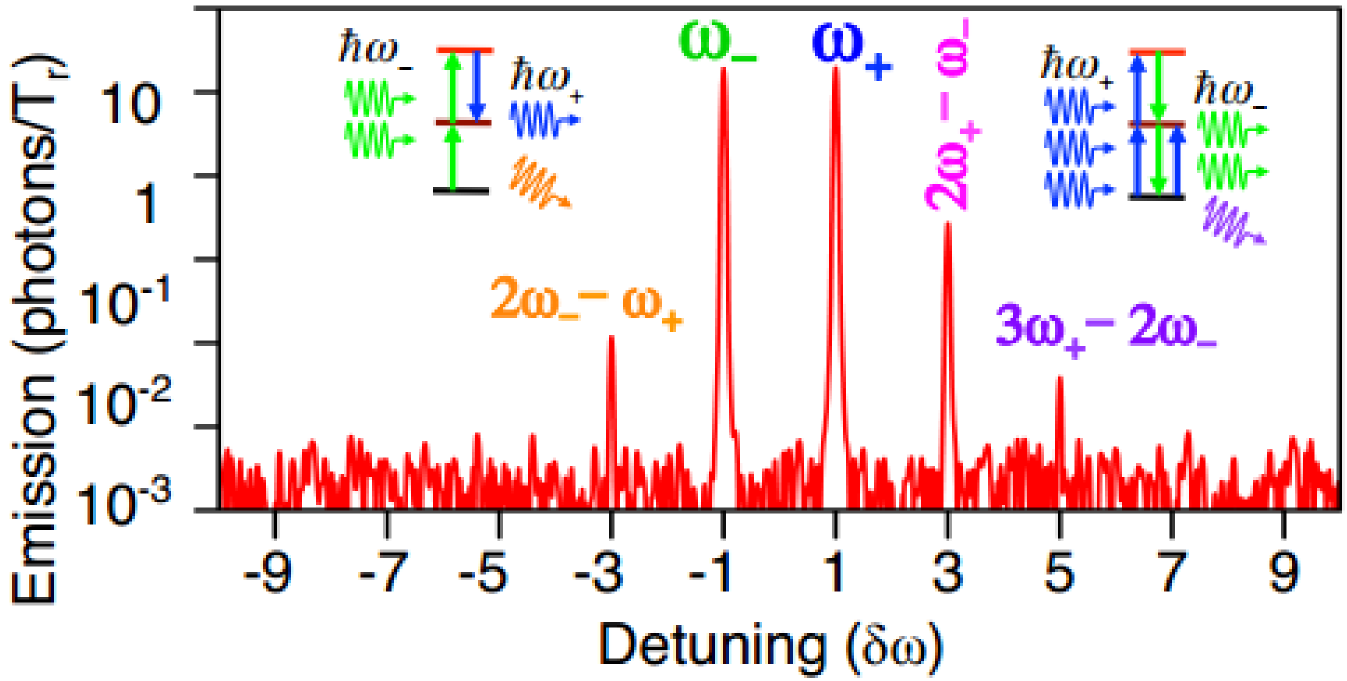


Трехуровневая эквидистантная система

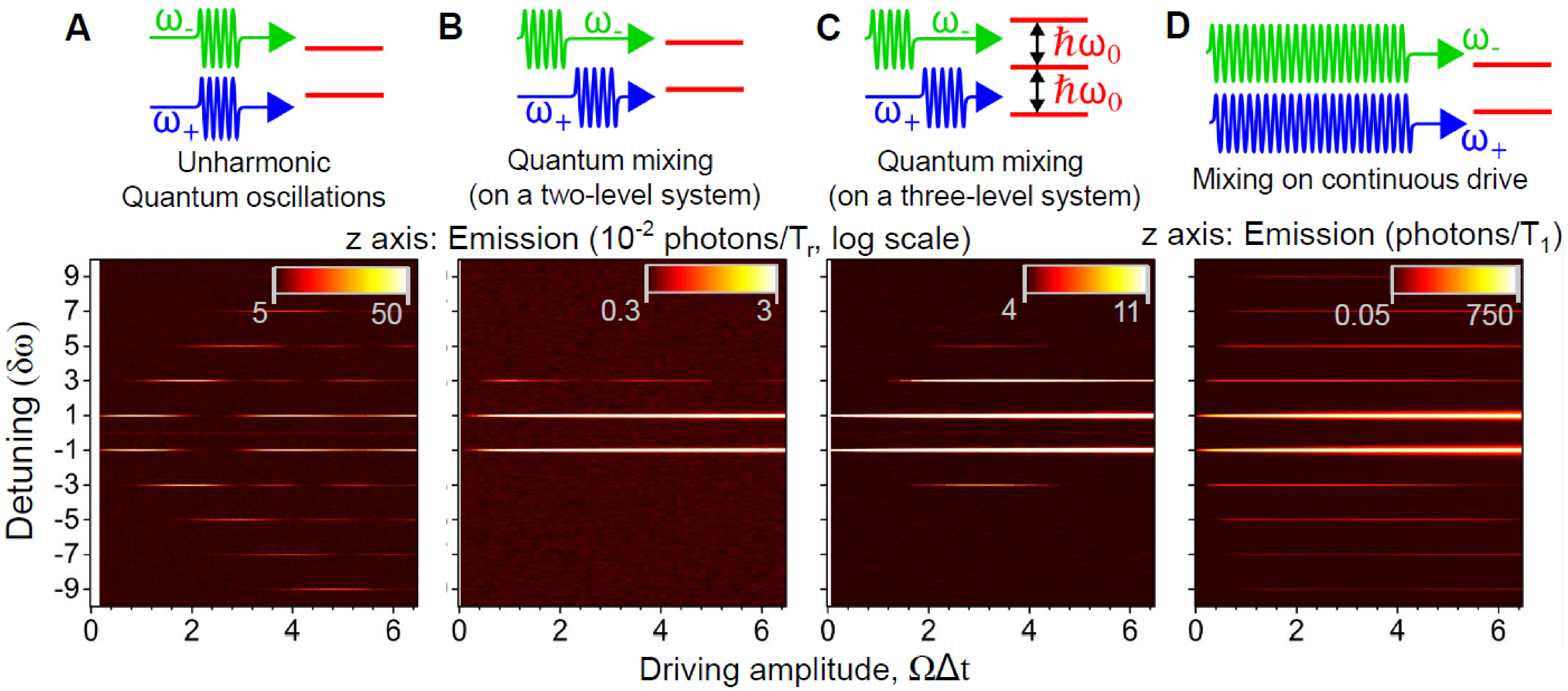
$N_{ph} = 2 \Rightarrow 5$ peaks

$|\gamma\rangle_- = C\left(|0\rangle + \gamma_1|1\rangle + \gamma_2|2\rangle\right)$

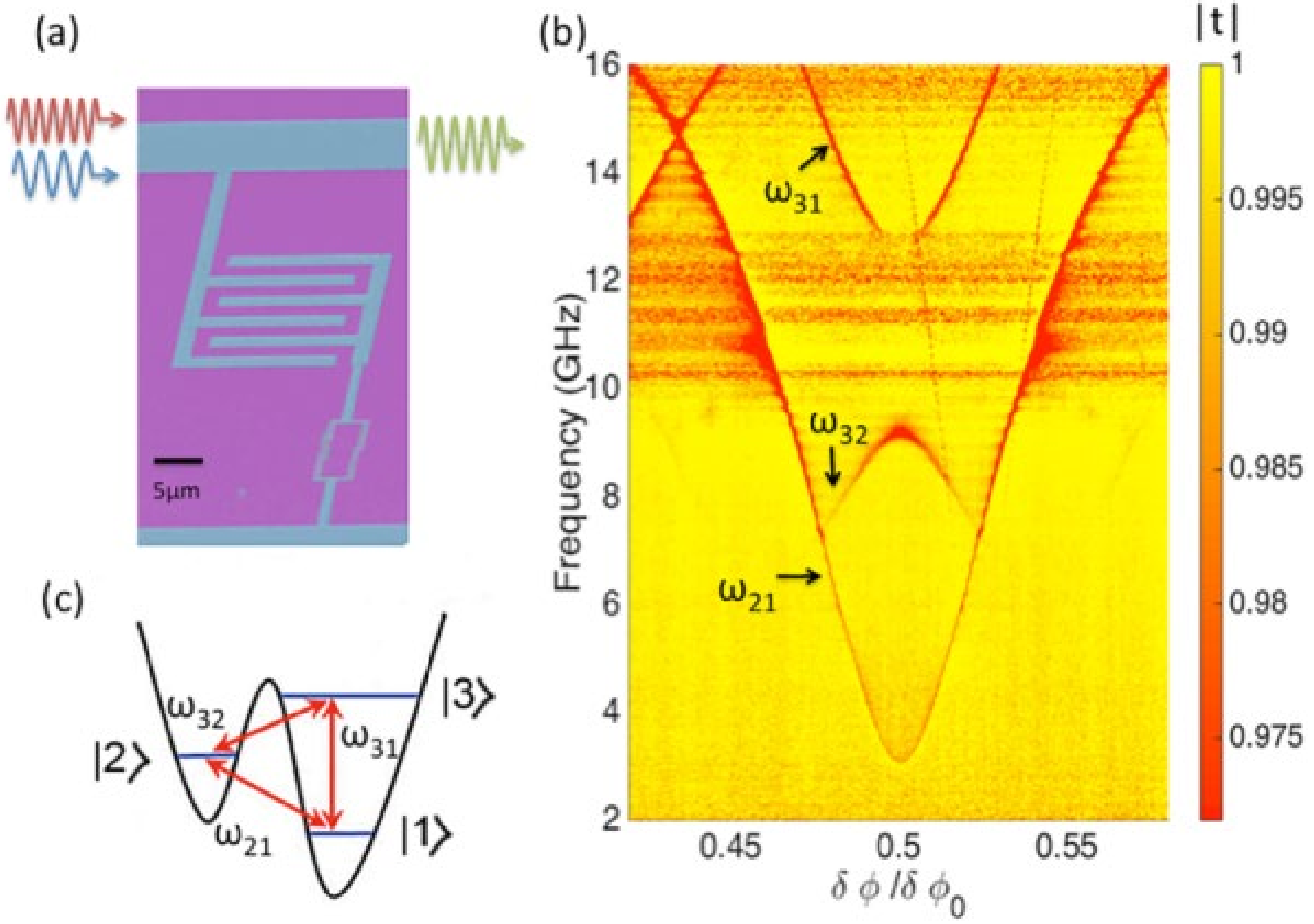


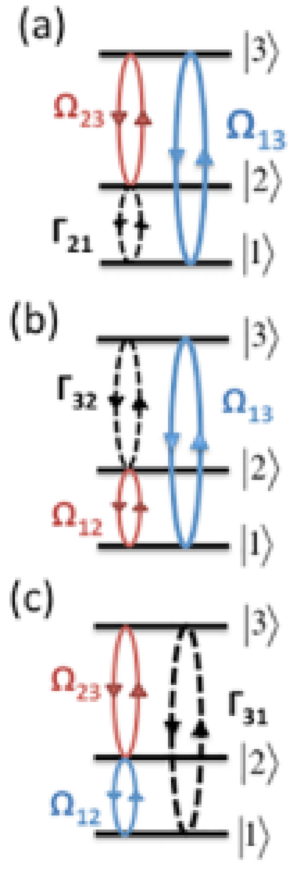


Сравнение режимов

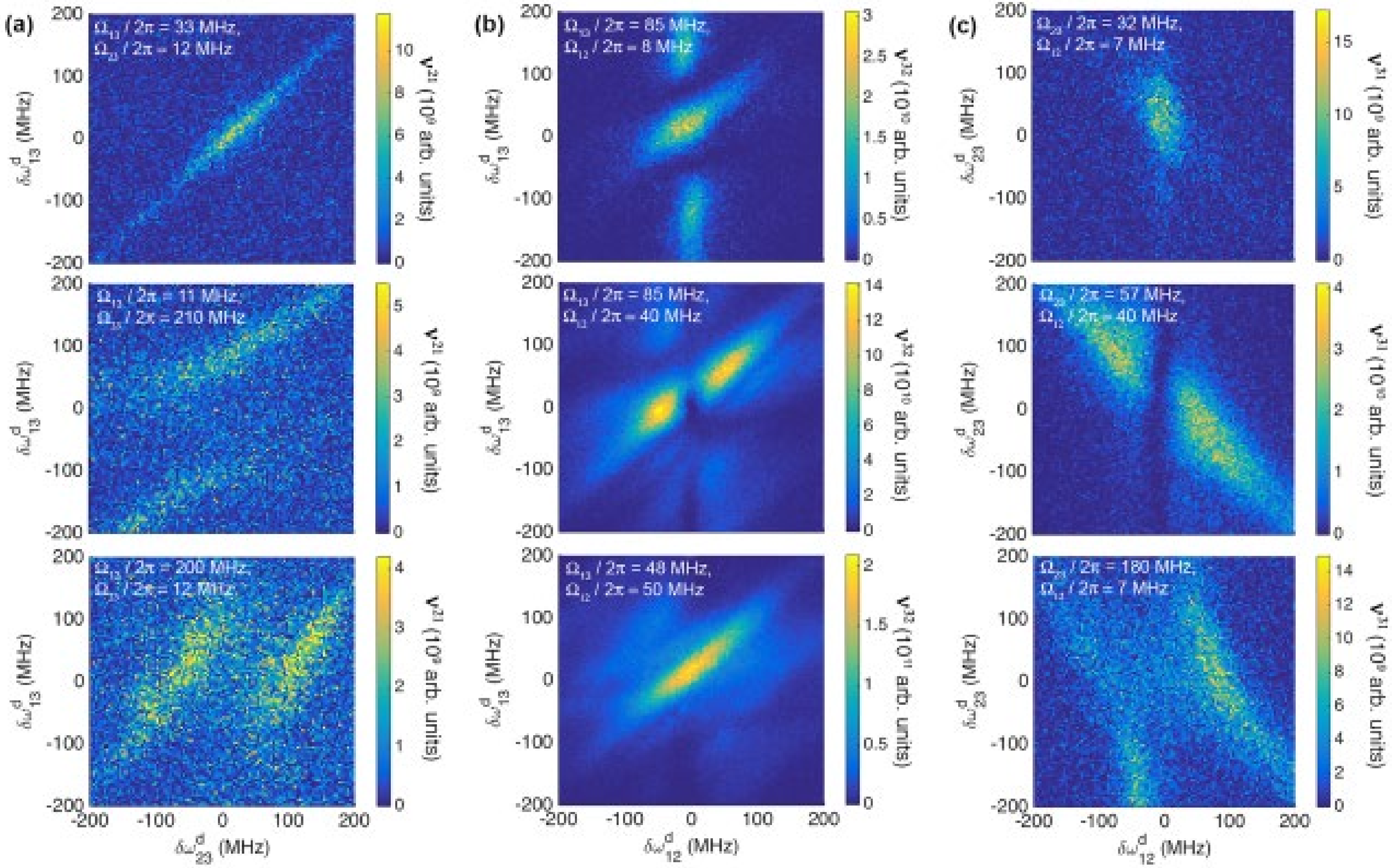


Трёхуровневая Δ-система

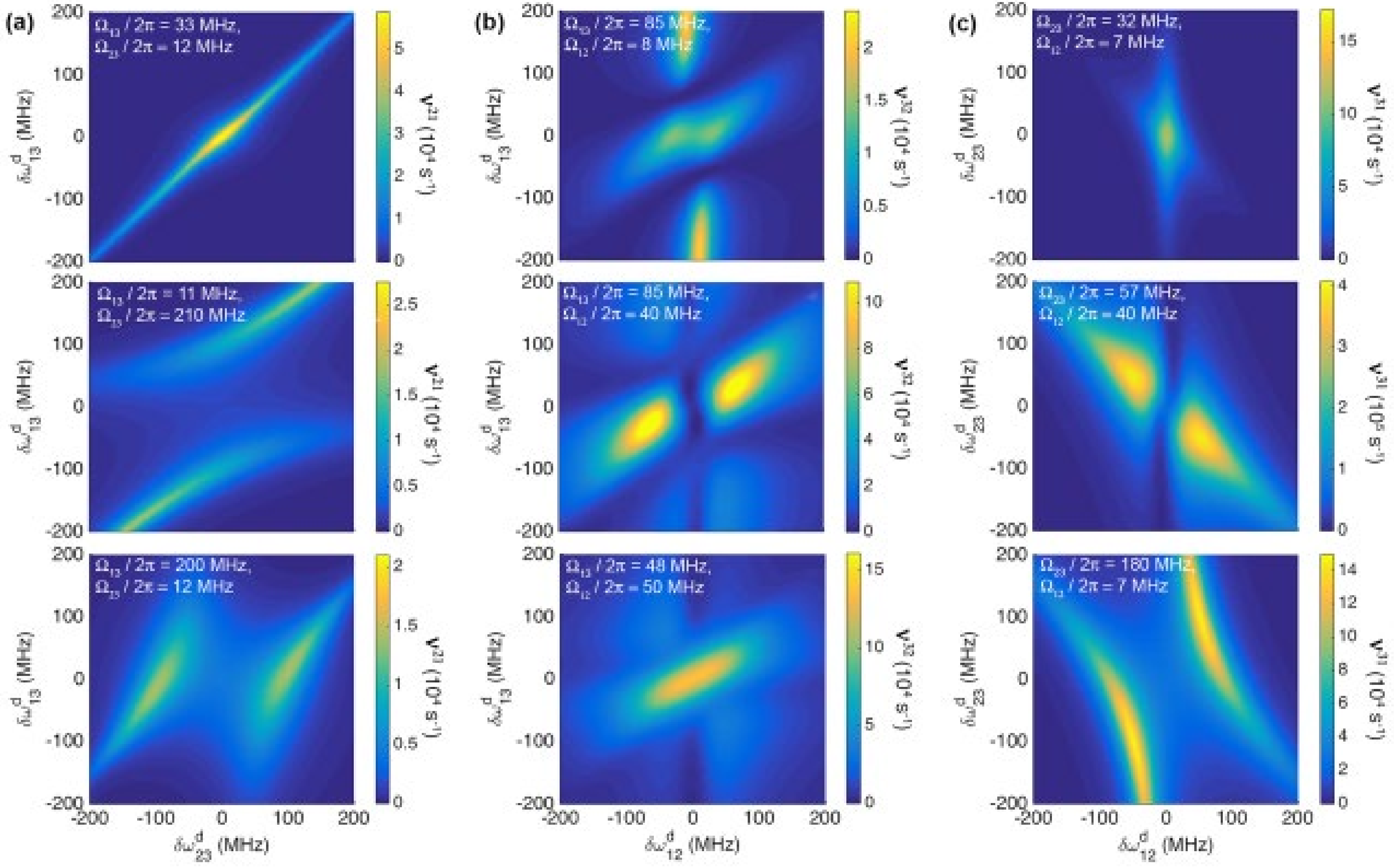




Hônigl-Decrinis et al., *Phys. Rev. A* (2018)



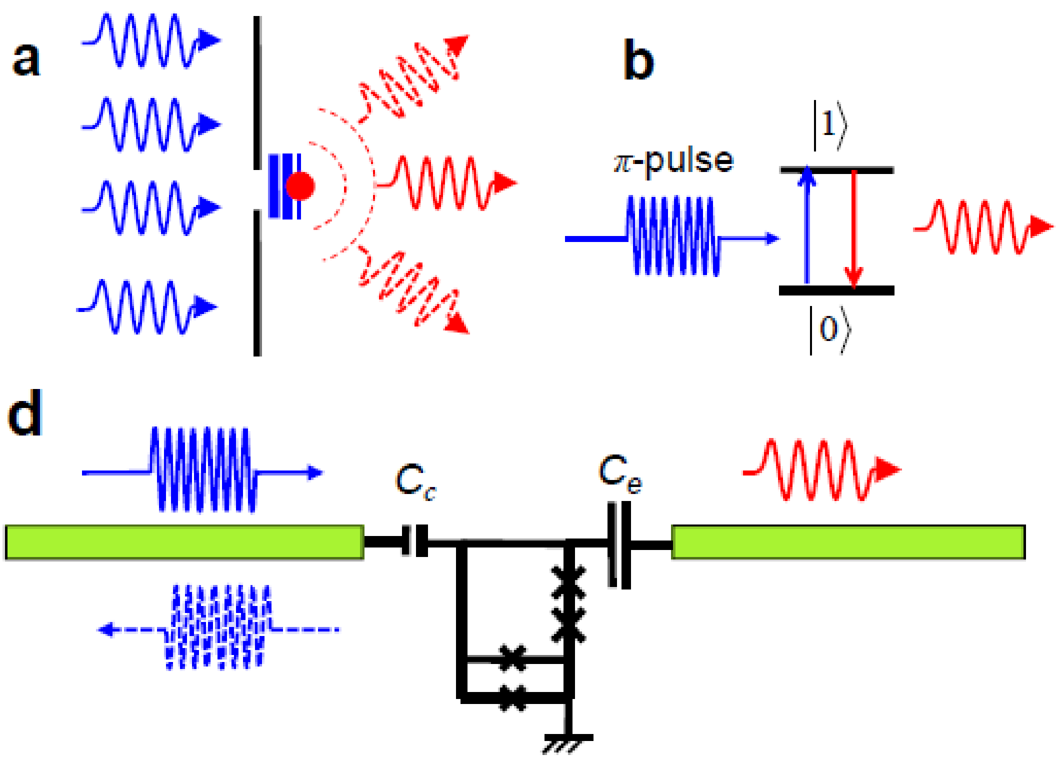
(a)
(b)
(c)
Ω_{13} / 2π = 33 MHz, Ω_{23} / 2π = 12 MHz
Ω_{13} / 2π = 11 MHz, Ω_{23} / 2π = 210 MHz
Ω_{13} / 2π = 200 MHz, Ω_{23} / 2π = 12 MHz
Ω_{13} / 2π = 85 MHz, Ω_{12} / 2π = 8 MHz
Ω_{13} / 2π = 85 MHz, Ω_{12} / 2π = 40 MHz
Ω_{13} / 2π = 48 MHz, Ω_{12} / 2π = 50 MHz
Ω_{23} / 2π = 32 MHz, Ω_{12} / 2π = 7 MHz
Ω_{23} / 2π = 57 MHz, Ω_{12} / 2π = 40 MHz
Ω_{23} / 2π = 180 MHz, Ω_{12} / 2π = 7 MHz
$\delta\omega^d_{13}$ (MHz)
$\delta\omega^d_{23}$ (MHz)
$\delta\omega^d_{12}$ (MHz)
$\mathbf{v}^{21}$ (10^9 arb. units)
$\mathbf{v}^{32}$ (10^{10} arb. units)
$\mathbf{v}^{32}$ (10^{11} arb. units)
$\mathbf{v}^{31}$ (10^9 arb. units)
$\mathbf{v}^{31}$ (10^{10} arb. units)

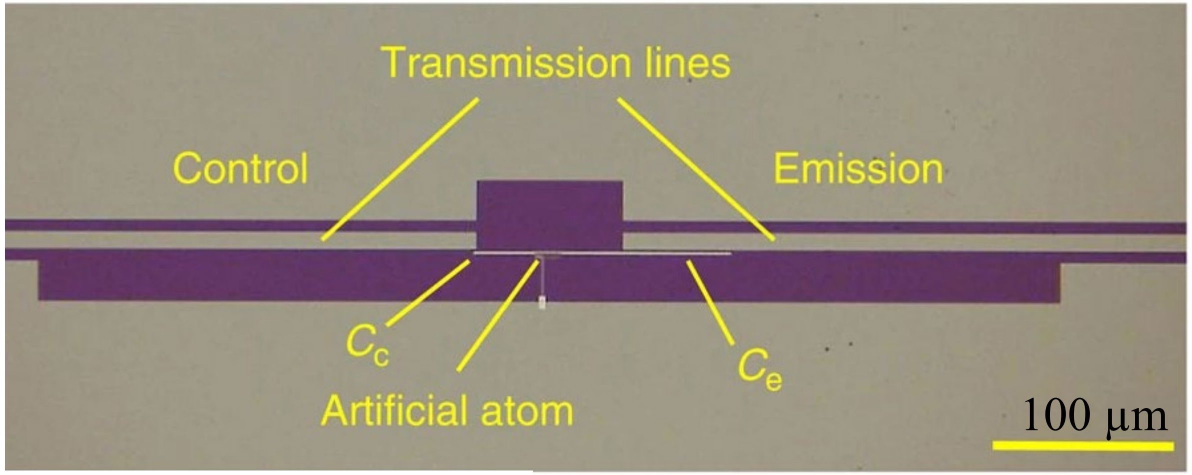


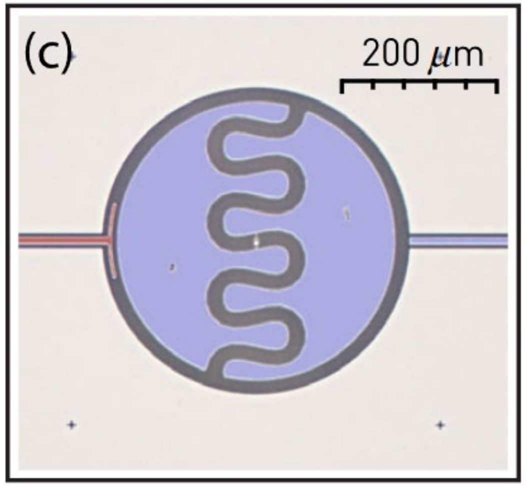
(a)
(b)
(c)
Ω_{13} / 2π = 33 MHz,
Ω_{23} / 2π = 12 MHz
Ω_{13} / 2π = 85 MHz,
Ω_{12} / 2π = 8 MHz
Ω_{23} / 2π = 32 MHz,
Ω_{12} / 2π = 7 MHz
Ω_{13} / 2π = 11 MHz,
Ω_{23} / 2π = 210 MHz
Ω_{13} / 2π = 85 MHz,
Ω_{12} / 2π = 40 MHz
Ω_{23} / 2π = 57 MHz,
Ω_{12} / 2π = 40 MHz
Ω_{13} / 2π = 200 MHz,
Ω_{23} / 2π = 12 MHz
Ω_{13} / 2π = 48 MHz,
Ω_{12} / 2π = 50 MHz
Ω_{23} / 2π = 180 MHz,
Ω_{12} / 2π = 7 MHz
$\delta\omega^d_{13}$ (MHz)
$\delta\omega^d_{23}$ (MHz)
$\delta\omega^d_{12}$ (MHz)
γ^{21} (10^4 s^{-1})
γ^{32} (10^4 s^{-1})
γ^{31} (10^4 s^{-1})
γ^{31} (10^5 s^{-1})

Photon source - asymmetric coupling

Z. Peng et al., *Nature Comm.*, 2016





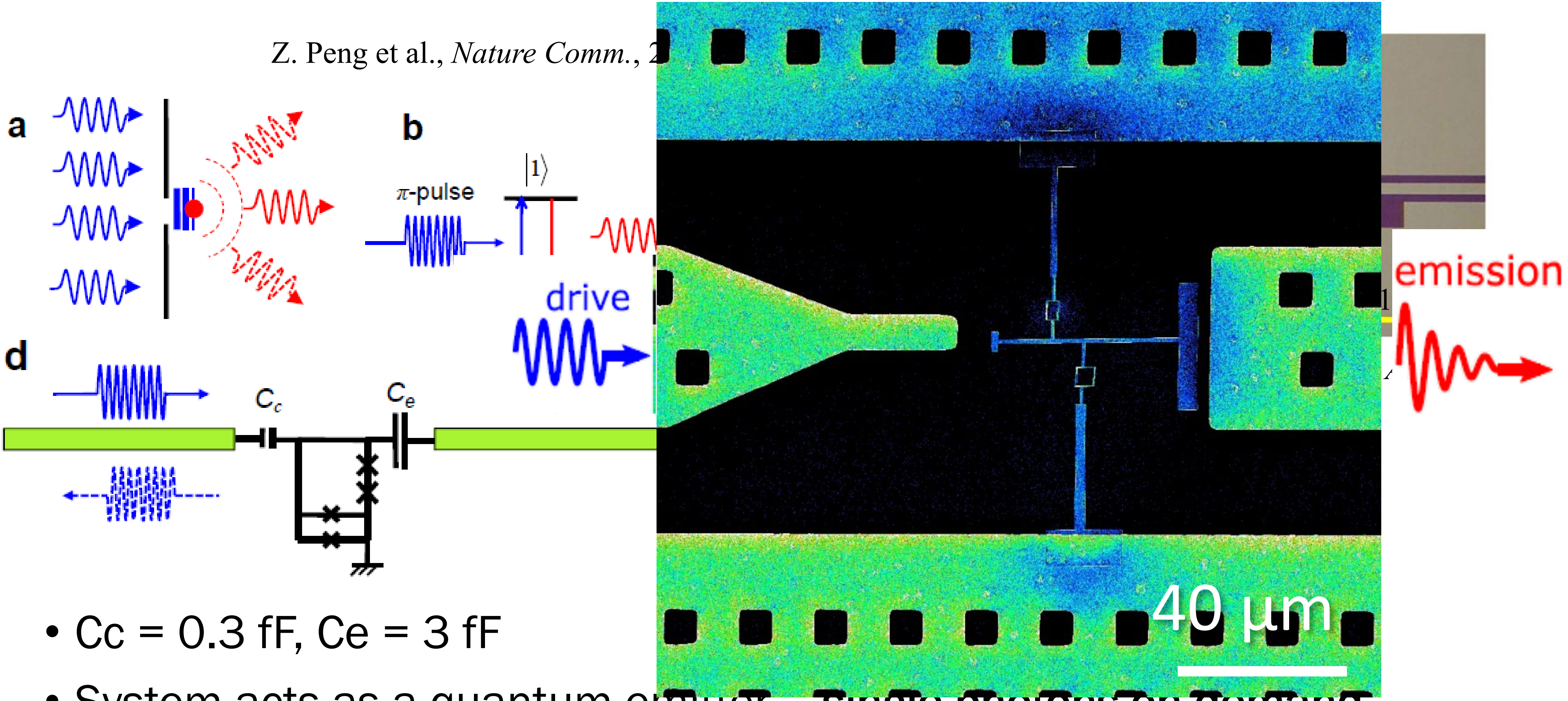


M. Pechal et al., *Phys. Rev. Applied* (2016)

- Cc = 0.3 fF, Ce = 3 fF
- System acts as a quantum emitter – **single photons on demand**

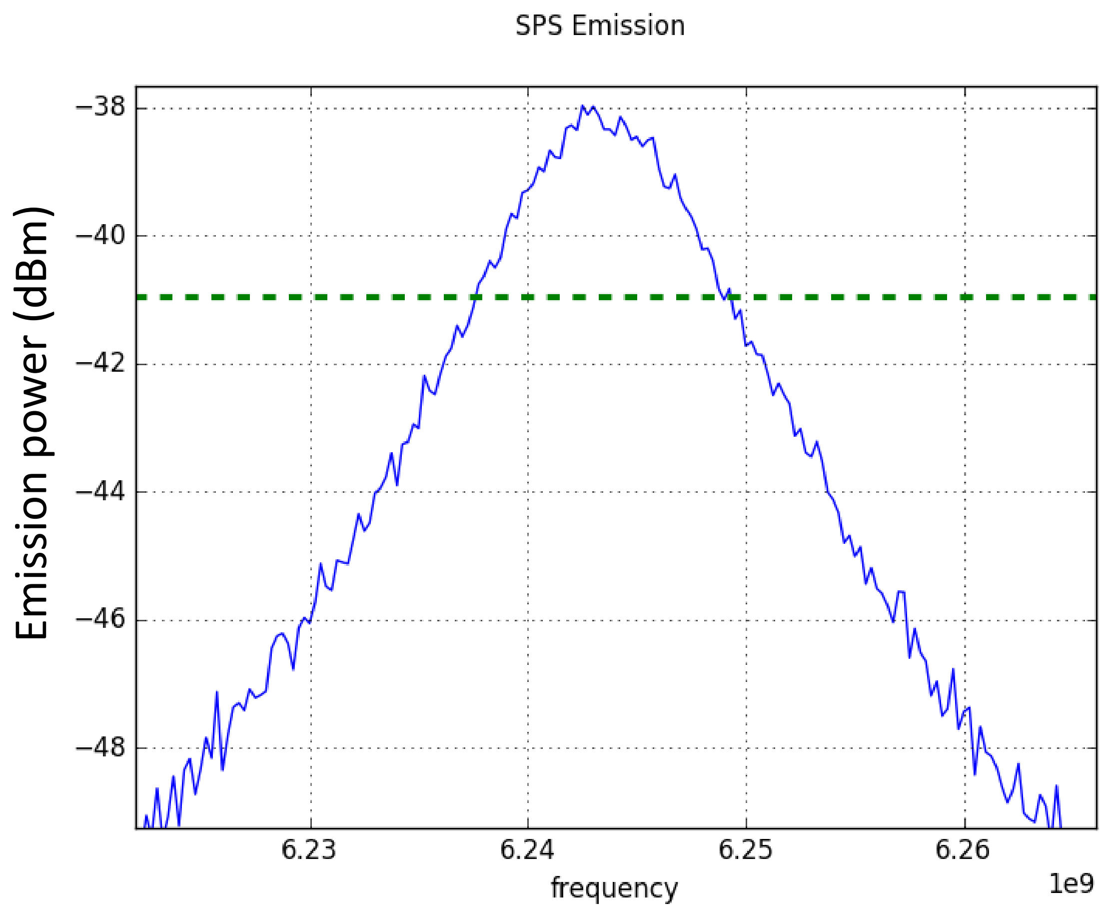
Photon source - asymmetric coupling

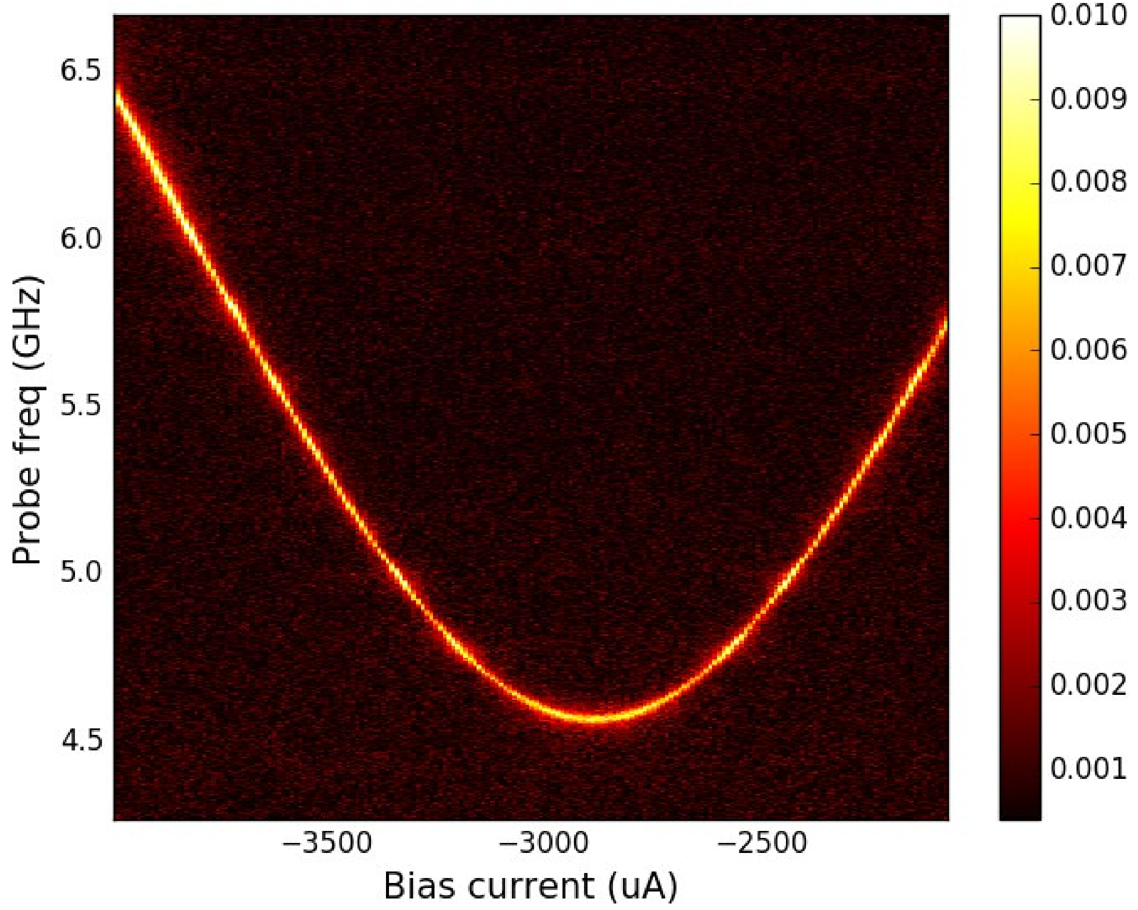
Z. Peng et al., *Nature Comm.*, 2



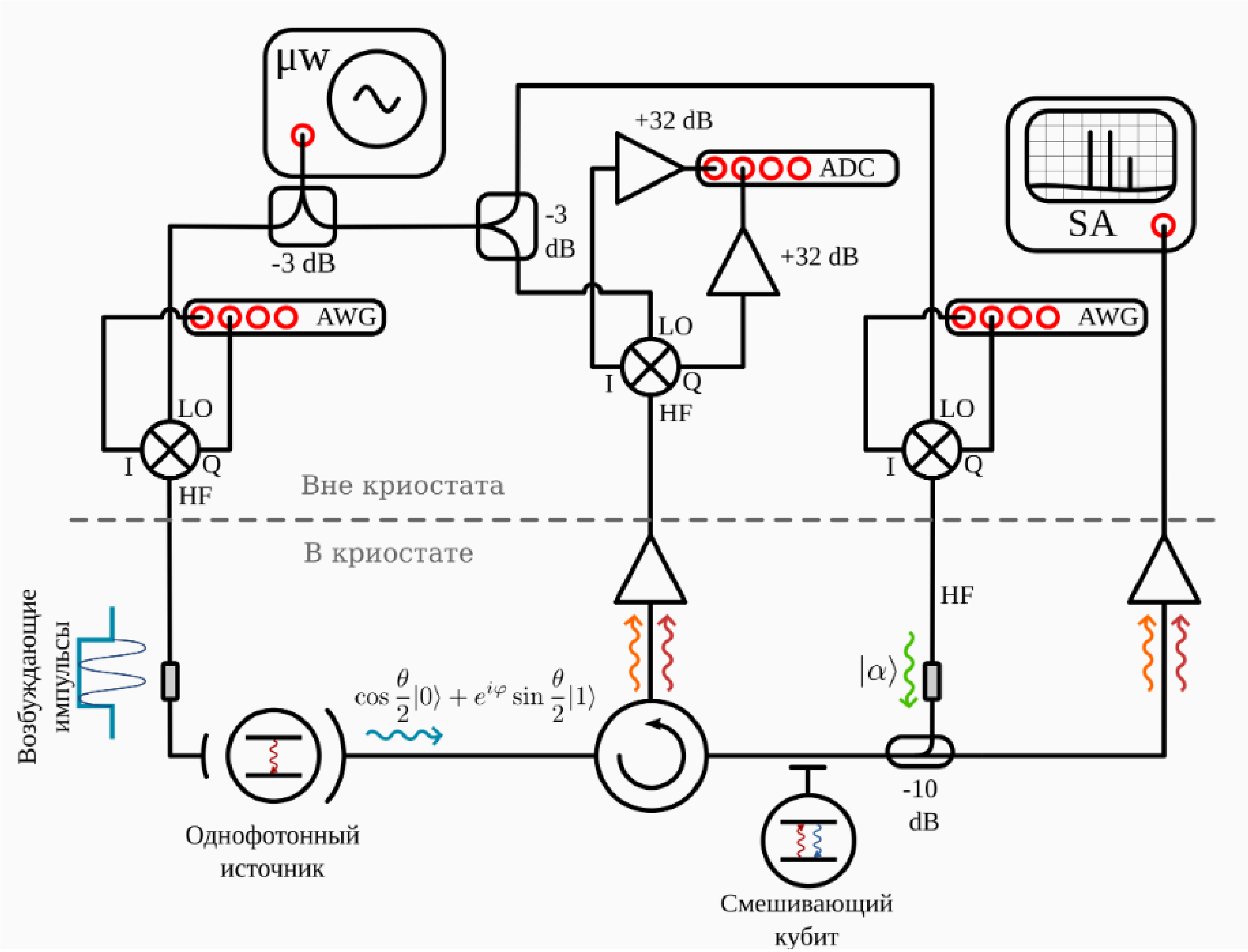
- Cc = 0.3 fF, Ce = 3 fF
- System acts as a quantum emitter – single photons on demand

Measuring the emission

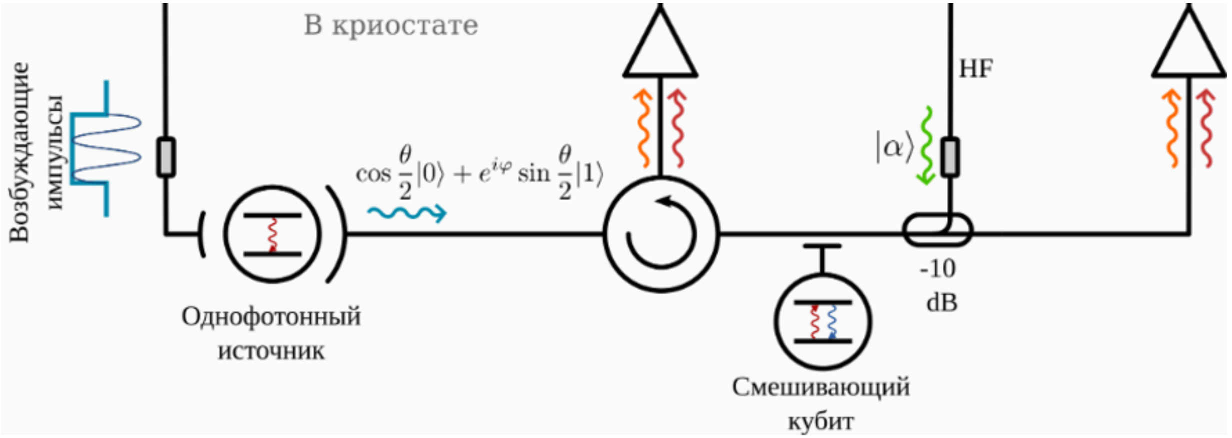


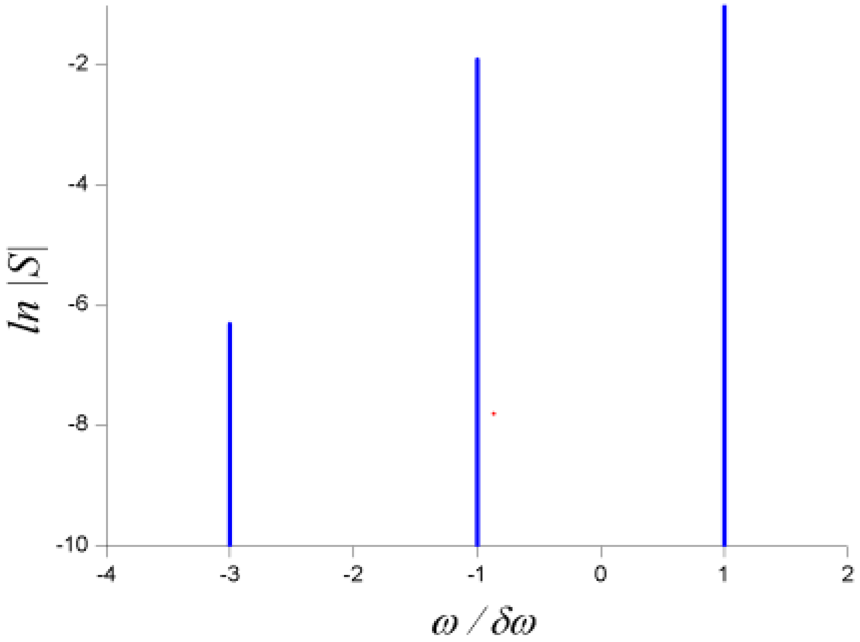


Кубит как сенсор фотонной статистики



Аналитический расчет спектра





В.В.Погосов (ВНИИА им. Духова)

$$\frac{d\langle\sigma_-\rangle}{dt} = \langle\sigma_-\rangle\left(-i\Delta\omega - \gamma\right) - \frac{i\Omega_1}{2}e^{-i\delta\omega t}\langle\sigma_z\rangle - i\sqrt{\gamma\gamma_e}|\langle\sigma_z\sigma_-^e(Tn)\rangle|e^{i\delta\omega t}e^{-(\Gamma+\gamma_e)[t/T]T}, \tag{30}$$

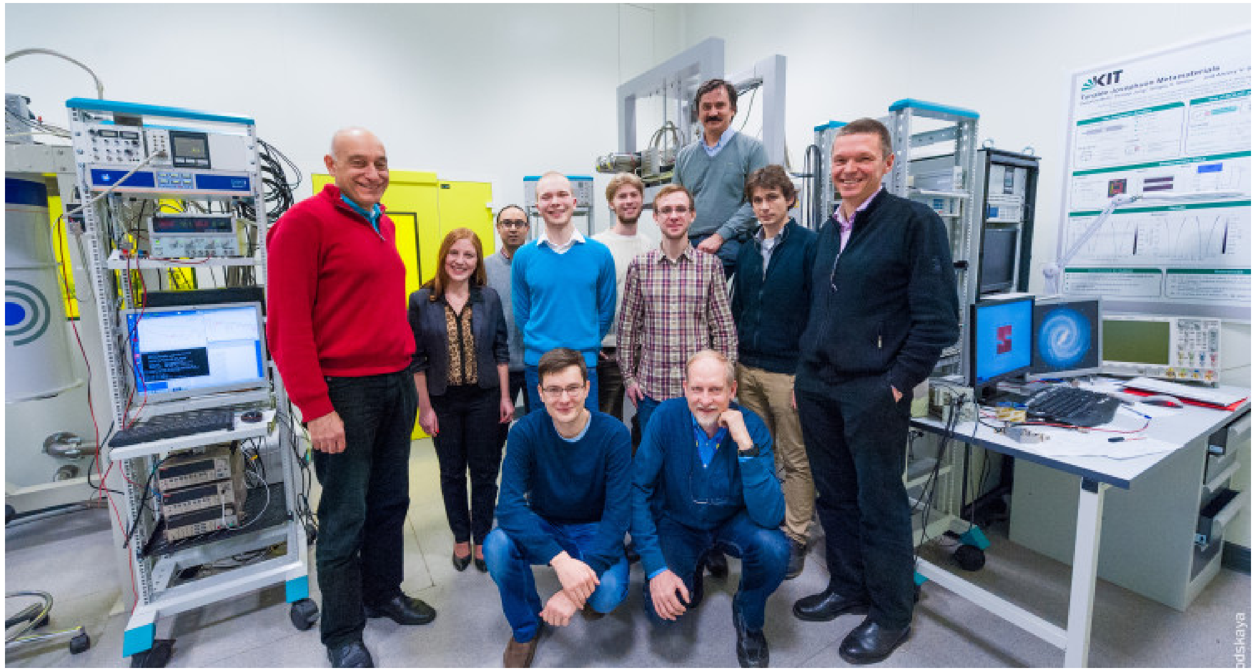
$$\frac{d\langle\sigma_z\rangle}{dt} = -\Gamma(\langle\sigma_z\rangle+1)+i\Omega_1\left(\langle\sigma_+\rangle e^{-i\delta\omega t} - \langle\sigma_-\rangle e^{i\delta\omega t}\right)+2i\sqrt{\gamma\gamma_e}|\langle\sigma_-\sigma_+^e(Tn)\rangle|\left(e^{-2i\delta\omega t}e^{i(\delta\omega-\Delta\omega)[t/T]T} - c.c.\right)e^{-(\gamma+\gamma_e)[t/T]T}. \tag{31}$$

$$c_{-3} \simeq \frac{i\Omega_1^2}{2\gamma^2}\frac{\sqrt{\gamma\gamma_e}}{\Gamma}\sqrt{\nu(1-\nu)}\left(e^{-(\gamma+\gamma_e)[t/T]T}e^{i\delta\omega[t/T]T} + e^{-(\Gamma+\gamma_e)[t/T]T}\right)$$

MIPT
MOSCOW INSTITUTE
OF PHYSICS AND TECHNOLOGY

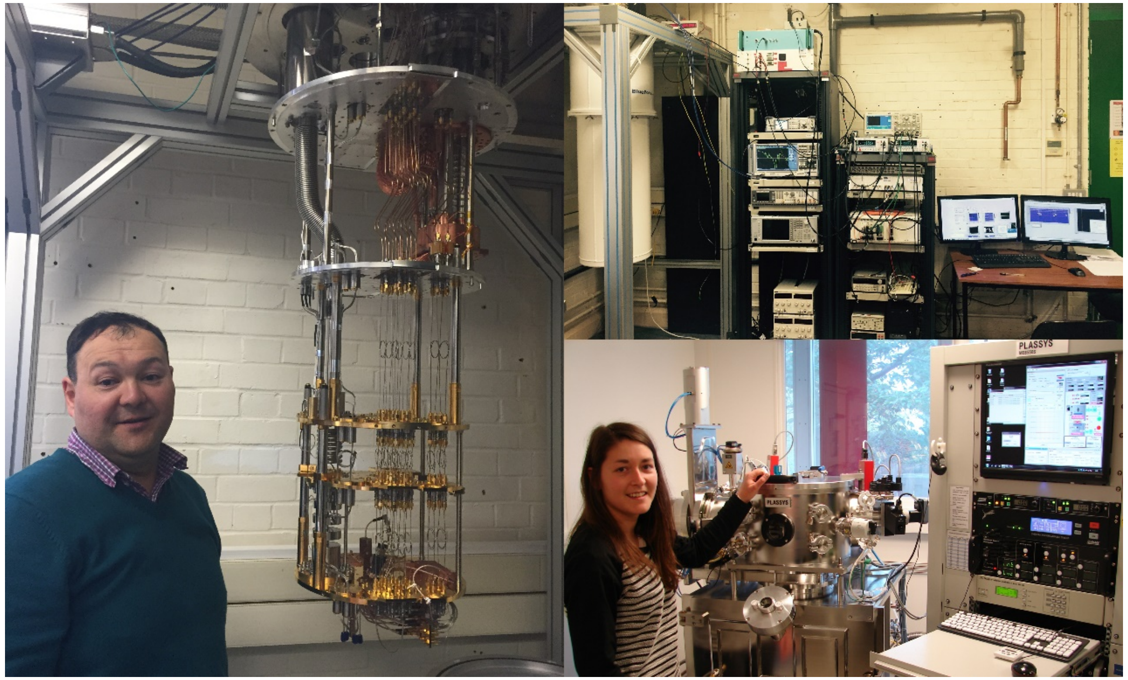
MIS&S

ИФТТ РАН
ISSP RAS



ROYAL HOLLOWAY UNIVERSITY OF LONDON

NPL National Physical Laboratory



Спасибо за внимание!

1 year 3 months ago:

today:

- Strong and ultra-strong coupling

- Strong and ultra-strong coupling
- Arbitrary quantum states in the resonator

- Strong and ultra-strong coupling
- Arbitrary quantum states in the resonator
- Resonance fluorescence

- Strong and ultra-strong coupling
- Arbitrary quantum states in the resonator
- Resonance fluorescence
- Electromagnetically induced transparency

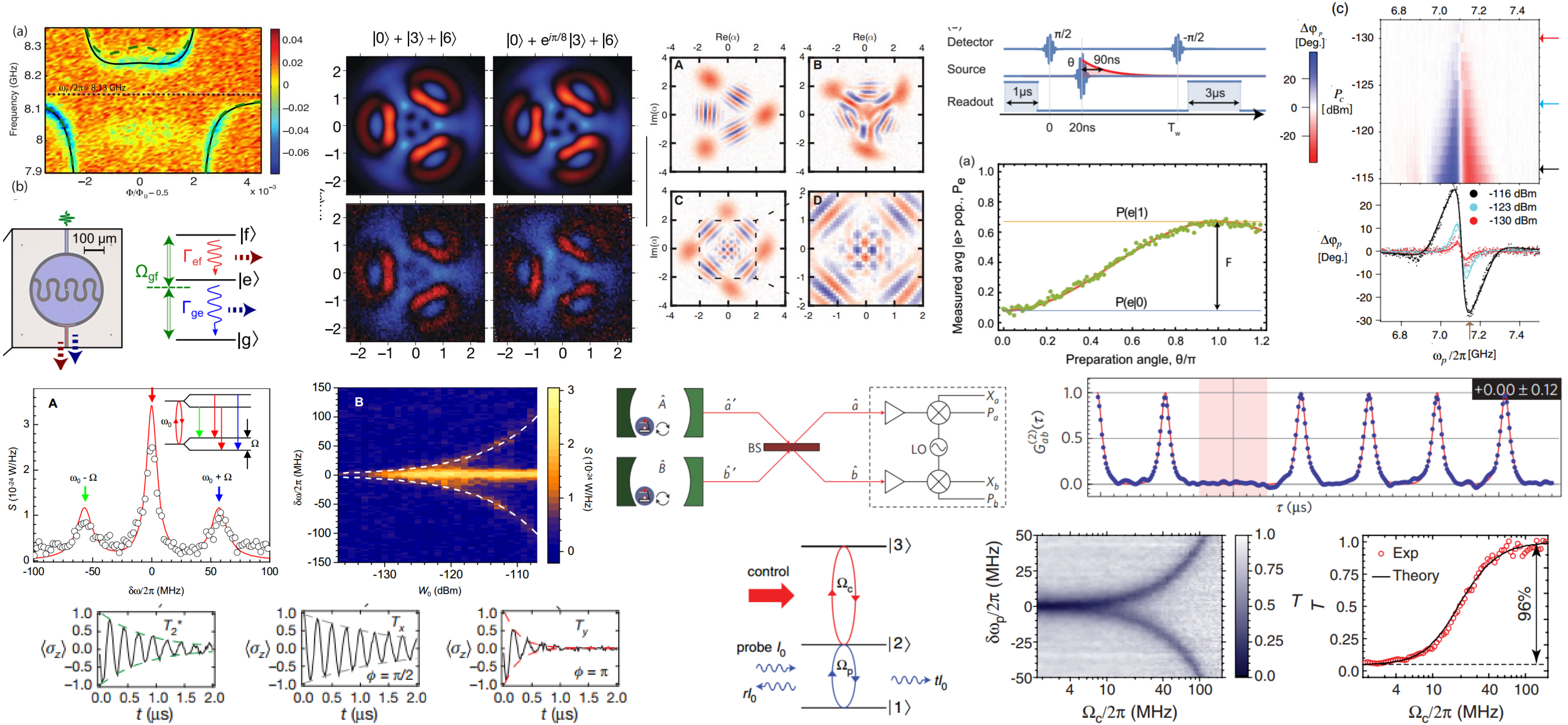
- Strong and ultra-strong coupling
- Arbitrary quantum states in the resonator
- Resonance fluorescence
- Electromagnetically induced transparency
- Single photons on demand, entangled photons on-demand, Hong-Ou-Mandel effect

- Strong and ultra-strong coupling
- Arbitrary quantum states in the resonator
- Resonance fluorescence
- Electromagnetically induced transparency
- Single photons on demand, entangled photons on-demand, Hong-Ou-Mandel effect
- Tomography of propagating light with linear detectors

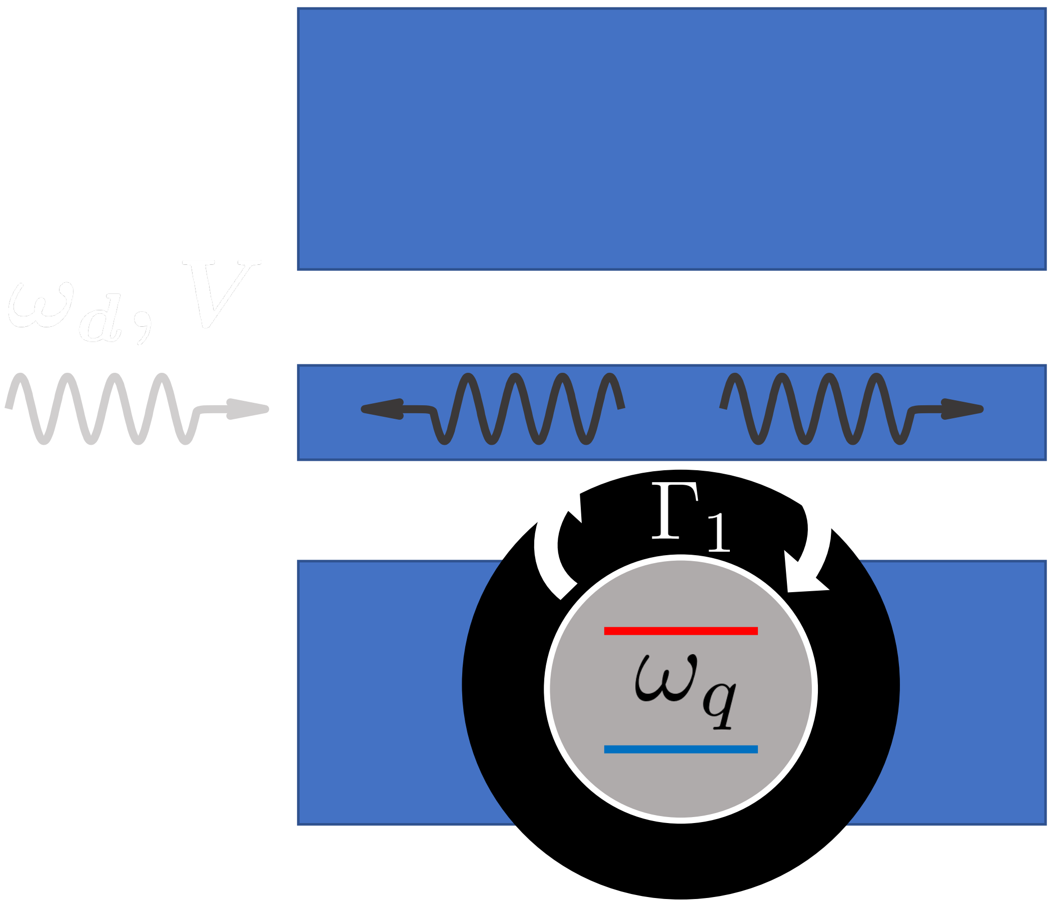
- Strong and ultra-strong coupling
- Arbitrary quantum states in the resonator
- Resonance fluorescence
- Electromagnetically induced transparency
- Single photons on demand, entangled photons on-demand, Hong-Ou-Mandel effect
- Tomography of propagating light with linear detectors
- Squeezed states of light

- Strong and ultra-strong coupling
- Arbitrary quantum states in the resonator
- Resonance fluorescence
- Electromagnetically induced transparency
- Single photons on demand, entangled photons on-demand, Hong-Ou-Mandel effect
- Tomography of propagating light with linear detectors
- Squeezed states of light
- Kerr effect on a single photon

- Strong and ultra-strong coupling
- Arbitrary quantum states in the resonator
- Resonance fluorescence
- Electromagnetically induced transparency
- Single photons on demand, entangled photons on-demand, Hong-Ou-Mandel effect
- Tomography of propagating light with linear detectors
- Squeezed states of light
- Kerr effect on a single photon
- QND detection of a single photon

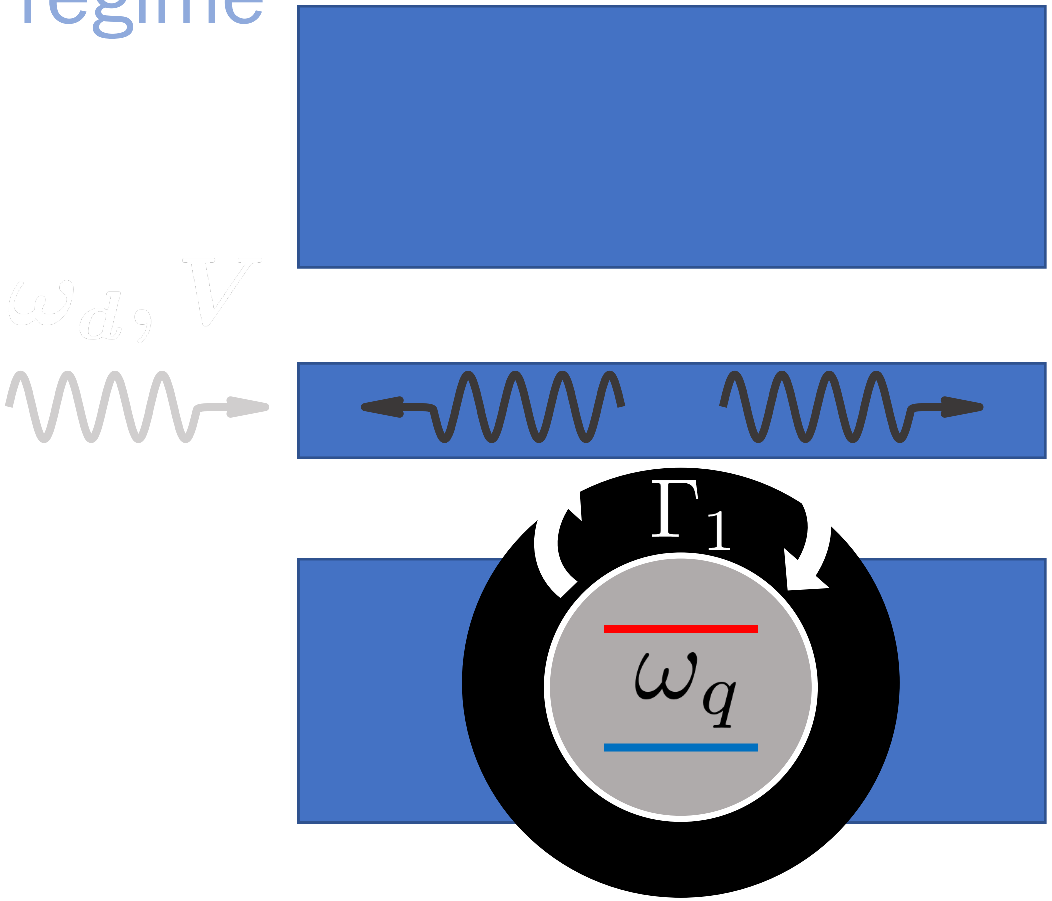


(a)
Frequency (GHz)
ωr/2π= 8.13 GHz
Φ/Φ0 − 0.5
x 10^-3
(b)
100 μm
|f⟩
|e⟩
|g⟩
Ωgf
Γef
Γge
|0⟩ + |3⟩ + |6⟩
|0⟩ + e^{iπ/8}|3⟩ + |6⟩
Re(α)
Im(α)
A
B
C
D
Detector
Source
Readout
π/2
-π/2
θ
90ns
1μs
3μs
0
20ns
Tw
(a)
Measured avg |e> pop., Pe
P(e|1)
P(e|0)
F
Preparation angle, θ/π
(c)
Δφp [Deg.]
Pc [dBm]
-116 dBm
-123 dBm
-130 dBm
ωp/2π [GHz]
A
S (10^-24 W/Hz)
ω0 - Ω
ω0 + Ω
ω0
Ω
δω/2π (MHz)
B
δω/2π (MHz)
W0 (dBm)
S (10^-24 W/Hz)
BS
LO
Xa
Pa
Xb
Pb
+0.00 ± 0.12
τ (μs)
T2*
Tx
Ty
φ = π/2
φ = π
⟨σz⟩
t (μs)
|3⟩
|2⟩
|1⟩
control
probe I0
rI0
tI0
Ωc
Ωp
δωp/2π (MHz)
Ωc/2π (MHz)
T
Exp
Theory
96%



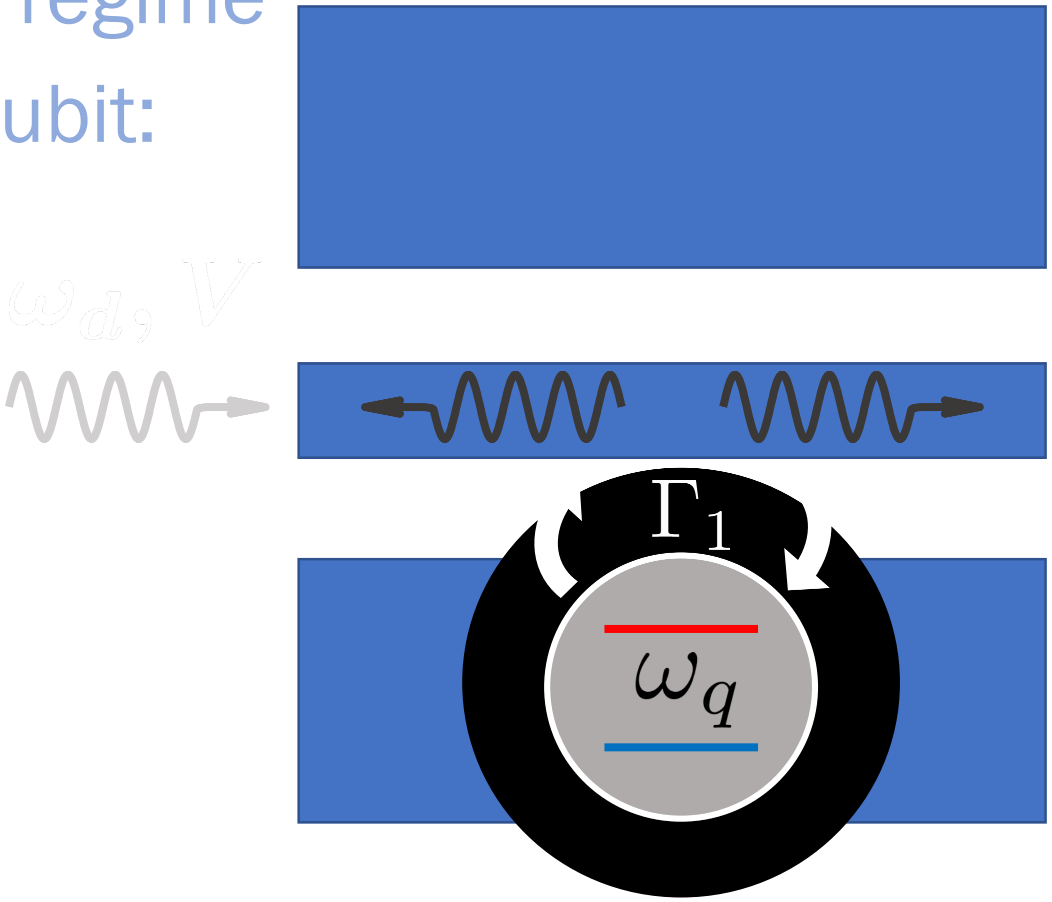
ω_d, V
Γ_1
ω_q

- $\Gamma_1 \ll \Gamma_1^{nr}, \gamma$ - strong coupling regime
-



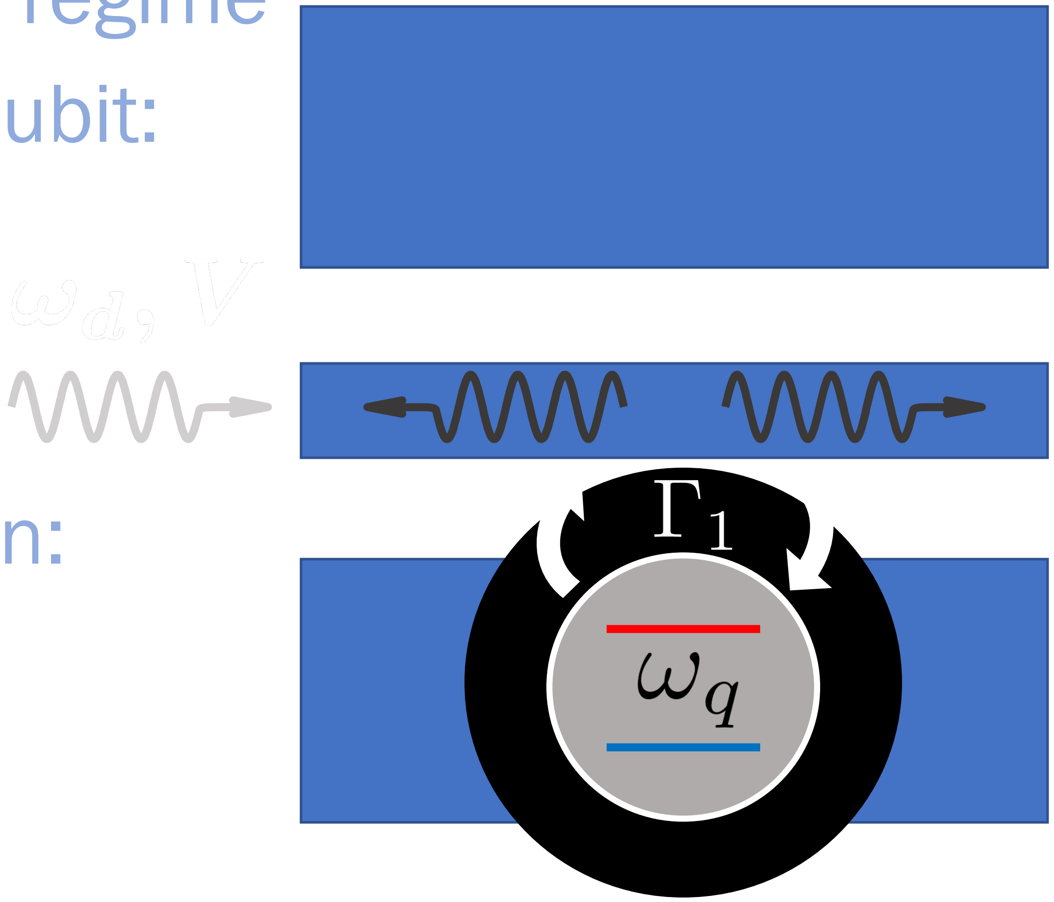
- $\Gamma_1 \ll \Gamma_1^{nr}, \gamma$ - strong coupling regime
- The operator of field scattered by a qubit:

$$\hat{V}_{sc}(t) = i\frac{\Gamma_1}{d_{eg}}\hat{\sigma}_-(t)$$



- $\Gamma_1 \ll \Gamma_1^{nr}, \gamma$ - strong coupling regime
- The operator of field scattered by a qubit:

$$\hat{V}_{sc}(t) = i\frac{\Gamma_1}{d_{eg}}\hat{\sigma}_-(t)$$



- The dynamics – from master equation:

- $\Gamma_1 \ll \Gamma_1^{nr}, \gamma$ - strong coupling regime
- The operator of field scattered by a qubit:

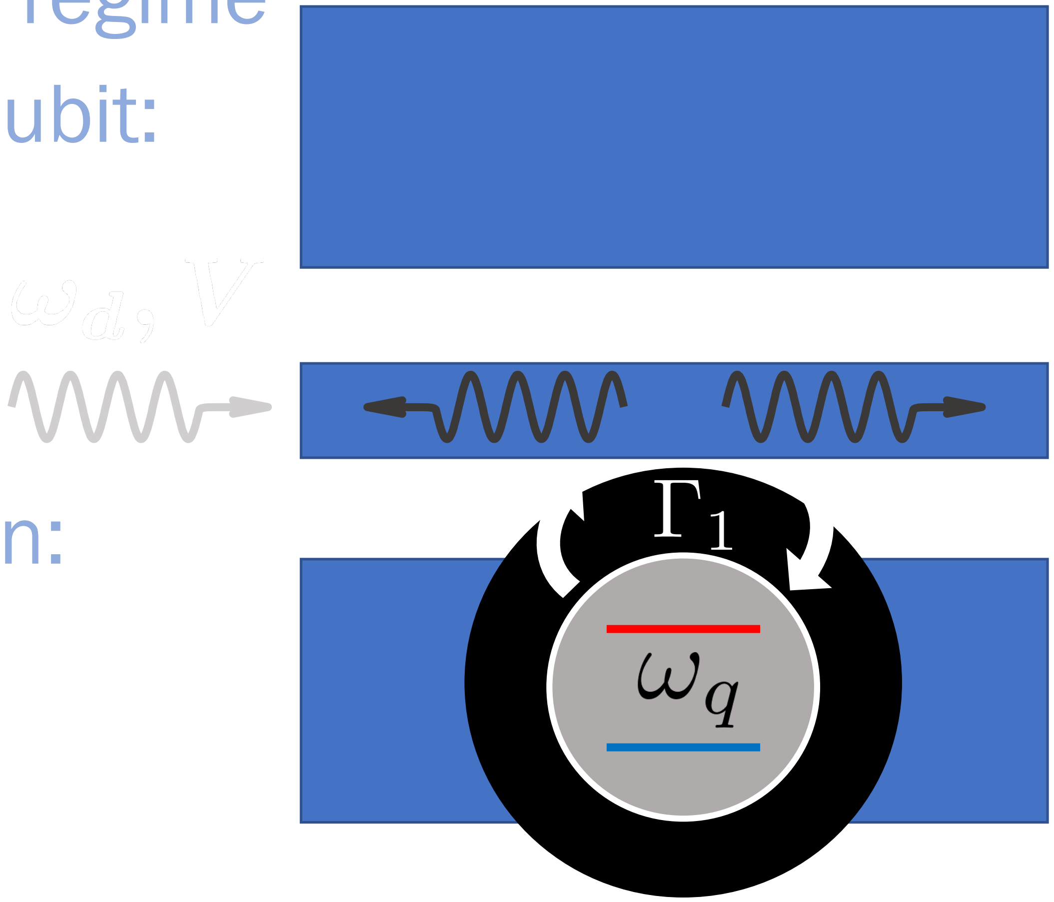
$$\hat{V}_{sc}(t) = i\frac{\Gamma_1}{d_{eg}}\hat{\sigma}_-(t)$$

- The dynamics – from master equation:

$$\dot{\rho} = -i/\hbar[H,\rho] + \hat{\mathcal{L}}\rho$$

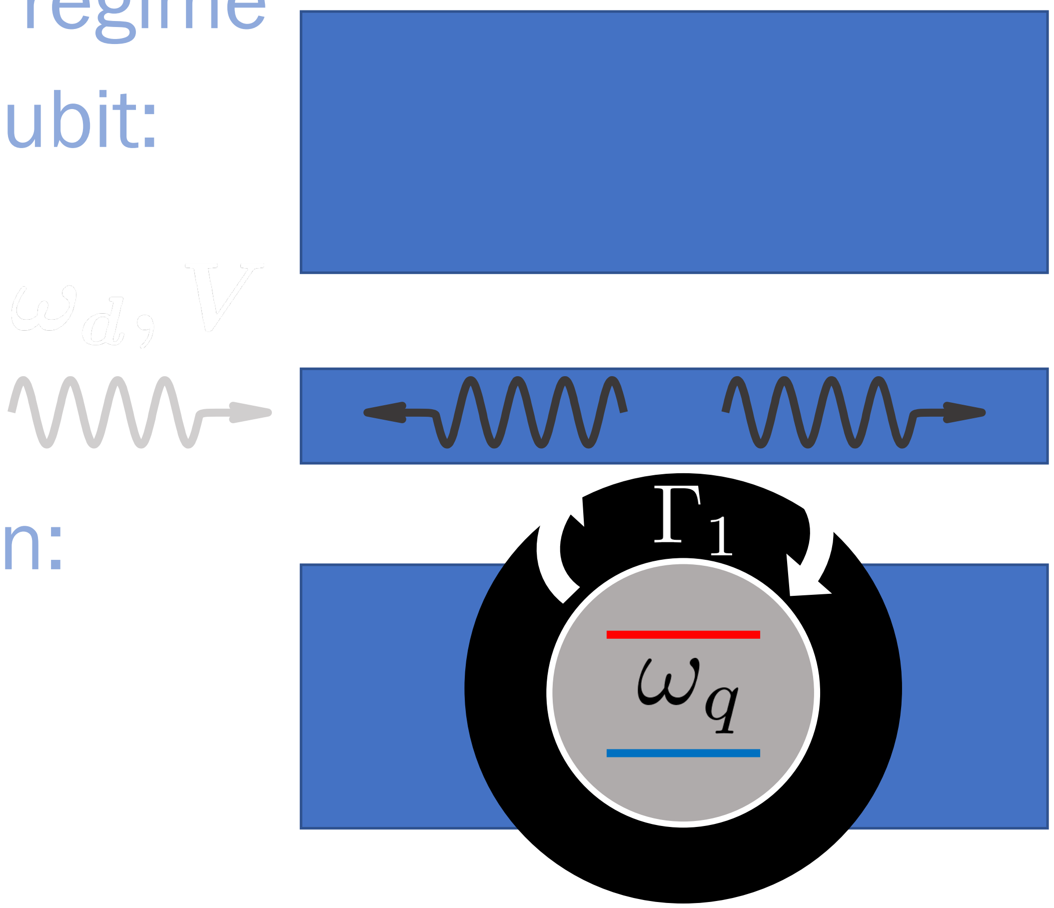
- Elastic part of scattered light

$$V_{sc}(t) = i\frac{\Gamma_1}{d_{eg}}\langle\hat{\sigma}_-\rangle e^{i(k|x|-\omega_d t)}$$



- $\Gamma_1 \ll \Gamma_1^{nr}, \gamma$ - strong coupling regime
- The operator of field scattered by a qubit:

$$\hat{V}_{sc}(t) = i\frac{\Gamma_1}{d_{eg}}\hat{\sigma}_-(t)$$



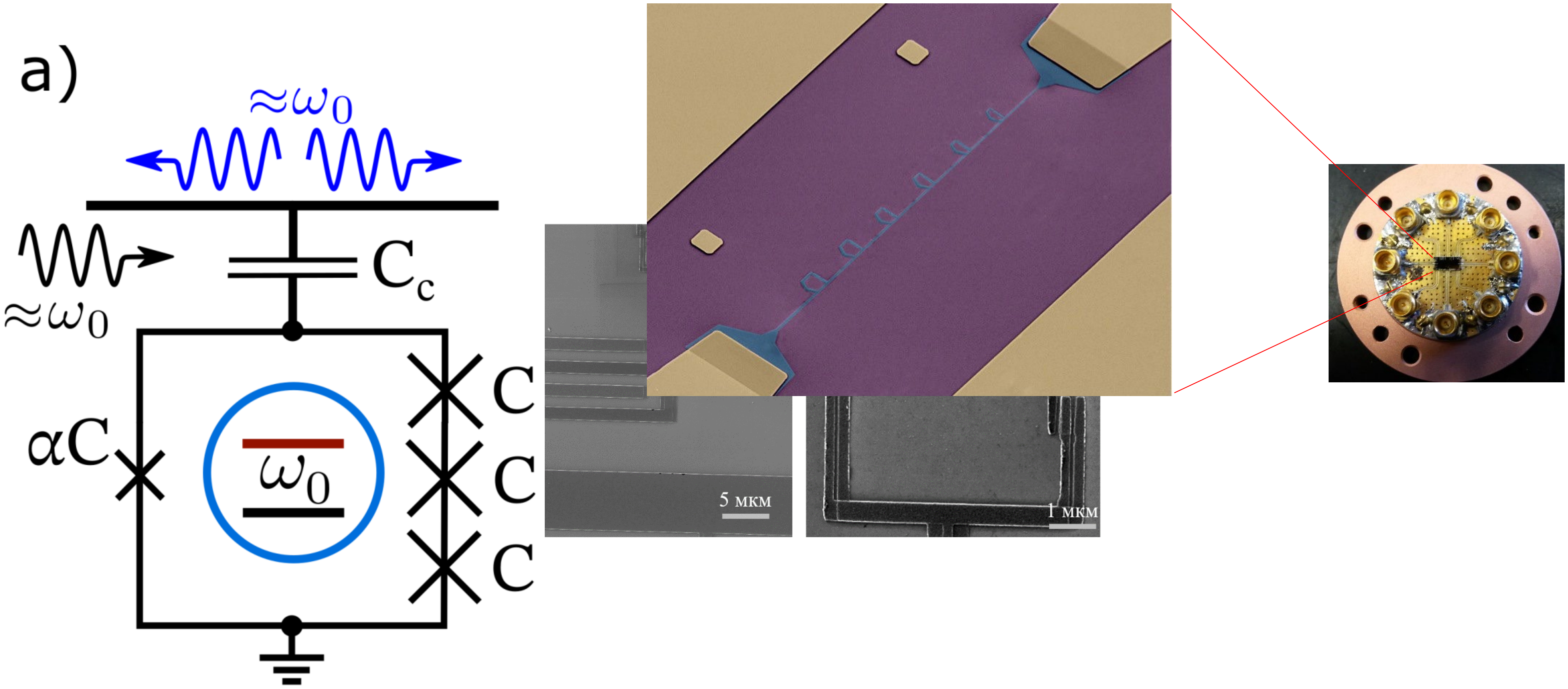
- The dynamics – from master equation:

$$\dot{\rho} = -i/\hbar[H, \rho] + \hat{\mathcal{L}}\rho$$

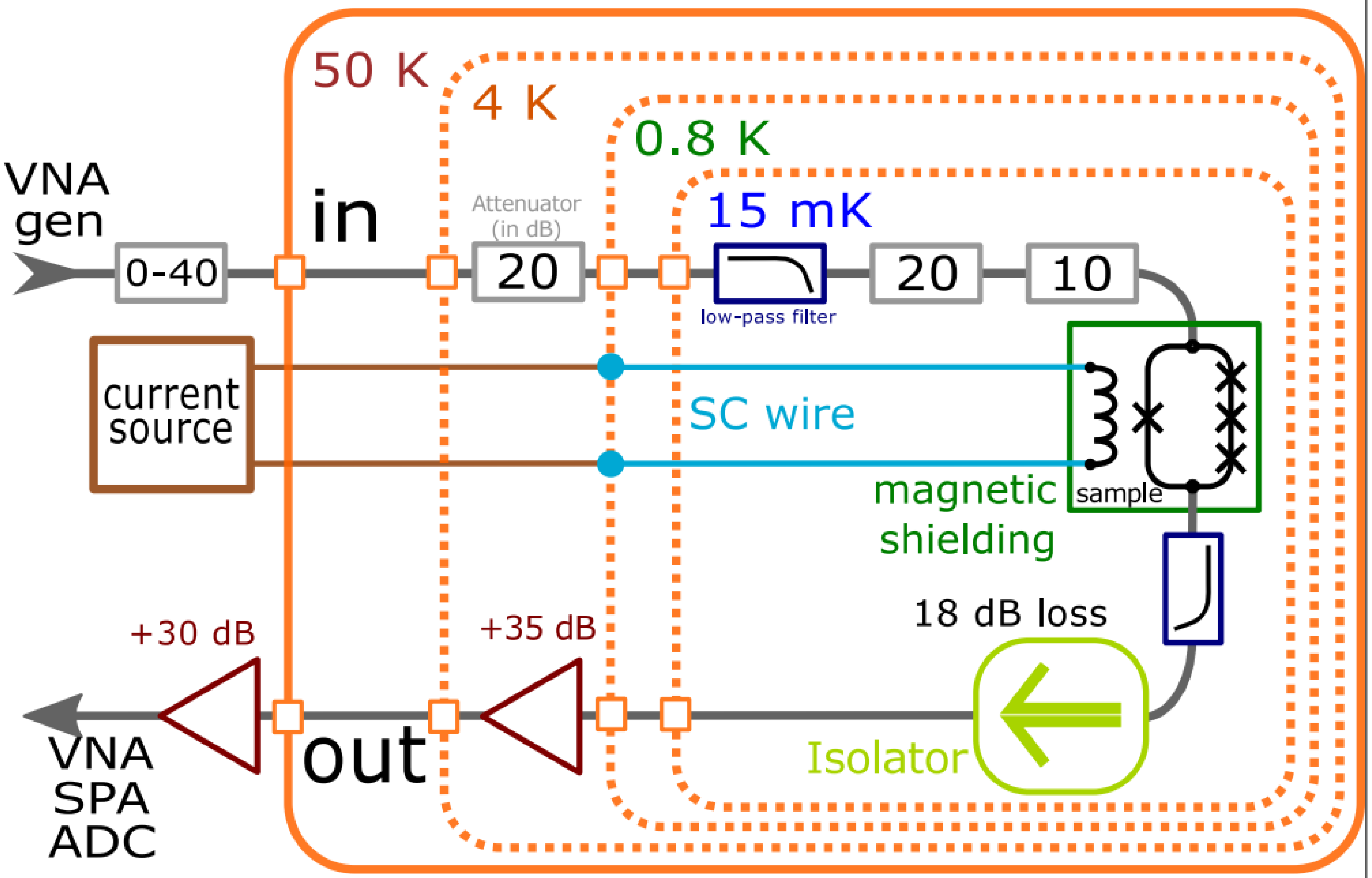
- Elastic part of scattered light

$$V_{sc}(t) = i\frac{\Gamma_1}{d_{eg}}\langle\hat{\sigma}_-\rangle e^{i(k|x|-\omega_d t)}$$

- The whole spectrum includes inelastic part



a)
≈ω0
≈ω0
Cc
C
C
C
αC
ω0
5 мкм
1 мкм



50 K
4 K
0.8 K
15 mK
VNA
gen
in
Attenuator
(in dB)
0-40
20
low-pass filter
20
10
current
source
SC wire
magnetic
shielding
sample
18 dB loss
+30 dB
+35 dB
Isolator
out
VNA
SPA
ADC

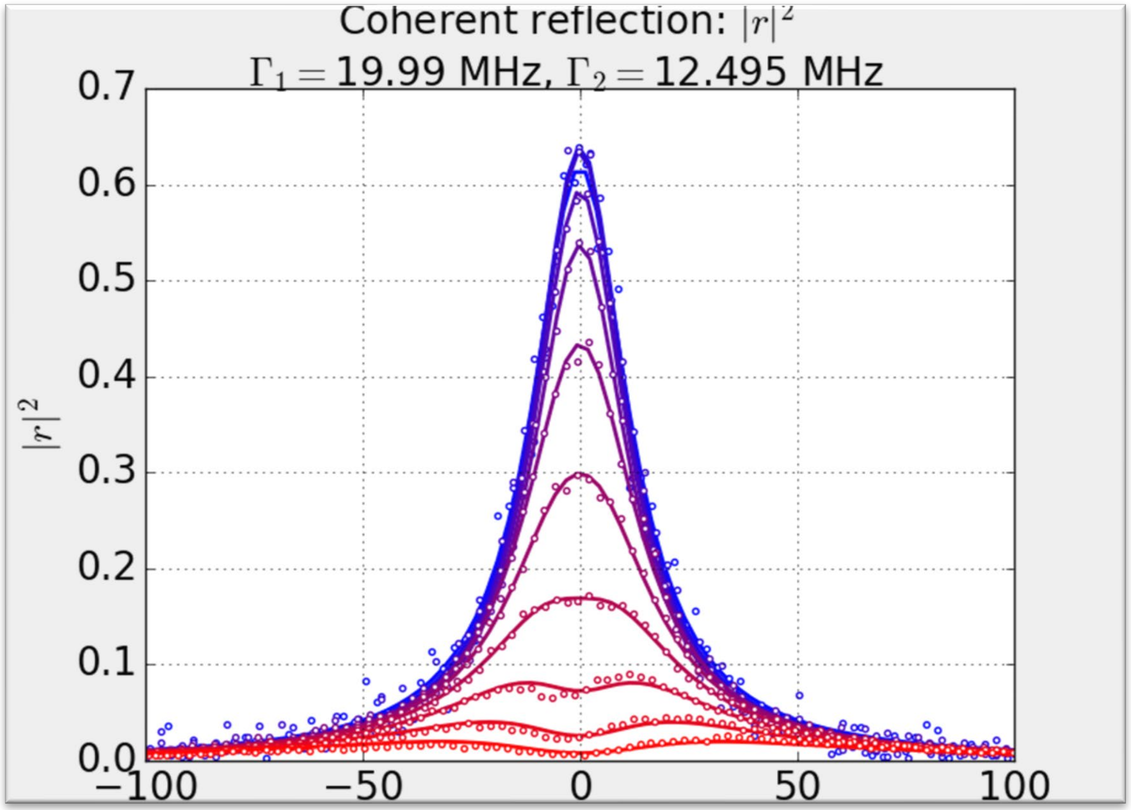
- Stationary solution: $\dot{\rho} = 0 \rightarrow r = \frac{V_{sc}}{V} = \frac{1 + i\lambda}{1 + \lambda^2 + \Omega^2/\Gamma_1\Gamma_2}, \lambda = \delta\omega/\Gamma_2$

- Stationary solution: $\dot{\rho} = 0 \rightarrow r = \frac{V_{sc}}{V} = \frac{1 + i\lambda}{1 + \lambda^2 + \Omega^2/\Gamma_1\Gamma_2}, \lambda = \delta\omega/\Gamma_2$

- If $\Omega \ll \Gamma_1$, then $r \approx 1$ - weak signal is totally reflected (99.9% reached)

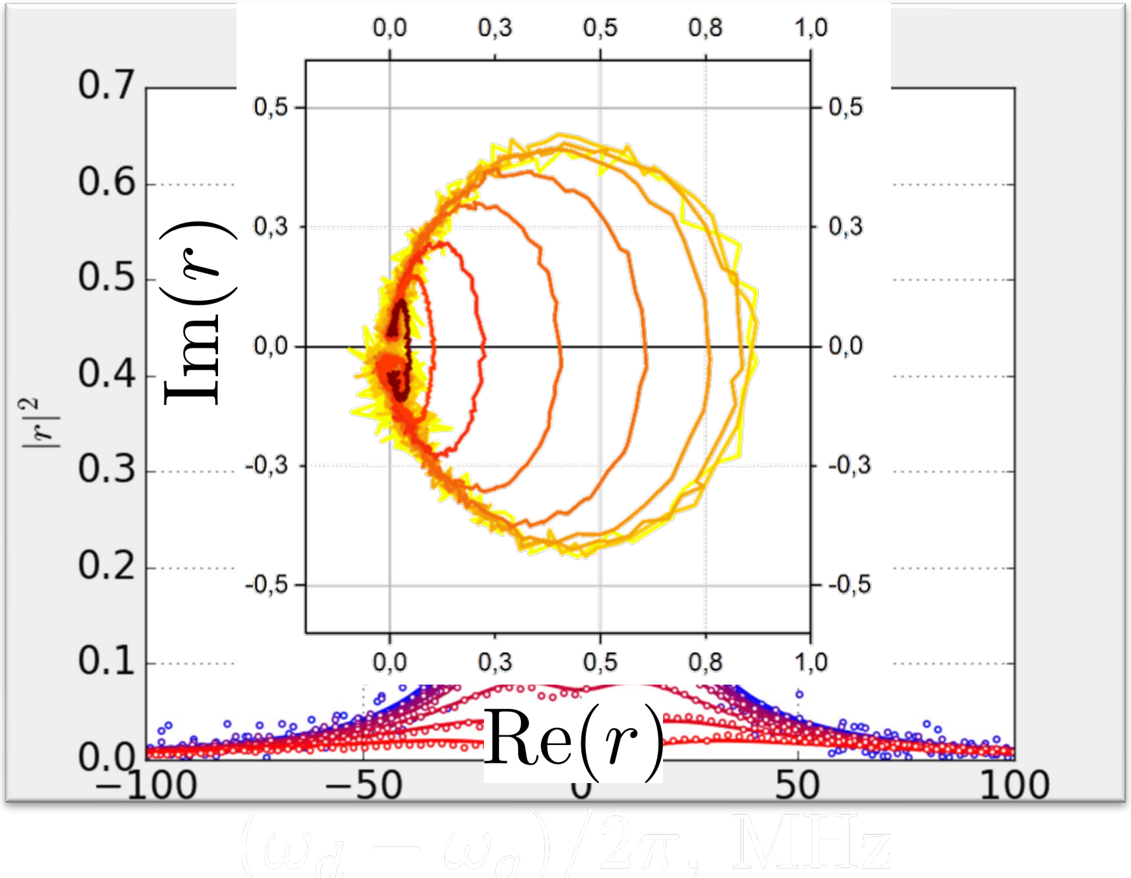
- Stationary solution: $\dot{\rho} = 0 \rightarrow r = \frac{V_{sc}}{V} = \frac{1 + i\lambda}{1 + \lambda^2 + \Omega^2/\Gamma_1\Gamma_2}, \lambda = \delta\omega/\Gamma_2$

- If $\Omega \ll \Gamma_1$, then $r \approx 1$ - weak signal is totally reflected (99.9% reached)



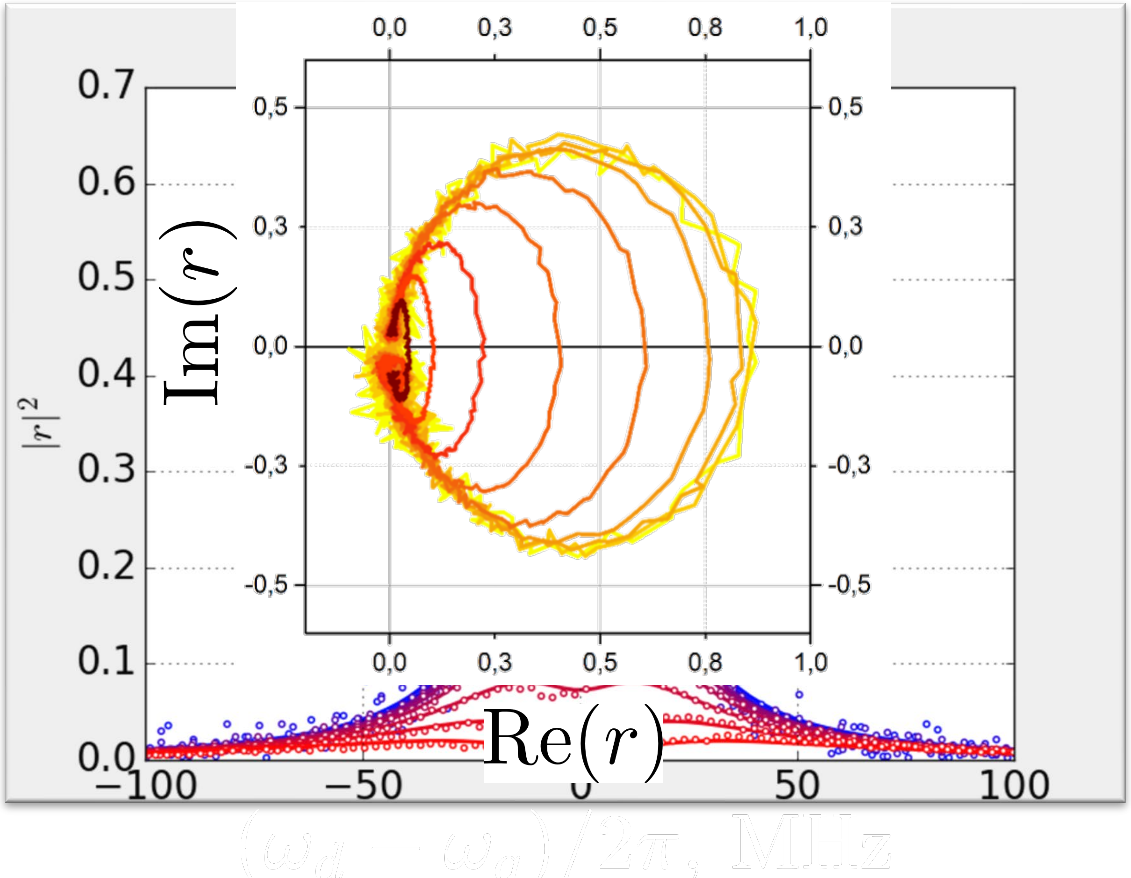
- Stationary solution: $\dot{\rho} = 0 \rightarrow r = \frac{V_{sc}}{V} = \frac{1 + i\lambda}{1 + \lambda^2 + \Omega^2/\Gamma_1\Gamma_2}, \lambda = \delta\omega/\Gamma_2$

- If $\Omega \ll \Gamma_1$, then $r \approx 1$ - weak signal is totally reflected (99.9% reached)



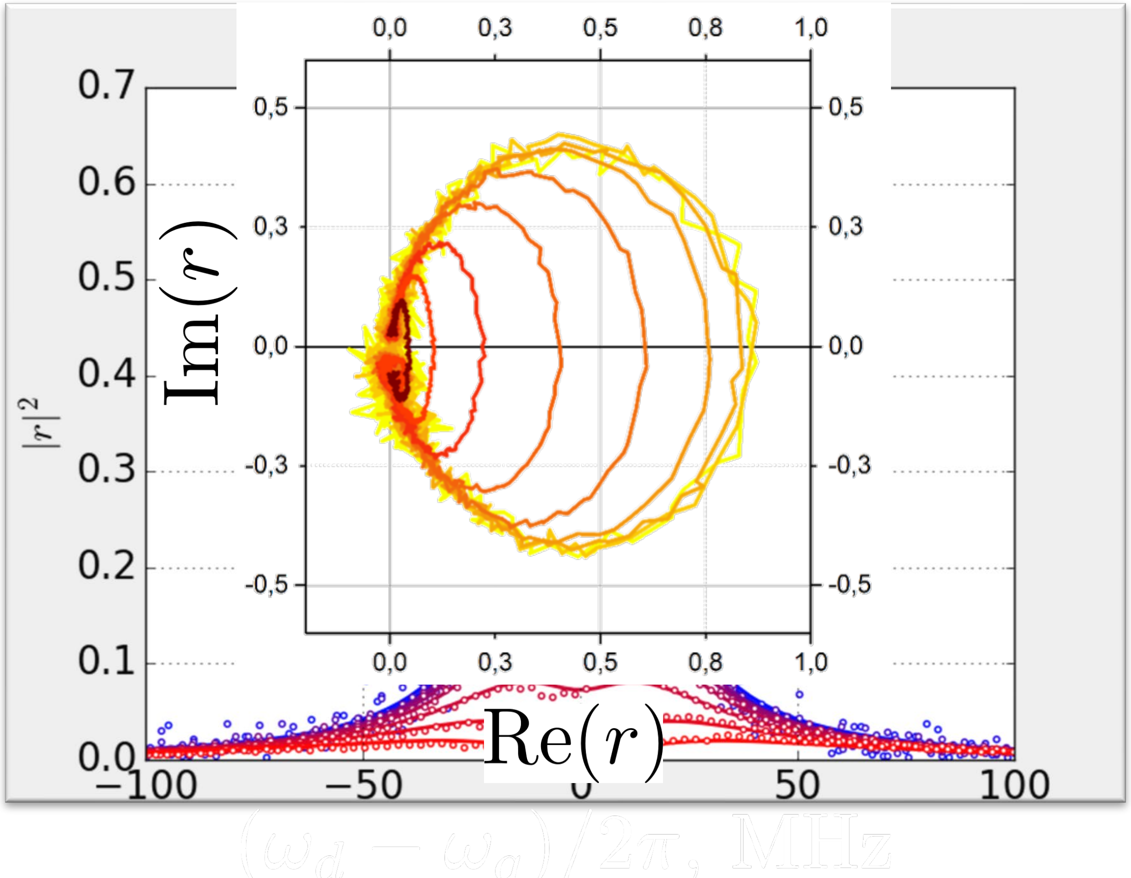
- Stationary solution: $\dot{\rho} = 0 \rightarrow r = \frac{V_{sc}}{V} = \frac{1 + i\lambda}{1 + \lambda^2 + \Omega^2/\Gamma_1\Gamma_2}, \lambda = \delta\omega/\Gamma_2$

- If $\Omega \ll \Gamma_1$, then $r \approx 1$ - weak signal is totally reflected (99.9% reached)
- If $\Omega \geq \Gamma_1$, then the atom has not enough time to emit elastically



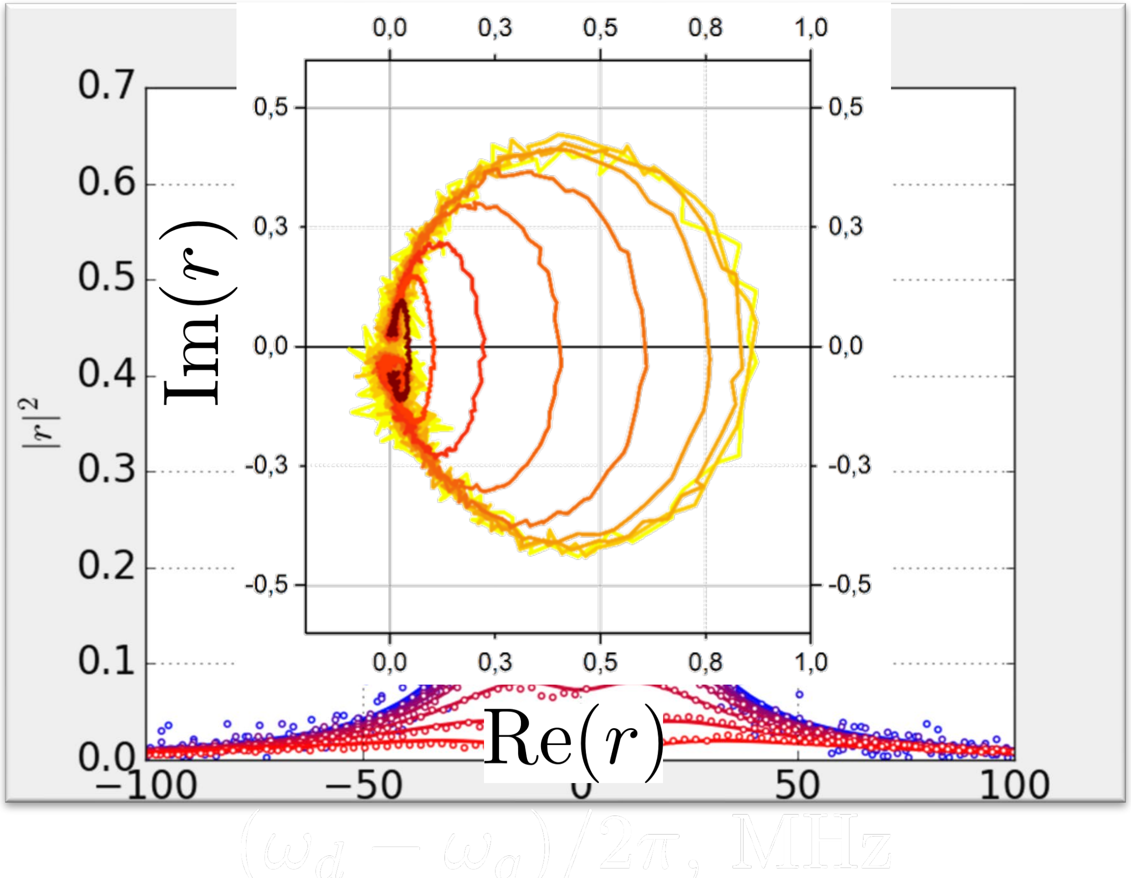
- Stationary solution: $\dot{\rho} = 0 \rightarrow r = \frac{V_{sc}}{V} = \frac{1 + i\lambda}{1 + \lambda^2 + \Omega^2/\Gamma_1\Gamma_2}, \lambda = \delta\omega/\Gamma_2$

- If $\Omega \ll \Gamma_1$, then $r \approx 1$ - weak signal is totally reflected (99.9% reached)
- If $\Omega \geq \Gamma_1$, then the atom has not enough time to emit elastically
- Inelastic scattering: $t = 1 - r, \; |t|^2 + |r|^2 < 1$



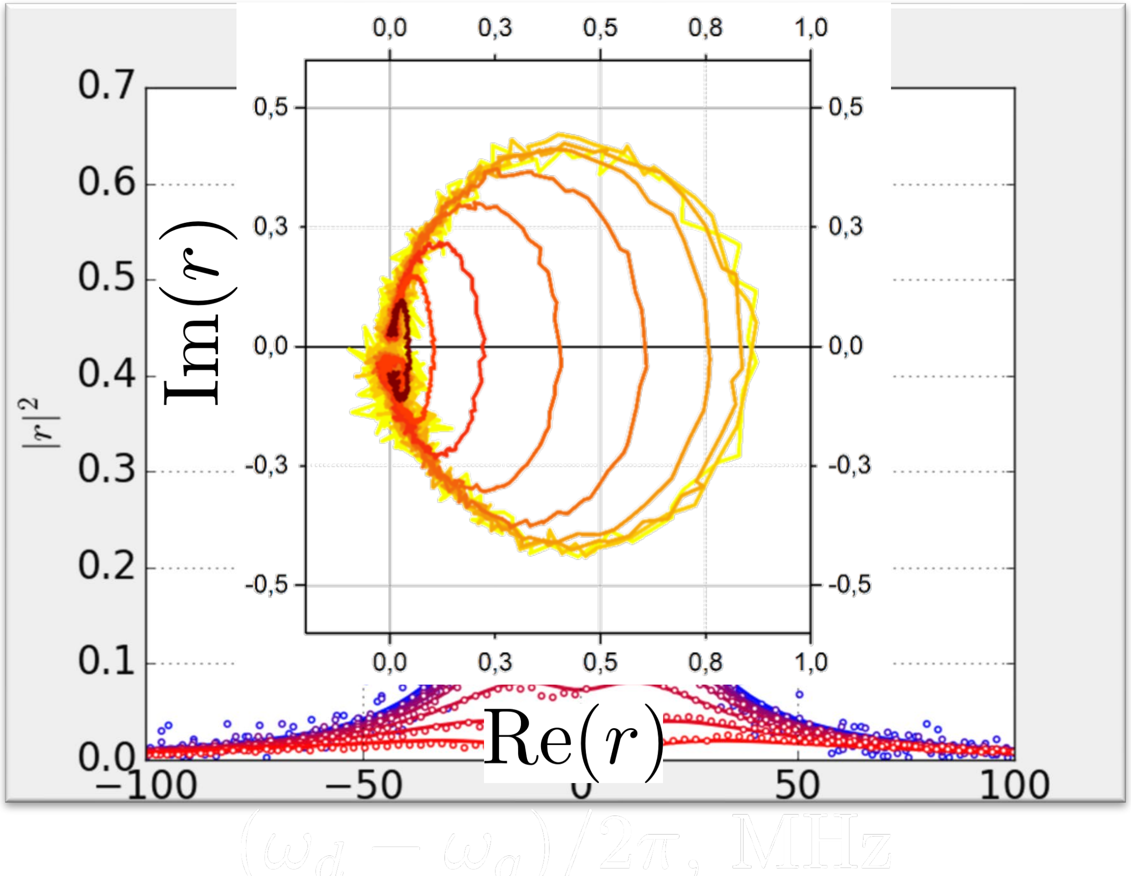
- Stationary solution: $\dot{\rho} = 0 \rightarrow r = \frac{V_{sc}}{V} = \frac{1+i\lambda}{1+\lambda^2+\Omega^2/\Gamma_1\Gamma_2}, \lambda = \delta\omega/\Gamma_2$

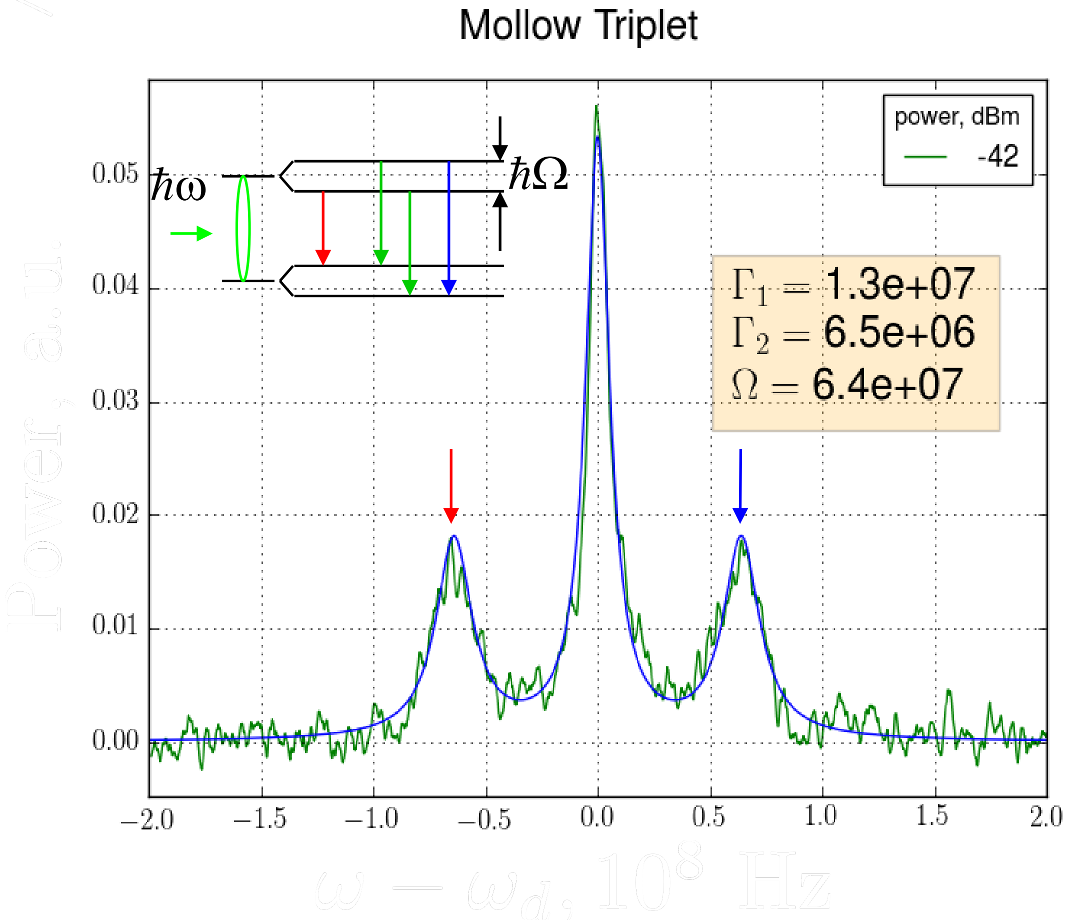
- If $\Omega \ll \Gamma_1$, then $r \approx 1$ - weak signal is totally reflected (99.9% reached)
- If $\Omega \geq \Gamma_1$, then the atom has not enough time to emit elastically
- Inelastic scattering: $t = 1 - r, \ |t|^2 + |r|^2 < 1$

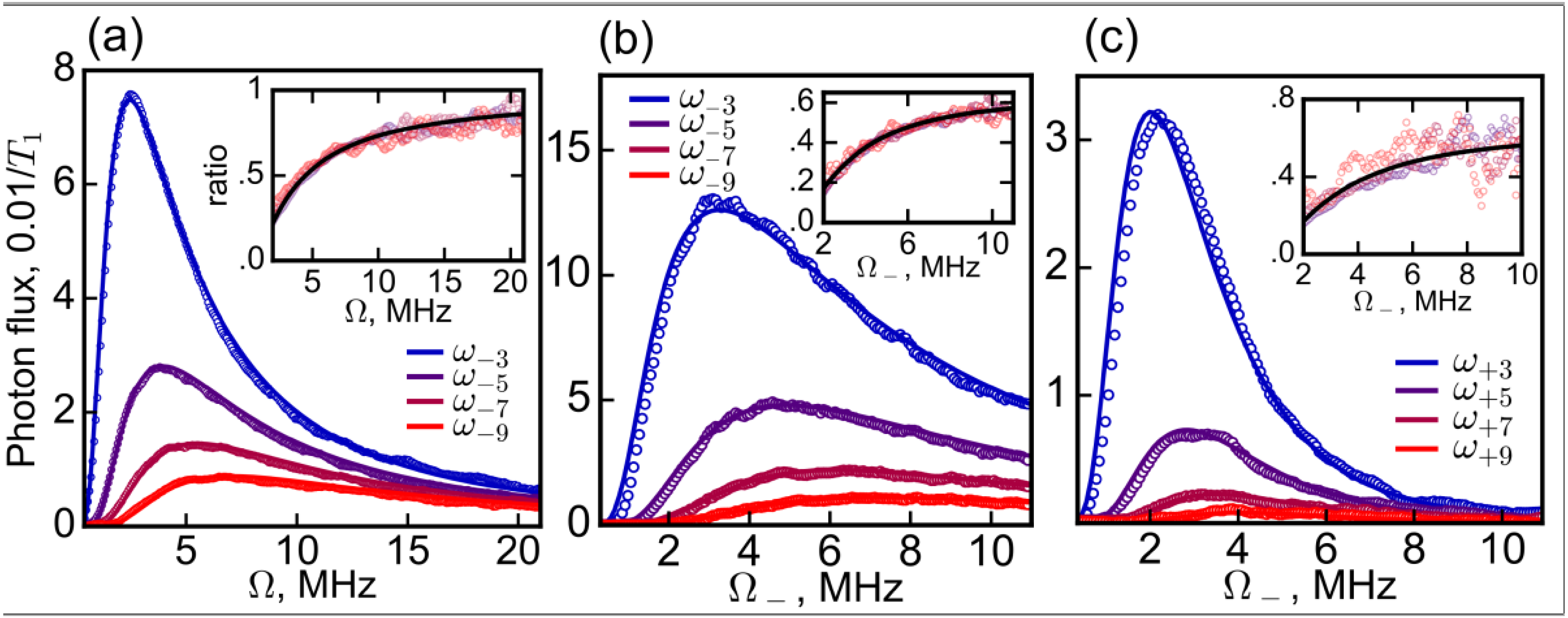


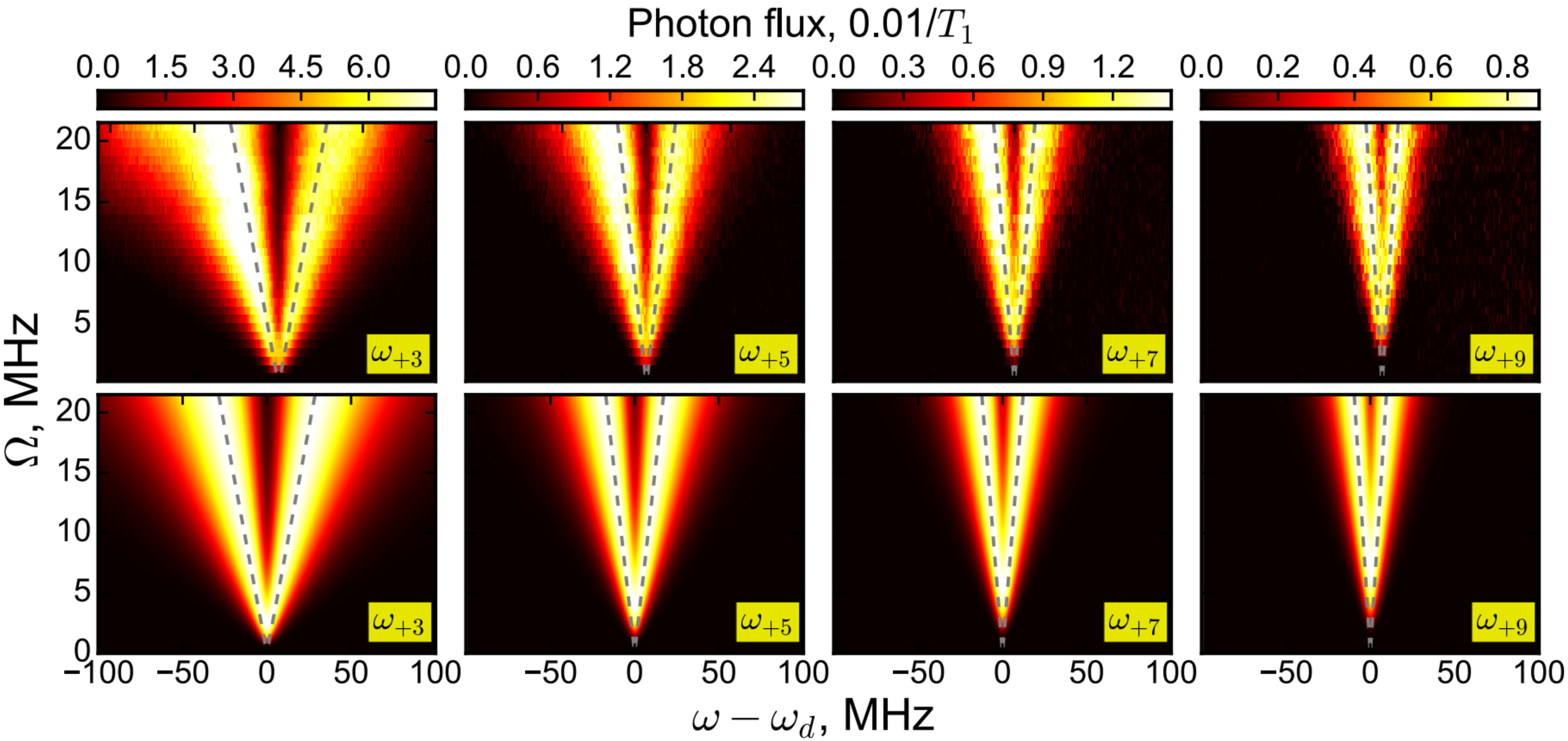
- Stationary solution: $\dot{\rho} = 0 \rightarrow r = \frac{V_{sc}}{V} = \frac{1 + i\lambda}{1 + \lambda^2 + \Omega^2/\Gamma_1\Gamma_2}, \lambda = \delta\omega/\Gamma_2$

- If $\Omega \ll \Gamma_1$, then $r \approx 1$ - weak signal is totally reflected (99.9% reached)
- If $\Omega \geq \Gamma_1$, then the atom has not enough time to emit elastically
- Inelastic scattering: $t = 1 - r, \ |t|^2 + |r|^2 < 1$






(a)
(b)
(c)
Photon flux, 0.01/T_1
ratio
Ω, MHz
Ω_-, MHz
ω_{-3}
ω_{-5}
ω_{-7}
ω_{-9}
ω_{+3}
ω_{+5}
ω_{+7}
ω_{+9}



Photon flux, 0.01/T_1
0.0 1.5 3.0 4.5 6.0
0.0 0.6 1.2 1.8 2.4
0.0 0.3 0.6 0.9 1.2
0.0 0.2 0.4 0.6 0.8
ω_{+3}
ω_{+5}
ω_{+7}
ω_{+9}
Ω, MHz
0 5 10 15 20
−100 −50 0 50 100
$\omega - \omega_d$, MHz

$\tau < T_1$

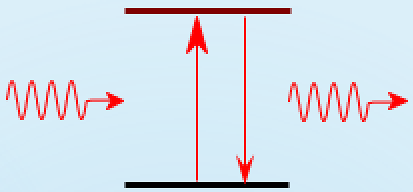
Conversion of an atomic superposed state into a photonic field:

$$\left(\cos\frac{\theta}{2}|g\rangle - i\sin\frac{\theta}{2}|e\rangle\right)\otimes|0\rangle \rightarrow |g\rangle\otimes\left(\cos\frac{\theta}{2}|0\rangle - \sin\frac{\theta}{2}|1\rangle\right)$$

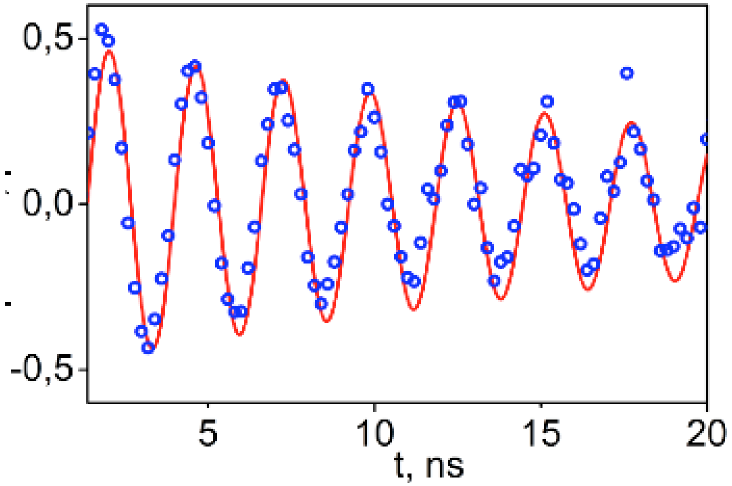
$$\sigma^{+} \rightarrow -ib^{+}$$

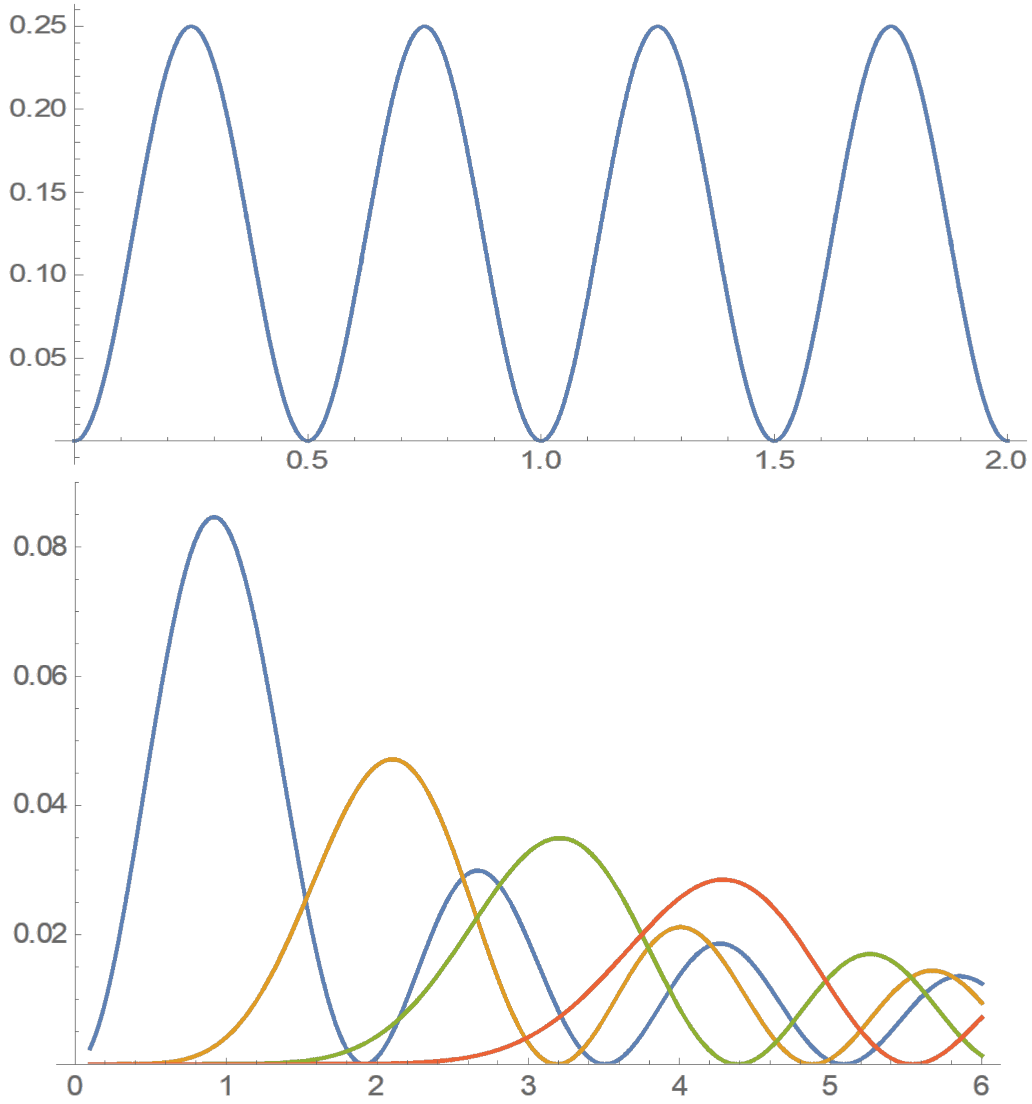
$$\Psi_{\sigma} \rightarrow \Psi_{b}$$

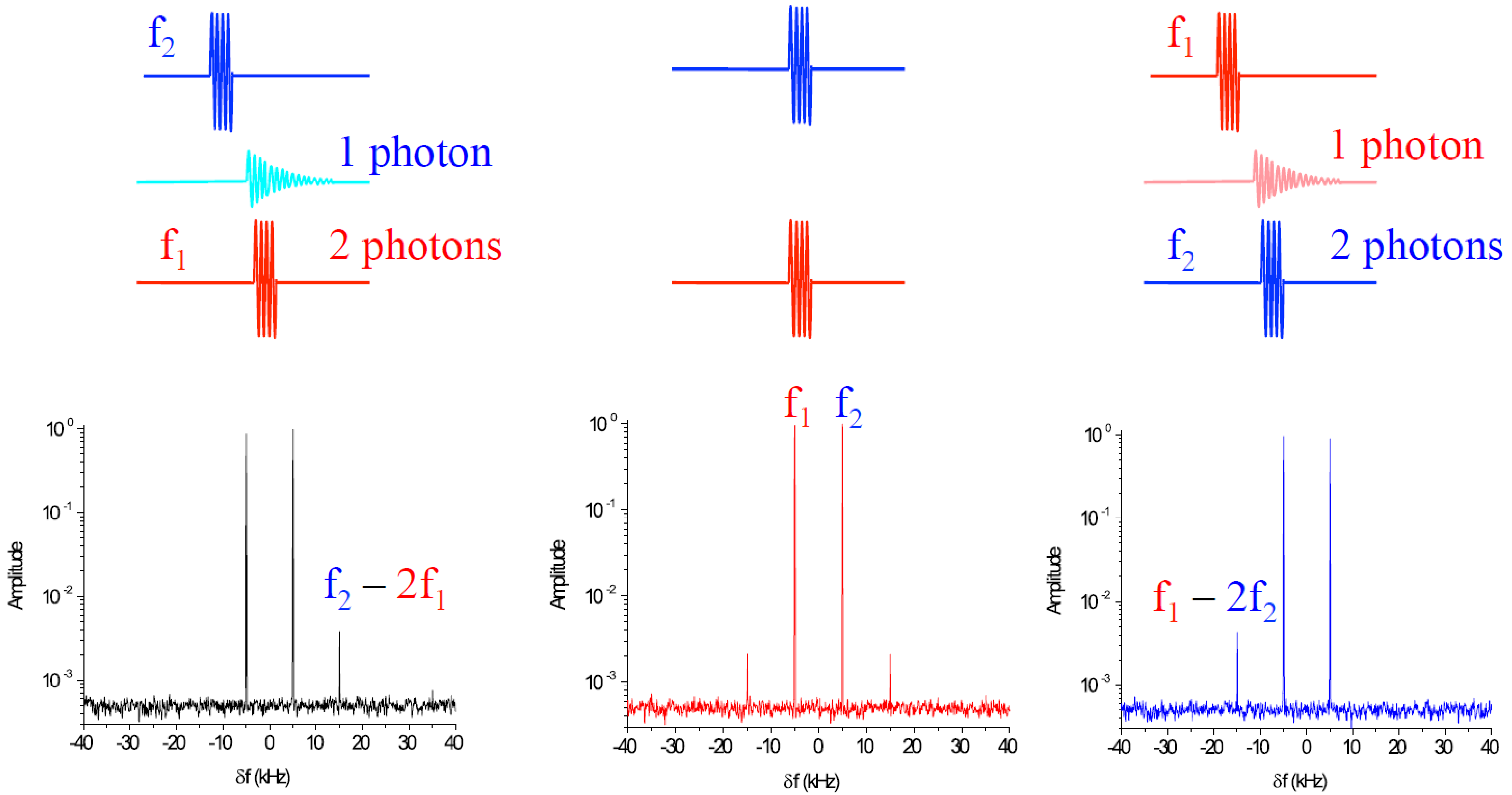
$$H = i\hbar g(ab^{+} - a^{+}b^{-})$$



b^{+}, b^{-} are single-photon creation/annihilation operators

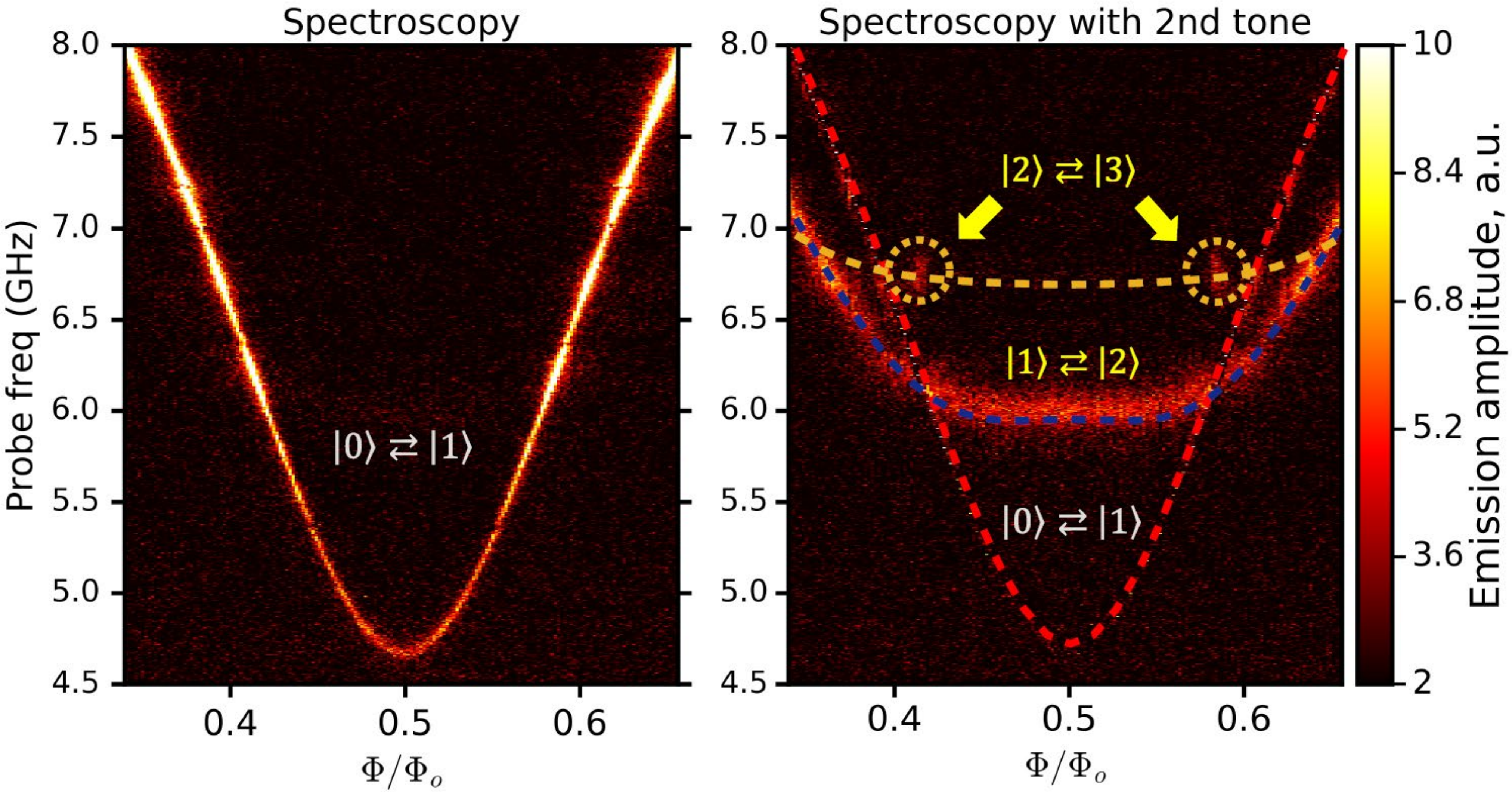



0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.5
1.0
1.5
2.0
0.08
0.06
0.04
0.02
0
1
2
3
4
5
6



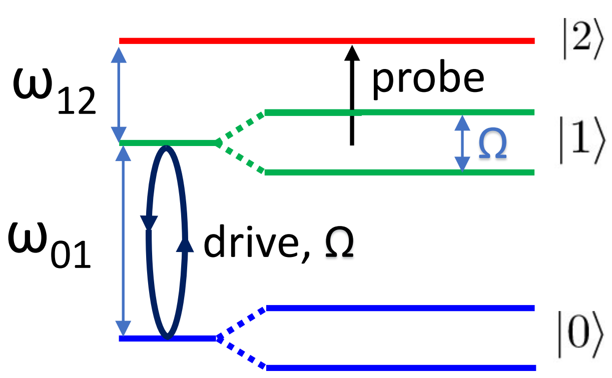
f2
1 photon
f1
2 photons
f1
1 photon
f2
2 photons
f1 f2
f2 – 2f1
f1 – 2f2
Amplitude
δf (kHz)

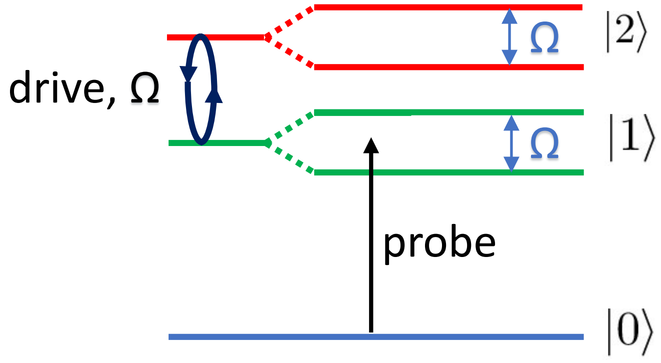
Adding extra tones

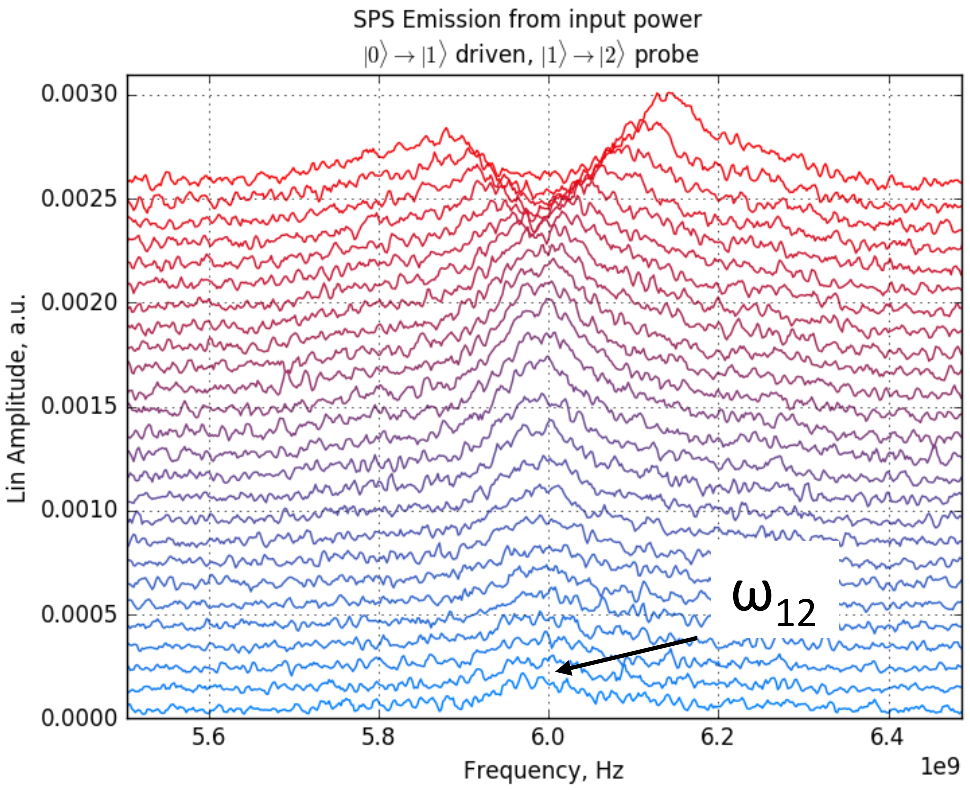


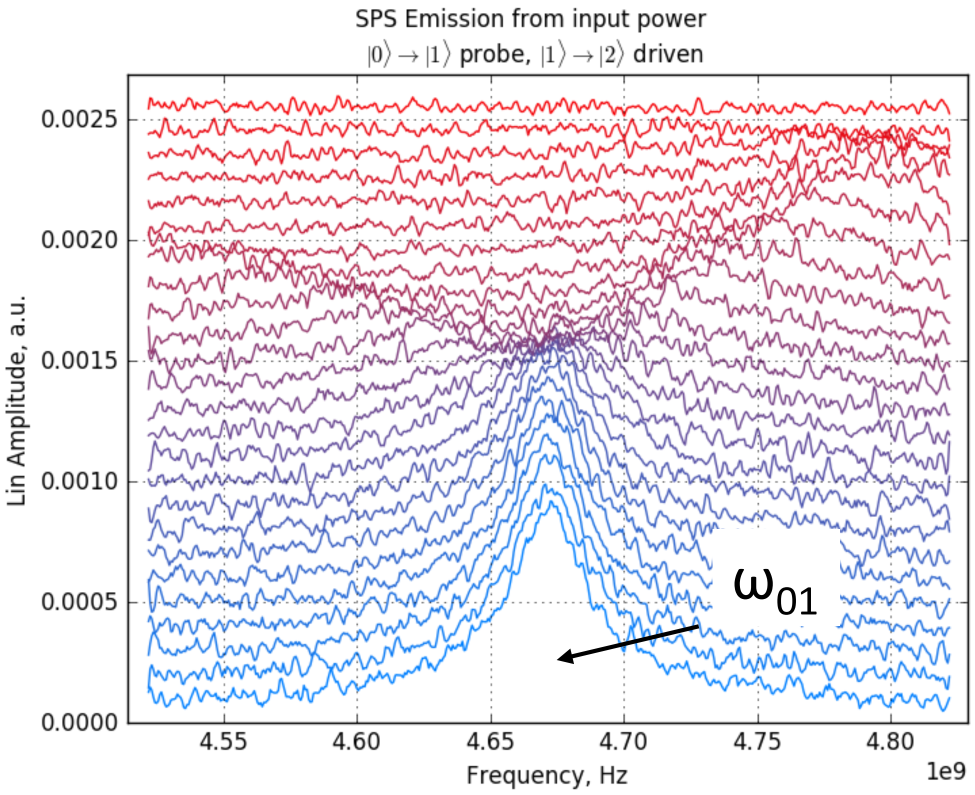
A. Yu. Dmitriev et al. *JETP Lett* (2017)

Autler-Townes splitting









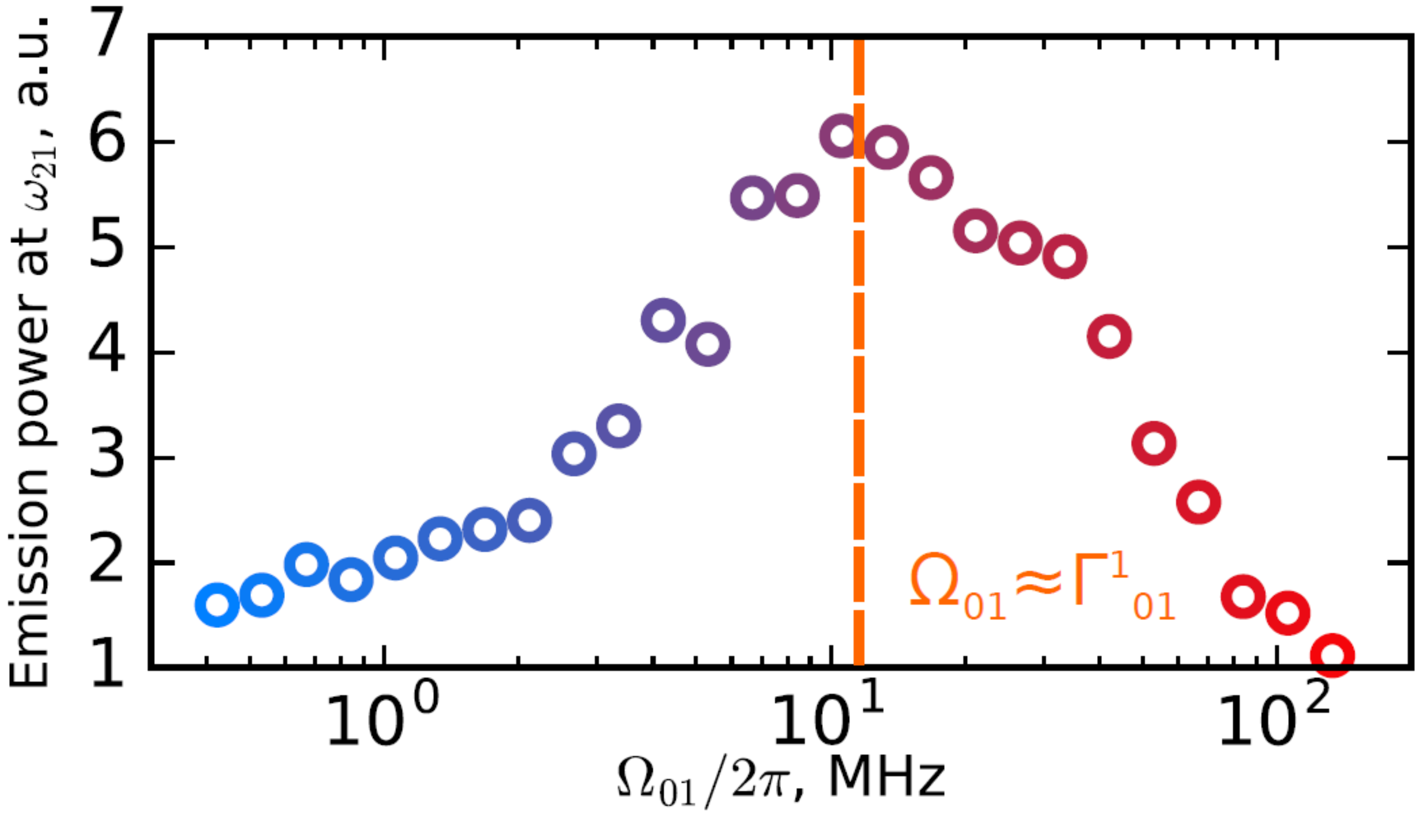
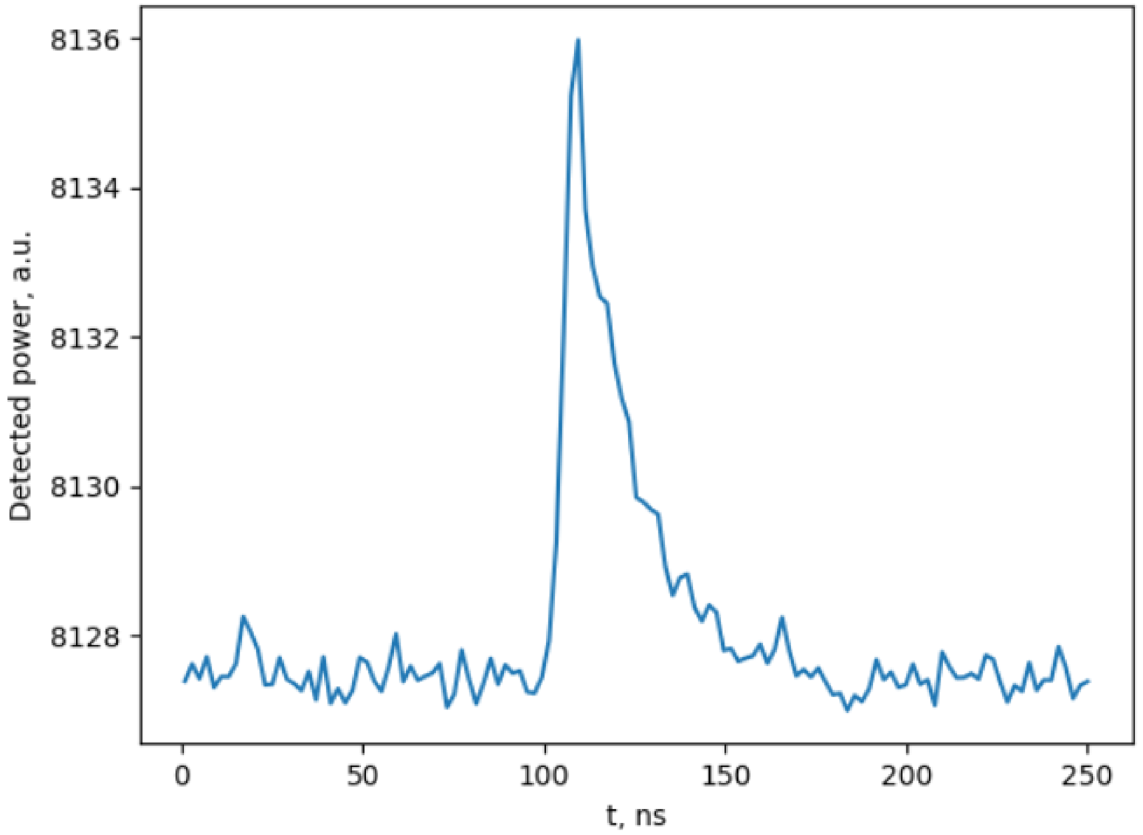


Рис. 4. Зависимость излучения на частоте перехода $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ от мощности первого тона на частоте перехода $|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$. Оптимальная накачка (наибольшее излучение) соответствует случаю $\Omega_{01} \approx \Gamma_1^{01}$.



8136
8134
8132
8130
8128
Detected power, a.u.
0
50
100
150
200
250
t, ns

MIPT
MOSCOW INSTITUTE
OF PHYSICS AND TECHNOLOGY

MIS&S

ИФТТ РАН
ISSP RAS